

MACIEJ TKACZYK
mtkaczyk992@gmail.com



KAROL J. KOWALSKI
k.kowalski@il.pw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9996-3637



PAWEŁ DĄBKOWSKI
p.dabkowski@il.pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-9268-382X

Politechnika Warszawska

Koncepcja przebudowy węzła drogowego Golden Glades w Miami na Florydzie.

Część 2. Analiza wielokryterialna, wrażliwości i przepustowości

Węzeł Golden Glades zlokalizowany jest w środkowej, intensywnie zurbanizowanej części Miami w otoczeniu gęstej sieci drogowej. Jest on splotem pięciu głównych dróg. W części 1 artykułu opisano koncepcję przebudowy węzła, w której przedstawiono jego charakterystykę, znaczenie w systemie transportu Miami oraz obciążenia ruchem poszczególnych tras i połączeń między nimi, co pozwoliło na przedstawienie pięciu rozwiązań K1–K5. W niniejszej części artykułu zaprezentowano analizy potwierdzające wybór najkorzystniejszego rozwiązania.

Analiza wielokryterialna

Analiza wielokryterialna jest najlepszą i bardzo często wykorzystywaną w budownictwie infrastrukturalnym metodą wyboru optymalnego rozwiązania wariantu przedsięwzięcia.

Przeprowadzana analiza składała się z 4 kryteriów głównych z od-

powiednio przypisanymi wagami:

- kryterium funkcjonalno-ruchowe – z wagą 45 punktów,
- kryterium kosztowe – z wagą 30 punktów,
- kryterium środowiskowe i społeczne – z wagą 15 punktów,
- kryterium możliwości etapowania prac – z wagą 10 punktów.

Najważniejszym kryterium jest kryterium funkcjonalno-ruchowe. Zwiększenie przepustowości poszczególnych relacji oraz poprawa bezpieczeństwa ruchu jest nadrzędnym celem projektu przebudowy węzła Golden Glades, stanowi więc ono 45% wszystkich wag.

Drugim najważniejszym kryterium jest kryterium kosztowe, któremu przypisano wagę 30 punktów. Zbyt wysokie koszty stanowią już wielokrotnie przeszkodę w realizacji

projektu przebudowy węzła (Turnbell, 2009). Cena realizacji przedsięwzięcia będzie zatem ważnym czynnikiem wyboru ostatecznej koncepcji.

Kryterium środowiskowemu i społecznemu przypisano wagę 15 punktów. Bez względu na wybrany wariant przebudowy, prowadzone prace będą uciążliwe dla lokalnej społeczności i środowiska. Ograniczenie tych utrudnień będzie istotnym elementem prowadzonej analizy.

Ostatnim pod względem wagi kryterium jest kryterium możliwości etapowania budowy, któremu przypisano wagę 10 punktów. Podobnie jak przy kryterium środowiskowym i społecznym, bez względu na wybrany wariant przebudowy, możliwość odpowiedniego etapowania budowy pozwoli na zachowanie poszczególnych relacji na węźle oraz zachowania płynności ruchu. Czynniki te powinny zatem mieć zauważalny wpływ na wyniki analizy wielokryterialnej.

Kryterium funkcjonalno-ruchowe

Maksymalna liczba punktów do uzyskania w tym kryterium to 45. W tabeli 1 przedstawiono podział kryterium głównego na kryteria szczegółowe oraz uzyskane wartości w każdej z proponowanych koncepcji wraz z uzasadnieniem wyniku.

Kryterium kosztowe

Maksymalna liczba punktów do uzyskania w tym kryterium to 30. W tabeli 2 przedstawiono podział kryterium głównego na kryteria szczegółowe oraz uzyskane wartości w każdej z proponowanych koncepcji wraz z uzasadnieniem wyniku.

Kryterium środowiskowe i społeczne

Maksymalna liczba punktów do uzyskania w tym kryterium to 15. W tabeli 3 przedstawiono podział kryterium głównego na kryteria szczegółowe oraz uzyskane wartości w każdej z proponowanych koncepcji wraz z uzasadnieniem wyniku.

Możliwość etapowania

Maksymalna liczba punktów do uzyskania w tym kryte-

rium to 10. W tabeli 4 przedstawiono jedyne kryterium szczegółowe oraz uzyskane wartości w każdej z proponowanych koncepcji wraz z uzasadnieniem wyniku.

Wyniki

W tabeli 5 zostały przedstawione wyniki przeprowadzonej analizy wielokryterialnej dla przebudowy węzła Golden Glades.

Tabela 1. Kryteria szczegółowe kryterium funkcjonalno-ruchowego

Kryterium szczegółowe	Miara techniczna	Sposób oceny	Koncepcja	Opis	Wartość
Długość poszczególnych tras	Dystans do pokonania	Oszacowanie	K1	Wartość to suma długości łącznic w każdym kierunku	2061,7
			K2		2234,6
			K3		1917,7
			K4		2035,9
			K5		1954,4
Swoboda ruchu	Krętość tras łącznic	Oszacowanie	K1	Stosunek sumy bezwzględnych wartości kątów zwrotu kierunków trasy drogi do jej długości	419,7
			K2		543,1
			K3		413,3
			K4		177,8
			K5		320,5
	Prędkość projektowa na łącznicy	Oszacowanie	K1	Średnia wartość prędkości projektowej z obu łącznic	55,0
			K2		45,0
			K3		55,0
			K4		60,0
			K5		62,5
Bezpieczeństwo	Czytelność	Opis	K1	Rozwiązanie węzła jest dość czytelne. Wyłączenie na łącznicy wjazdową na SR 826 wykonywane jest z drogi zbiorczo-rozdzielczej. Analogicznie łącznica w przeciwnym kierunku wyłączana jest z trasy głównej SR 826 łącznicą półbepośrednią oraz włączana jest do drogi zbiorczo rozdzielczej trasy na I-95	7
			K2	Rozwiązanie węzła jest mało czytelne. Relacja z SR 826 na I-95 wykonywana jest łącznicą półbepośrednią znajdującą się 300m za łącznicą bepośrednią z drogą I-95 w kierunku południowym. Łącznica z I-95 na SR 826 analogicznie do K1	4
			K3	Rozwiązanie również mało czytelne. Relacje skątne wykonane w sposób podobny do K2 z różnicą polegającą na włączeniu łącznicy z SR 826 do pasa ekspresowego I-95	5
			K4	Rozwiązanie węzła jest dobrze czytelne dla kierowców. Obie relacje wykonywane są z i do pasów ekspresowych I-95 oraz kontynuowane na S R 826	8
			K5	Rozwiązanie węzła jest dość czytelne. Relacja z I-95 na SR 826 wykonywana za pomocą łącznicy bepośredniej z pasa ekspresowego I-95, a relacja z SR 826 na I-95 wykonywana jest za pomocą łącznicy półbepośredniej doprowadzonej do drogi zbiorczo-rozdzielczej trasy I-95	7
Podwojenie relacji	Liczba podwojonych relacji skątnych	Opis	K1	Liczba mówi o ilości podwojonych relacji skątnych z wyłączeniem relacji z pasów ekspresowych	2
			K2		2
			K3		1
			K4		0
			K5		1

Źródło: własne

Tabela 2. Kryteria szczegółowe kryterium kosztowego

Kryterium szczegółowe	Miara techniczna	Sposób oceny	Koncepcja	Opis	Wartość
Długość pasów ruchu	Suma długości pasów ruchu	Oszacowanie	K1	Wartość to suma długości pasów ruchu na wszystkich projektowanych łącznicach	2950,5
			K2		2886,1
			K3		2569,3
			K4		2687,5
			K5		2606,0
Powierzchnia obiektów inżynierskich	Suma powierzchni obiektów inżynierskich	Oszacowanie	K1	Wartość to suma powierzchni obiektów inżynierskich na projektowanych łącznicach	3516,7
			K2		3369,4
			K3		6291,4
			K4		8806,6
			K5		5684,8
Wykup terenu	Powierzchnia terenu do wykupu	Oszacowanie	K1	Wartość to suma powierzchni terenów koniecznych do wykupienia pod proponowane zmiany w węźle	1888,0
			K2		7078,0
			K3		9083,0
			K4		2944,0
			K5		2307,0

Źródło: własne

Tabela 3. Kryteria szczegółowe kryterium środowiskowego i społecznego

Kryterium szczegółowe	Miara techniczna	Sposób oceny	Koncepcja	Opis	Wartość
Hałas	Liczba nowej zabudowy	Oszacowanie	K1	Procentowa liczba nowoprojektowanych dróg, których trasy nie pokrywają się z istniejącą zabudową	17,6%
			K2		27,4%
			K3		32,0%
			K4		38,4%
			K5		28,0%
Zanieczyszczenie powietrza	Liczba dróg o pochyleniu większym niż 4%	Oszacowanie	K1	Procentowa liczba nowoprojektowanych dróg, których pochylenie podłużne jest większe lub równe 4%.	48,0%
			K2		44,5%
			K3		51,9%
			K4		58,0%
			K5		60,4%
Estetyka	Ocena wyglądu danej koncepcji	Opis	K1	W tym kryterium punkty przyznawano w skali od 1-5 wg subiektywnej oceny estetycznej danej koncepcji. Pod uwagę wzięto m.in. wkomponowanie proponowanego rozwiązania w istniejącą zabudowę, ingerencje z zabudową z centrum węzła oraz liczbę poziomów węzła.	5
			K2		1
			K3		3
			K4		4
			K5		2

Źródło: własne

Tabela 4. Kryteria szczegółowe kryterium możliwości etapowania

Kryterium szczegółowe	Miara techniczna	Sposób oceny	Koncepcja	Opis	Wartość
Możliwość etapowania	Łatwość dostosowania do zmian natężeń ruchu	Opis	K1	W trakcie budowy każda z proponowanych koncepcji będzie powodowała utrudnienia w odbywającym się ruchu. Największe utrudnienia przewidywane są przy budowie pasów włączeń i wyłączeń z SR 826. Zwiększone utrudnienia w tym rejonie przewidywane są dla koncepcji W4, a zmniejszone dla K2 i K3. Zwiększona utrudnienia na trasie I-95 ze względu na wyłączenia i włączenia z pasów ekspresowych przewidywane są dla K3, K4 i K5 a mniejsze dla K1 i K2. Pod uwagę wzięto również włączenia i wyłączenia do/z dróg o liczbie pasów większej niż 1 co umożliwi tymczasowe zamknięcie ruchu na jednym z pasów jednocześnie umożliwiając ruch na danej relacji.	60
			K2		80
			K3		50
			K4		20
			K5		40

Źródło: własne

Tabela 5. Wyniki analizy wielokryterialnej

Kryterium główne	Waga	Kryterium szczegółowe	Waga	Miara techniczna	Sposób oceny	Zakres wartości		K1	K1	K2	K2	K3	K3	K4	K4	K5	K5
						wartość	ocena	wartość	ocena	wartość	ocena	wartość	ocena	wartość	ocena		
Funkcjonalno-ruchowe	45	Długość poszczególnych tras	15	dystans do pokonania	oszacowanie	1800	2800	2061,7	11,1	2234,6	8,5	1917,7	13,2	2035,9	11,5	1954,4	12,7
		Swoboda ruchu	5	średnia krętość trasy	oszacowanie	0	300	209,8	1,5	271,6	0,5	206,7	1,6	88,9	3,5	160,2	2,3
			5	prędkość projektowa na łącznicy	oszacowanie	40	80	55	1,9	45	0,6	55	1,9	60	2,5	62,5	2,8
		Bezpieczeństwo	15	czytelność	opis	0	10	7	10,5	4	6,0	5	7,5	8	12,0	7	10,5
		Podwojenie relacji	5	liczba podwojonych relacji skrajnych	opis	0	2	2	0,0	2	0,0	1	2,5	0	5,0	1	2,5
Suma			45														
Kosztowe	30	Suma długości pasów ruchu	10	suma długości pasów ruchu	oszacowanie	220	3200	2950,5	0,8	2886,1	1,1	2569,3	2,1	2687,5	1,7	2606	2,0
		Suma powierzchni obiektów inżynierskich	12	powierzchnia obiektów inżynierskich	oszacowanie	2500	10000	3516,7	10,4	3369,4	10,6	6291,4	5,9	8806,6	1,9	5684,8	6,9
		Powierzchnia terenu do wykupu	8	powierzchnia terenów do wykupu	oszacowanie	0	10000	1888	6,5	7078	2,3	9083	0,7	2944	5,6	2307	6,2
Suma			30														
Środowiskowe i społeczne	15	Środowiskowe	6	hałas	oszacowanie	0,1	0,5	0,176	4,9	0,274	3,4	0,32	2,7	0,384	1,7	0,28	3,3
		Spoteczne	6	zanieczyszczenie powietrza	oszacowanie	0,3	0,7	0,48	3,3	0,445	3,8	0,519	2,7	0,58	1,8	0,604	1,4
		Estetyka	3	subiektywna ocena wyglądu	oszacowanie	1	5	5	3,0	1	0,0	3	1,5	4	2,3	2	0,8
Suma			15														
Możliwość etapowania	10	Możliwość ruchu w trakcie budowy	10	koszty	opis	0	100	60	6,0	80	8,0	50	5,0	20	2,0	40	4,0
Suma			10						59,8		44,8		47,4		51,5		55,4

Źródło: własne

Koncepcją która otrzymała najwyższy wynik okazała się koncepcja nr 1. Wysoki wynik zawdzięcza stosunkowo niewielkiej trasie do pokonania przez pojazdy poruszające się po nowych łącznicach, czytelnością rozwiązania, a także niższymi kosztami budowy.

Drugą w kolejności koncepcją jest koncepcja nr 5, której trasa jednej z łącznic pokrywa się z trasą z koncepcji 1.

Analiza wrażliwości

Analiza wrażliwości jest prostą techniką analityczną pozwalającą na badanie wpływu zmiany kryteriów analizy wielokryterialnej na ostateczny wynik wyboru koncepcji. Poprawnie przeprowadzona analiza wrażliwości dostarcza odpowiedzi na pytanie czy wybrany wariant przedsięwzięcia

jest „stabilny”, tzn. odporny na zmianę wcześniej założonych kryteriów wyboru koncepcji lub zmian wartości poszczególnych kryteriów. Analizowana praca skupia się na zmianach wag poszczególnych kryteriów analizy wielokryterialnej. Poniżej w tabeli 6 zestawiono zmianę punktacji za poszczególne kryteria w danych wariantach.

Tabela 6. Zestawienie zmiany punktacji poszczególnych kryteriów w danych wariantach

Kryterium	W0	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Funkcjonalno-ruchowe	45	55	50	35	35	35	70
Kosztowe	30	30	25	35	20	25	20
Środowiskowe i społeczne	15	10	10	15	30	10	5
Możliwości etapowania	10	5	15	15	15	30	5

Źródło: własne

Podsumowanie wyników

Przeprowadzona analiza wrażliwości wykazała, że najstabilniejszą koncepcją przebudowy węzła jest koncepcja oznaczona jako K1. Uzyskała ona najwyższy punktowy wynik w 6 z 7 przeprowadzonych wariantów analizy wielokryterialnej. Jest to również koncepcja wybrana w podstawowym wariancie analizy wielokryterialnej.

Wyniki analiz przedstawione w tabeli 7 i na rysunku 1 jednoznacznie wskazują, że najlepszą koncepcją przebudowy węzła Golden Glades jest koncepcja 1.

Tabela 7. Zestawienie wyników analizy wrażliwości

	k1	K2	K3	K4	K5
Wariant 0	59,8	44,8	47,4	51,5	55,4
Wariant 1	60,3	43,2	49,5	56,4	59,3
Wariant 2	60,1	46,9	50,5	53,1	57,4
Wariant 3	59,8	47,2	44,6	46,6	52,9
Wariant 4	60,6	46,5	47,0	47,2	49,9
Wariant 5	58,2	51,3	46,6	44,4	51,5
Wariant 6	54,3	38,6	52,5	61,5	60,4
Suma	410,2	316,2	336,6	359,5	384,5
Liczba pierwszych miejsc	6	0	0	1	0

Źródło: własne

Obliczenie przepustowości

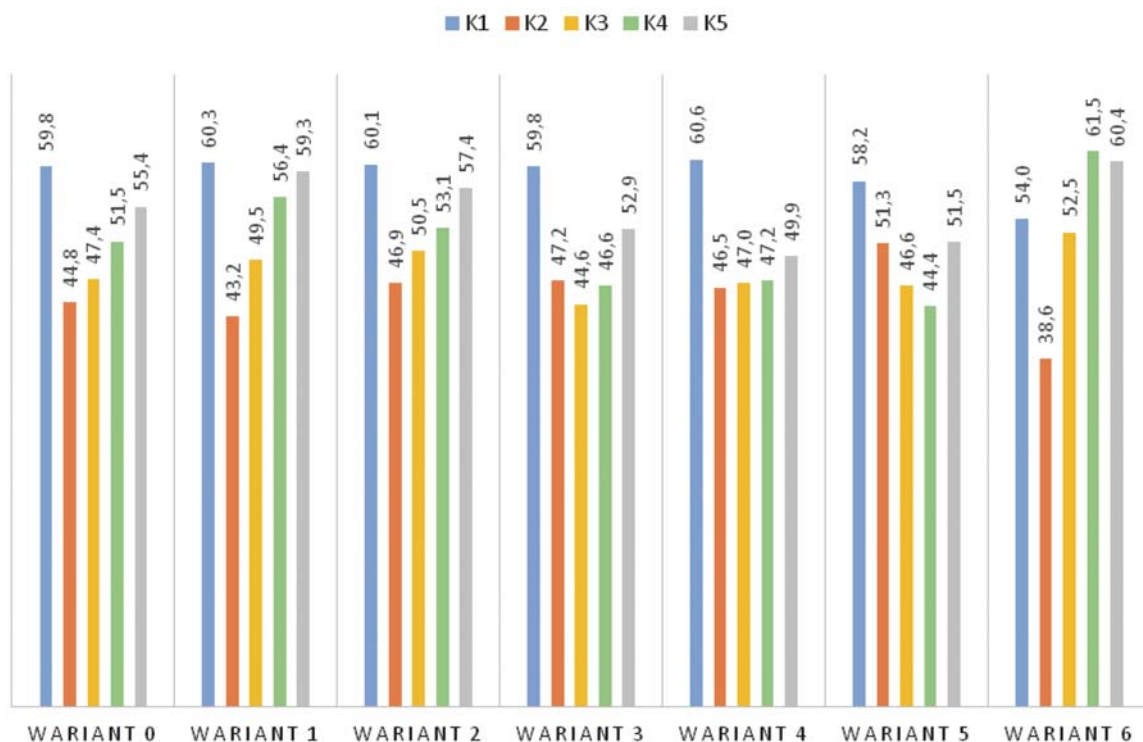
Odcinki międzywęzłowe

Ponieważ zakres projektu obejmuje jedynie węzeł Golden Glades, odcinki międzywęzłowe pozostają niezmienione. W tej sytuacji obliczenia dotyczące przepustowości tych odcinków zostały pominięte.

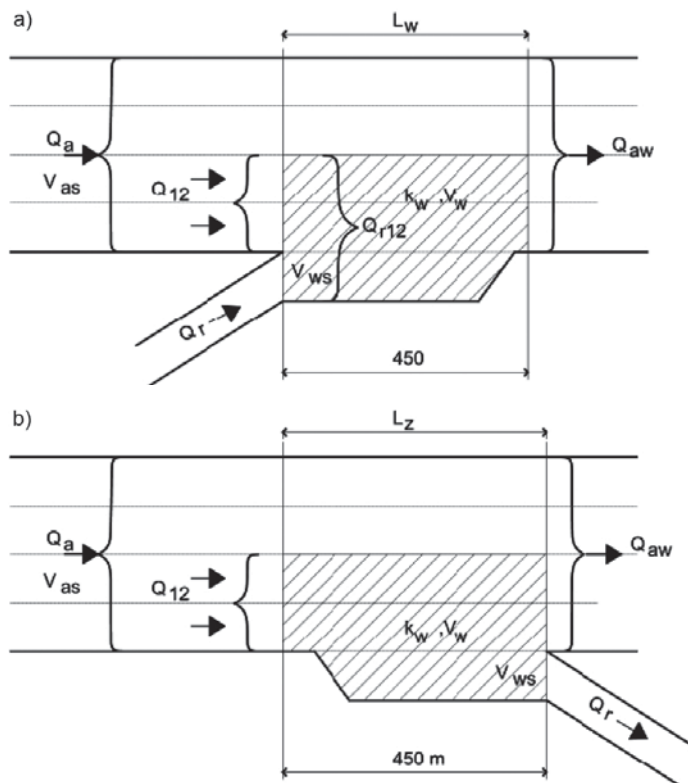
Łącznice

Analiza przepustowości polega na ustaleniu poziomu swobody ruchu oraz pozwala na wyznaczenie liczby pasów projektowanych łącznic. Obliczenia zostały wykonane na

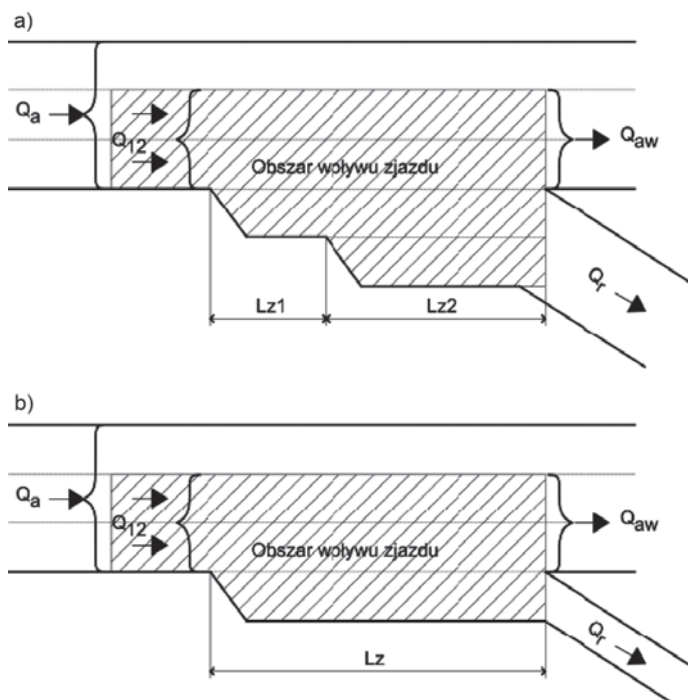
Rys. 1. Zestawienie wyników analizy wrażliwości.
Źródło: własne



podstawie Instrukcji obliczania przepustowości dróg I i II klasy technicznej (autostrady i drogi ekspresowe) wydanej przez Generalną Dyрекcję Dróg Publicznych w 1995 roku (opracowanie to bazuje na metodzie amerykańskiej HSM-85).



Rys. 2. Obszary wpływu włączenia i wyłączenia oraz podstawowe parametry ruchu i geometrii tych obszarów dla łącznic jednopasowych (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)



Rys. 3. Obszary wpływu wyłączenia dla łącznic dwupasowych (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

Procedura postępowania przy obliczaniu przepustowości łącznic zawiera trzy główne elementy obliczeniowe:

- Obliczenie natężenia ruchu Q_{12} na pasach 1 i 2 autostrady bezpośrednio przed początkiem obszaru wpływu włączenia lub przed początkiem pasa wyłączenia.
- Obliczenie krytycznych wartości przepustowości i porównanie wartości przewidywanych (pomierzonych lub prognozowanych) natężeń ruchu do wartości przepustowości.
- Obliczenie gęstości ruchu k_w w obszarze wpływu włączenia/wyłączenia i określenie na podstawie jego wartości poziomu swobody ruchu PSR.

Przeliczenia natężeń ruchu na natężenia obliczeniowe

Uzyskane w wyniku pomiarów ruchu natężenia ruchu przeliczane są na natężenia obliczeniowe na podstawie wzoru:

$$Q_o = \frac{Q_h}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}}$$

w którym:

Q_o – obliczeniowe natężenie ruchu – natężenie w szczytowych 15 minutach, przeliczone na godzinę, w idealnych warunkach drogowo-ruchowych [E/h],

Q_h – natężenie ruchu (pomierzone lub prognozowane) w godzinie analizy w rzeczywistych warunkach drogowo-ruchowych [P/h],

f_i – współczynniki korygujące uwzględniające wpływy: pojazdów ciężkich (f_c), szerokości pasów ruchu i odległości przeszkód bocznych (f_p) oraz znajomość drogi w populacji kierowców (f_{zd}),

k_{15} – współczynnik wahań ruchu w godzinie – przyjęto 0,9.

Współczynnik f_c obliczany jest z następującego wzoru:

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)}$$

w którym:

p_c – współczynnik korygujący uwzględniający wpływ szerokości pasów ruchu i odległości przeszkód bocznych,

E_c – współczynnik przeliczeniowy.

Tabela 8. Współczynniki przeliczeniowe E_c ustalone według procedury uproszczonej (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

Rodzaj pojazdu	Rodzaj terenu		
	płaski	falisty	górzysty
Samochody ciężarowe	1,5	3,0	6,0

Tabela 9. Współczynniki wpływu szerokości pasów ruchu i odległości przeszkód bocznych f_p (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

Odległość od przeszkody bocznej wp [m]	Współczynnik korygujący f_p									
	Przeszkody boczne po jednej stronie jezdni					Przeszkody boczne po obu stronach jezdni				
	Szerokość pasa ruchu [m]									
	3,75	3,60	3,50	3,25	3,00	3,75	3,60	3,50	3,25	3,00
≥ 1,80	1,00	1,00	0,98	0,94	0,90	1,00	1,00	0,98	0,94	0,90
1,50	1,00	1,00	0,98	0,94	0,90	1,00	1,00	0,98	0,94	0,90
1,00	0,99	0,99	0,97	0,93	0,89	0,98	0,98	0,96	0,92	0,88
0,50	0,96	0,96	0,95	0,91	0,87	0,93	0,93	0,92	0,88	0,84
0,00	0,92	0,92	0,91	0,88	0,84	0,86	0,86	0,85	0,82	0,78

Współczynnik f_{zd} dobierany jest z tabeli 10.

Tabela 10. Dobór współczynnika uwzględniającego znajomość drogi przez użytkowników f_{zd} . Według oceny inżynierskiej lub danych lokalnych (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

Charakterystyka użytkownika	Współczynnik korygujący f_{zd}
Dojeżdżający do pracy lub inni regularni użytkownicy	1,0
Ruch rekreacyjny lub inni nieregularni użytkownicy	od 0,75 do 0,99

Natężenia ruchu Q_{12} na pasach ruchu 1 i 2

Natężenia ruchu na pasach 1 i 2 obliczane są z następujących wzorów:

$$Q_{12} = Q_r + (Q_a - Q_r) \cdot p_z \quad \text{dla wjazdu na łącznicę}$$

$$Q_{12} = Q_a \cdot p_w \quad \text{dla wjazdu z łącznicy}$$

w których:

Q_a – całkowite natężenie ruchu na autostradzie przed analizowanym obszarem,

Q_r – całkowite natężenie ruchu na łącznicy objętej analizą,

l_w, l_z – całkowita długość pasa włączenia/wyłączenia

V_{ws} – prędkość ruchu swobodnego,

p_w, p_z – parametry dobierane na podstawie liczby pasów na jezdni autostrad lub dróg ekspresowych oraz usytuowania wjazdu/wyjazdu z łącznicy względem innych łącznic.

Wartości przepustowości

Tabela 11. Wartości przepustowości dla obszarów włączenia i wyłączenia (dla łącznic 1-pasowych) (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

Liczba pasów ruchu na jezdni autostrady	Obszar włączenia		Obszar wyłączenia	
	maks. Q_{aw} [E/H]	maks. Q_{r12} [E/H]	maks. $(Q_{aw} + Q_r)$ [E/H]	maks. Q_{12} [E/H]
2 pasy	4400	4400	4400	4400
3 pasy	6600	4600	6600	4400
4 pasy	8800	4600	8800	4400

Uzyskane natężenia ruchu porównywane są z przepustowościami przedstawionymi w tabeli 11 i 12.

Gęstość ruchu i ocena PSR

Dla wjazdu z łącznicy 1-pasowej w obszar włączenia:

$$k_w = 3,403 + 0,00456 \cdot Q_r + 0,00485 \cdot Q_{12} - 0,0128 \cdot l_w \quad [\text{E/km/pas}]$$

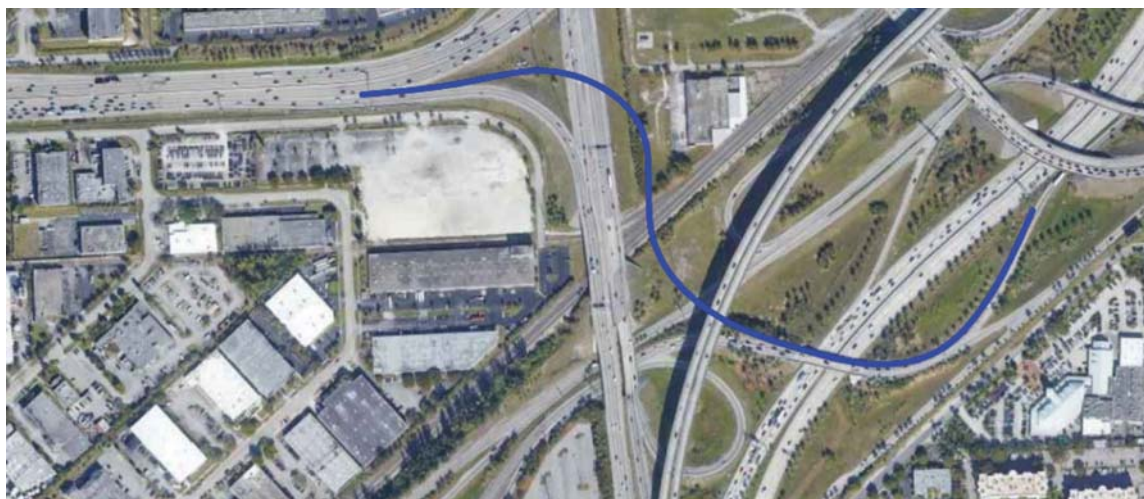
Dla wjazdu na 1-pasową łącznicę z obszaru wyłączenia:

$$k_w = 2,643 + 0,00534 \cdot Q_{12} - 0,0183 \cdot l_z \quad [\text{E/km/pas}]$$

Tabela 12. Kryteria oceny PSR dla obszarów wpływu wjazdów/wyjazdów (Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995)

PSR	Maksymalna gęstość ruchu k_w – miernik podstawowy [E/km/pas]	Minimalna prędkość V_w – miernik pomocniczy [km/h]
A	6,0	93
B	12,5	90
C	17,5	83
D	22,0	74
E	od 25,0 do 27,5	67
F	> 23,0	< 67

➤ Łącznica z SR 826 na I-95



Fot. 1. Schemat przebiegu łącznicy z SR 826 na I-95. Źródło: własne

Wyłączenie

Q_{hr}	Q_{ha}	k_{15}	p_c	E_c	f_p	f_{zd}
1400	4400	0,9	0,1	1,5	1,0	1,0

Długość pasa wyłączenia obliczana jest ze wzoru:

$$l_z = l_s + l_{zw}$$

w którym:

l_s – długość skosu – w wypadku pasów kierunkowych stała i równa 75 m

l_{zw} – długość zwalniania dobierana na podstawie tabeli 13

Tabela 13. Długość pasów wyłączenia

Różnica prędkości ΔV [km/h]	Zalecana długość odcinka zwalniania l_{zw} [m] przy pochyleniu podłużnym pasa włączania [%]							
	-5	-4	-3	-2	0	2	3	4
60	280	250	230	210	190	170	160	150
50	250	230	210	190	170	150	140	130
40	220	200	180	170	150	130	120	110
30	170	160	150	140	120	110	100	90
≤ 20	120	110	100	95	85	75	70	65

Źródło: Krystek, 2008

W przypadku różnicy prędkości na łącznicy i drodze SR 826 wynoszącej 40 km/h (25 mil/h) długość odcinka zwalniania wynosi 110 m. Zatem:

$$l_z = 75 + 110 = 185 \text{ m}$$

$$l_z = 185 \text{ m}$$

$$w = 3,6 \text{ m}$$

$$p_z = 1,0$$

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot (1,5 - 1)} = 0,95$$

$$Q_a = \frac{Q_{ha}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{4400}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 5146$$

$$Q_r = \frac{Q_{hr}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{1400}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1637$$

$$Q_{12} = Q_r + (Q_a - Q_r) \cdot p_z = 1637 + (5146 - 1637) \cdot 1,0 = 5146 \frac{E}{h} > 4400 \frac{E}{h}$$

Ruch będzie odbywał się z zakłóceniami.

Gęstość ruchu

$$k_w = 2,643 + 0,00534 \cdot Q_{12} - 0,0183 \cdot l_z = 2,643 + 0,00534 \cdot 5146 - 0,0183 \cdot 300$$

$$k_w = 27,16 \text{ [E/km/pas]}$$

Wynik oznacza kategorię **PSR E**.

Włączenie

Q_{hr}	Q_{ha}	k_{15}	p_c	E_c	f_p	f_{zd}	l_w	w
1400	2546	0,9	0,1	1,5	1,0	1,0	300 m	3,6 m

$$p_w = 0,5775 + 0,000092 \cdot l_w = 0,5775 + 0,000092 \cdot 300 = 0,6051$$

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot (1,5 - 1)} = 0,95$$

$$Q_a = \frac{Q_{ha}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{2546}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 2978$$

$$Q_r = \frac{Q_{hr}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{1400}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1637$$

$$Q_{12} = Q_a \cdot p_w = 2978 \cdot 1,0 = 2978 \frac{E}{h}$$

$$Q_{aw} = Q_a + Q_r = 2978 + 1637 = 4615 \frac{E}{h} > 4400 \frac{E}{h}$$

$$Q_{r12} = Q_r + Q_{12} = 1637 + 2978 = 4615 \frac{E}{h} > 4400 \frac{E}{h}$$

Ruch będzie odbywał się z zakłóceniami.

$$k_w = 3,403 + 0,00456 \cdot Q_r + 0,00485 \cdot Q_{12} - 0,0128 \cdot l_w$$

$$k_w = 3,403 + 0,00456 \cdot 1637 + 0,00485 \cdot 2978 - 0,0128 \cdot 300$$

$$k_w = 21,47 \text{ [E/km/pas]}$$

Wynik oznacza kategorię **PSR D**.

Powyższa iteracja obliczeń wykazała, że ruch na łącznicy będzie odbywał się z zakłóceniami i w obrębie pasa włączenia i wyłączenia.

Rozwiązaniem zakłóceń ruchu w obszarze wyłączenia będzie cofnięcie początku pasa wyłączeń dla istniejącej łącznicy z SR 826 na I-95 w kierunku południowym o 150 metrów. Pozwoli to na wydzielenie pasa wyłączeń nowoprojektowanej łącznicy (na I-95 w kierunku północnym) z jezdni o natężeniu mniejszym o natężenie ruchu pojazdów z łącznicy na I-95 w kierunku południowym.

W celu cofnięcia początku pasa wyłączeń istniejącej łącznicy zaplanowano ingerencję w stan istniejący drogi (fot. 2).

Wjazd na SR 826 w kierunku wschodnim z drogi nr 167 odbywać będzie się w sposób pokazany na fotografii 3.

Wyłączenie

Q_{hr}	Q_{ha}	k_{15}	p_c	E_c	f_p	f_{zd}	l_w	w
1400	4808	0,9	0,1	1,5	1,0	1,0	200 m	3,6 m

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot (1,5 - 1)} = 0,95$$

Fot. 2. Usuwana łącznica z drogi serwisowej nr 167 na obwodnicę SR 826.
Źródło: własne



Fot. 3. Planowana trasa wjazdu na SR 826 po zamknięciu łącznicy.
Źródło: własne



$$Q_a = \frac{Q_{ha}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{4808}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 5623$$

$$Q_r = \frac{Q_{hr}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{1400}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1637$$

$$p_z = 0,760 - 0,000025 \cdot Q_a - 0,000046 \cdot Q_r =$$

$$= 0,760 - 0,000025 \cdot 5623 - 0,000046 \cdot 1637$$

$$p_z = 0,544$$

$$Q_{12} = Q_r + (Q_a - Q_r) \cdot p_z = 1637 + (5623 - 1637) \cdot 0,544 =$$

$$= 3805 \frac{E}{h} < 4400 \frac{E}{h}$$

Ruch będzie odbywał się bez zakłóceń.

Gęstość ruchu

$$k_w = 2,643 + 0,00534 \cdot Q_{12} - 0,0183 \cdot l_z =$$

$$= 2,643 + 0,00534 \cdot 3805 - 0,0183 \cdot 200$$

$$k_w = 19,30 \text{ [E/km/pas]}$$

Wynik oznacza kategorię **PSR D**.

Rozwiązaniem zakłóceń ruchu w obszarze włączenia będzie przedłużenie łącznicy z SR 826 na I-95 w sposób pokazany na fotografii 4.

Połączenie z istniejącą łącznicą będzie realizowane przeplataniem na odcinku o długości 300 m. W związku z tym konieczna będzie analiza obszaru przeplatania. Obliczenie przepustowości obszaru włączenia łącznicy w tym wypad-



Fot. 4. Planowany przebieg łącznicy z SR 826 na I-95.
Źródło: własne

ku nie będzie konieczne, ponieważ łącznica kontynuowana jest na trasie I-95 jako samodzielny dodatkowy czwarty pas. Tego rodzaju analiza przekracza zakres niniejszego opracowania.

Obszar przeplatania

Obliczanie obszaru przeplatania wykonywane jest w 7 punktach:

- określenie danych ruchowych i geometrycznych,
- obliczenie wartości natężeń Q_{15} ,
- sporządzenie diagramu przeplatania,
- obliczenie prędkości w warunkach przeplatania niewymuszonego i prędkości potoków nieprzeplatających się,
- sprawdzenie pracy obszaru przeplatania w warunkach wymuszonych,
- sprawdzenie wartości parametrów ruchu w obszarze przeplatania:

Q_{p1} – natężenie większego z przeplatających się potoków,

Q_{p2} – natężenie mniejszego z przeplatających się potoków,

Q_p – łączne natężenie przeplatających się potoków,

Q – łączne natężenie ruchu w obszarze przeplatania,

$\frac{Q_p}{Q}$ – wskaźnik natężeń,

$\frac{Q_{p2}}{Q_p}$ – wskaźnik przeplatania,

l_p – długość odcinka przeplatania,

n – liczba pasów ruchu.

Określenie danych ruchowych i geometrycznych

$$Q_{ac} = 1400$$

$$Q_{ad} = 30$$

$$Q_{bc} = 328$$

$$Q_{bd} = 969$$

Wartości Q_{bc} i Q_{ad} zostały zaczerpnięte z dokumentu Golden Glades Interchange Raport (FDOT, 2014b)

$$k_{15} = 0,9$$

$$p_c = 0,1$$

$$E_c = 1,5$$

$$f_p = 1,0$$

$$f_{zd} = 1,0$$

$$l_p = 300 \text{ m}$$

$$w = 3,6 \text{ m}$$

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot (1,5 - 1)} = 0,95$$

Obliczenie wartości natężeń

$$Q_{15,ac} = \frac{Q_{ac}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{1400}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1637 \frac{E}{h}$$

$$Q_{15,ad} = \frac{Q_{ad}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{30}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 35 \frac{E}{h}$$

$$Q_{15,bc} = \frac{Q_{bc}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{328}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 383 \frac{E}{h}$$

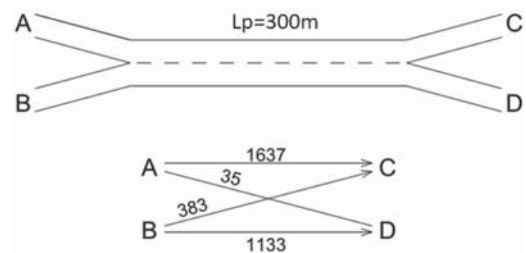
$$Q_{15,bd} = \frac{Q_{bd}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{969}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1133 \frac{E}{h}$$

$$Q_p = Q_{15,ad} + Q_{15,bc} = 35 + 383 = 418 \frac{E}{h}$$

$$Q = Q_p + Q_{15,ac} + Q_{15,bd} = 418 + 1637 + 1133 = 3188 \frac{E}{h}$$

$$\frac{Q_p}{Q} = \frac{418}{3188} = 0,13$$

$$\frac{Q_{p2}}{Q_p} = \frac{35}{418} = 0,08$$



Rys. 2. Diagram przeplatania. Źródło: własne

Obliczenie prędkości w warunkach przeplatania niewymuszonego i prędkości potoków nieprzeplatających się

Prędkości obliczane są na podstawie wzoru

$$V_w, V_n = 24 + \frac{80}{1 + a \cdot \left(1 + \frac{Q_p}{Q}\right)^b \cdot \frac{\left(\frac{Q}{n}\right)^c}{(3,3 \cdot l_p)^d}} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$$

w którym:

V_w, V_n – prędkość pojazdów przeplatających się i pojazdów nieprzeplatających się,

a,b,c,d – stałe zależne od typu ukształtowania obszaru przeplatania, które opisuje tabela 19.

$$V_w = 24 + \frac{80}{1 + 0,226 \cdot (1 + 0,13)^{2,2} \cdot \frac{\left(\frac{3188}{2}\right)^1}{(3,3 \cdot 300)^{0,9}}} = 65,0 \text{ km/h}$$

$$V_n = 24 + \frac{80}{1 + 0,02 \cdot (1 + 0,13)^4 \cdot \frac{\left(\frac{3188}{2}\right)^{1,3}}{(3,3 \cdot 300)^1}} = 74,7 \text{ km/h}$$

W tym przypadku występuje przeplatanie typu A – to znaczy, że każdy z przeplatających się pojazdów zmienia jeden pas ruchu.

Tabela 15. Wartości stałych a, b, c, d do wyznaczenia prędkości pojazdów w obszarze przeplatania

Typ ukształtowania	Stałe dla prędkości V_w				Stałe dla prędkości V_n			
	a	b	c	d	a	b	c	d
Typ A – ruch:								
– niewymuszony	0,226	2,2	1,00	0,90	0,020	4,0	1,3	1,00
– wymuszony	0,280	2,2	1,00	0,90	0,020	4,0	0,88	0,60
Typ B – ruch:								
– niewymuszony	0,100	1,2	0,77	0,50	0,020	2,0	1,42	0,95
– wymuszony	0,160	1,2	0,77	0,50	0,015	2,0	1,30	0,90
Typ C – ruch:								
– niewymuszony	0,100	1,8	0,80	0,50	0,015	1,8	1,10	0,50
– wymuszony	0,100	2,0	0,85	0,50	0,013	1,6	1,00	0,50

Źródło: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995.

Sprawdzenie pracy obszaru przeplatania w warunkach wymuszonych

Sprawdzenie to polega na porównaniu liczby pasów niezbędnych przeplatającym się pojazdom do ruchu w warunkach niewymuszonych (n_p) oraz maksymalnej liczby pasów dostępnych dla pojazdów przeplatających się w danym ukształtowaniu obszaru przeplatania (n_{pmax}).

Tabela 16. Obliczanie pasów ruchu n_p i n_{pmax}

Typ ukształtowania	n_p	n_{pmax}
A	$1,21 \cdot n \cdot (Q_p / Q)^{0,517} \cdot I_p^{0,234} / V_w^{0,438}$	1,4
B	$n \cdot [0,085 + 0,703 \cdot (Q_p / Q) + (71,6 / I_p - 0,011(V_n - V_w))]$	3,5
C	$n \cdot [0,761 - 0,00371 \cdot I_p - 0,00313 \cdot (V_n - V_w) + 0,047 Q_p / Q]$	3,0

Źródło: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995.

$$n_p = 1,21 \cdot n \cdot \left(\frac{Q_p}{Q}\right)^{0,517} \cdot \frac{I_p^{0,234}}{V_w^{0,438}} =$$

$$= 1,21 \cdot 2 \cdot (0,13)^{0,517} \cdot \frac{300^{0,234}}{65,0^{0,438}} = 0,46 < 1,4 = n_{pmax}$$

Ruch będzie odbywał się w sposób niewymuszony.

Sprawdzenie wartości parametrów ruchu w obszarze przeplatania

$$Q_p = 418 < 1800$$

$$\frac{Q}{n} = \frac{3188}{2} = 1594 < 1900$$

$$\frac{Q_p}{Q} = \frac{418}{3188} = 0,13 < 1$$

$$\frac{Q_{p2}}{Q_p} = \frac{35}{418} = 0,08 < 0,5$$

$$l_p = 300 < 600$$

Ruch będzie odbywał się bez zakłóceń.

Tabela 17. Graniczne wartości parametrów przeplatania

Typ ukształtowania	Maksymalne				
	natężenie przeplatania Q_p [E/h]	Q/n [E/h/pas]	Q_p/Q [-]	Q_{p2}/Q_p [-]	l_p [m]
Typ A	1800	1900	dla:	0,50	600
			2 ¹⁾ → 1,00		
			3 → 0,45		
			4 → 0,35		
			5 → 0,22		
Typ B	3000	1900	0,80	0,50	750
Typ C	3000	1900	0,50	0,40	750

¹⁾ Całkowita liczba pasów w obszarze przeplatania

Źródło: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995

Poziom swobody ruchu

W tabeli 18 przedstawiono minimalne wartości średniej prędkości pojazdów w obszarze przeplatania pozwalających określić PSR. W przypadku prędkości wynoszących odpowiednio:

$$V_w = 65,0 \text{ km/h}$$

$$V_n = 74,7 \text{ km/h}$$

Poziom swobody ruchu będzie kategorii D.

Tabela 18. Minimalna średnia prędkość pojazdów przeplatających się

Poziom swobody ruchu	Minimalna średnia prędkość pojazdów przeplatających się	
	V_w [km/h]	V_n [km/h]
A	88	97
B	80	87
C	72	77
D	64	68
E	56/48 ¹⁾	56/48 ¹⁾
F	< 56/48 ¹⁾	< 56/48 ¹⁾

¹⁾ Górna wartość dotyczy prędkości obliczonej teoretycznej, dolna prędkość pomierzonej na analizowanej drodze.

Źródło: Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1995.

➤ Łącznica z I-95 na SR 826

Wyłączenie

Q_{hr}	Q_{ha}	k_{15}	p_c	E_c	f_p	f_{zd}	l_w	w	p_z
864	2218	0,9	0,1	1,5	1,0	1,0	180 m	3,6 m	1,0

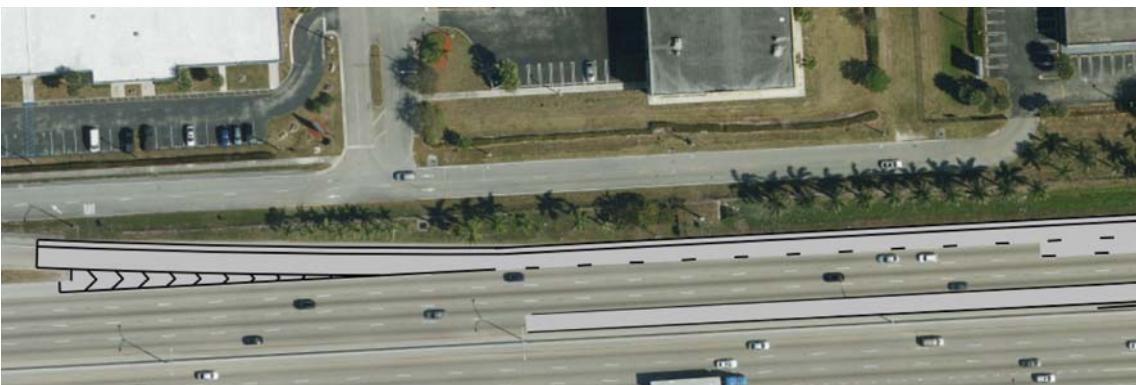
Fot. 5. Schemat przebiegu łącznicy z I-95 na SR 826.
Źródło: własne



a)



b)



Fot. 6a, 6b. Zmiana w obszarze włączenia łącznicy z I-95 na SR 826.
Źródło: własne

$$f_c = \frac{1}{1 + p_c \cdot (E_c - 1)} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot (1,5 - 1)} = 0,95$$

$$Q_a = \frac{Q_{ha}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{2218}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 2594$$

$$Q_r = \frac{Q_{hr}}{k_{15} \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{zd}} = \frac{864}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 1011$$

$$Q_{12} = Q_r + (Q_a - Q_r) \cdot p_z = 1011 + (2594 - 1011) \cdot 1,0 = 2594 \frac{E}{h} < 4400 \frac{E}{h}$$

Ruch będzie odbywał się bez zakłóceń.

Gęstość ruchu

$$k_w = 2,643 + 0,00534 \cdot Q_{12} - 0,0183 \cdot I_z = 2,643 + 0,00534 \cdot 2594 - 0,0183 \cdot 250$$

$$k_w = 11,92 \text{ [E/km/pas]}$$

Wynik oznacza kategorię **PSR B**.

Włączenie

Biorąc pod uwagę rozmiar artykułu obszar włączenia został pominięty w obliczeniach. Ze względu na stan istniejący trasy SR 826 zdecydowano o zakończeniu skrajnego lewego pasa ruchu w obszarze włączenia łącznicy z drogi I-95. Zwężenie to widoczne jest na fot. 6a i 6b. Aby zniwelować wpływ zakończenia skrajnie lewego pasa ruchu, droga zostanie w obszarze włączenia poszerzona o dodatkowy pas ruchu z prawej strony. Po włączeniu łącznicy z I-95 droga SR 826 powróci do trasy ze stanu istniejącego.

Podobnie obszar przeplatania został pominięty w obliczeniach ze względu na podobieństwo do stanu istniejącego.

Bibliografia

[1] AASHTO. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets*. Washington: AASHTO.

- [2] Barlow, T. (2014). Most deadly times, places to drive. *Walletpop.com*.
- [3] FDOT. (2014a). *Golden Glades Interchange Preliminary Engineering Report*. Miami: FDOT.
- [4] FDOT. (2014b). *Golden Glades Interchange Modification Report*. Miami: FDOT.
- [5] FDOT. (2017, Lipiec 1). FY 2017-18 Design Standards. Miami, Florida, USA.
- [6] FDOT. (2019). *fdot.gov*. Pobrano z lokalizacji FDOT - Design Manual: <https://www.fdot.gov/roadway/fdm/default.shtm>
- [7] Federal Highway Administration. (2016). Public Road Length. *Office of Highway Policy Information*, Table HM-20.
- [8] *Federal Highway Administration*. (2017, Czerwiec 6). Pobrano z lokalizacji Planning Processes: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/section03.cfm
- [9] FHWA. (2000, Listopad). *Safety FHWA*. Pobrano z lokalizacji Road Function Classification : https://safety.fhwa.dot.gov/speedmgt/data_facts/docs/rd_func_class_1_42.pdf
- [10] FHWA. (2019a, Czerwiec 3). *Federal Highway Administration*. Pobrano z lokalizacji Guidance on NHS Design Standards and Design Exceptions : <https://www.fhwa.dot.gov/design/standards/qa.cfm>
- [11] FHWA. (2019b, Sierpień 20). *Federal Highway Administration*. Pobrano z lokalizacji Design: <https://www.fhwa.dot.gov/programadmin/standards.cfm>
- [12] GDDKiA. (2013). *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Gdańsk.
- [13] Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. (1995). *Instrukcja obliczenia przepustowości dróg I i II klasy technicznej (autostrady i drogi ekspresowe)*. Warszawa.
- [14] Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. (2002). *Komentarz do warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Część II: Zagadnienia techniczne*. Warszawa.
- [15] Griffin, R. (2018). No Thanks to New Jersey, I-95 Is Finally Done 60 Years Later. *Bloomberg*.
- [16] Krystek, R. (2008). *Węzły drogowe i autostradowe*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [17] Oswald, J. (1964). All Links Open: Golden Glades Traffic Flows. *The Miami News*, B1.
- [18] Road Traffic Technology. (2014, Styczeń 12). *Road Traffic Technology*. Pobrano z lokalizacji The world's biggest road networks: <https://www.roadtraffic-technology.com/features/feature-the-worlds-biggest-road-networks-4159235/>
- [19] Turnbell, M. (2009). Palmetto Expressway to I-95 Link Too Costly. *South Florida Sun Sentinel*.
- [20] WT. (1999). *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2021 roku

prenumerata roczna normalna 259 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 21,60 zł }

prenumerata roczna studencka 129 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 10,80 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

38 1160 2202 0000 0000 2741 3872

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Zarząd Krajowy
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

Redakcja