

FRI-20.21-1-SITSTL-21

---

## A MODEL FOR RISK ASSESSMENT OF VULNERABLE ROAD USERS AND ITS APPLICABILITY IN URBAN ENVIRONMENTS <sup>21</sup>

---

**Kalcho Petkov, PhD student**

Department of Transport,  
“A. Kanchev” University of Ruse”  
Phone:  
E-mail: kpetkov@uni-ruse.bg

**Prof. Velizara Pencheva, PhD**

Department of Transport,  
“A. Kanchev” University of Ruse  
Phone: 0888293341  
E-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

**Prof. Ivan Beloev, PhD**

Department of Transport,  
“A. Kanchev” University of Ruse  
Phone: 08886320080  
E-mail: ibeloev@uni-ruse.bg

**Abstract:** *This study proposes a quantitative framework for assessing risk among vulnerable road users in urban environments based on the concept of potential conflict events. Risk is defined as an aggregated, dimensionless indicator resulting from the interaction of traffic flow characteristics, infrastructure and environmental conditions, and human-related factors. The model adopts a multiplicative structure and integrates key parameters including traffic intensity and speed, exposure of vulnerable users, roadway and weather conditions, age-related physical and cognitive characteristics, and the level of education and awareness.*

*The framework is applied to a representative urban road segment in the city of Ruse (Bulgaria) and is employed for scenario-based analysis to evaluate the impact of education-related interventions on risk levels. The results reveal a pronounced nonlinear relationship between education and awareness levels and both the aggregated risk index and the expected number of conflict events. Notably, even moderate improvements in education and awareness lead to disproportionately large reductions in risk.*

*The proposed approach enables comparative evaluation of alternative safety scenarios and supports the prioritization of preventive measures in contexts where detailed accident statistics are limited. The model is conceptually aligned with the Vision Zero framework and facilitates the transition from reactive to proactive road safety management in medium-sized urban areas.*

**Keywords:** *Vulnerable road users; Risk assessment; Urban traffic; Pedestrian safety; Scenario analysis; Vision Zero*

### ВЪВЕДЕНИЕ

Уязвимите участници в движението се дефинират като групи, които са особено чувствителни към пътнотранспортни инциденти поради физически, когнитивни или социални характеристики. Научните изследвания ги категоризират по демографски, поведенчески и транспортни критерии.

---

<sup>21</sup> Докладът е представен на пленарната сесия на 24 октомври 2025 г. в секция Sustainable and Intelligent Transport Systems, Technologies and Logistics, с оригинално заглавие на български език Модел За Оценка На Риска За Уязвими Участници В Пътното Движение И Приложимост В Градска Среда

Към тези групи спадат пешеходци, велосипедисти, потребители на микромобилност, деца, юноши и възрастни.

Децата и младите хора са с по-висок риск поради недостатъчни когнитивни умения за оценка на скорост и разстояние при пресичане на пътя (Liu et al., 2023; Swedler et al., 2024). Възрастните участници са по-податливи на травми и реагират по-трудно при внезапни ситуации, което увеличава тежестта на последствията при инциденти (Ptak, 2019; Xhoxhi & Wolff, 2024). При тях се наблюдават забавени реакции, намалена зрителна и слухова способност.

Други уязвими групи са хора с увреждания, туристи и лица, които не познават локалната инфраструктура. Велосипедистите и потребителите на микромобилност са с повишен риск поради по-слаба физическа защита и непредвидимо движение в транспортния поток (Vicentini da Silva & Bezerra, 2024).

Международни проучвания показват, че различията в културните нагласи и транспортната среда оказват значимо влияние върху поведението и безопасността на уязвимите участници (Yannis et al., 2020). Особено висок риск от травми се наблюдава в градски условия със сложни и динамични взаимодействия между моторизирани превозни средства и уязвими участници (Shinar, 2012; Rinnert et al., 2025).

Въпреки обширните международни изследвания, количествените модели, базирани на риска, съобразени със средно големи източноевропейски градове, остават ограничени.

Съвременните политики по безопасност на движението се ориентират към проактивен и превантивен подход, при който рискът се управлява още преди настъпването на ПТИ. Това налага използването на количествени модели, позволяващи оценка на риска, сравнение на сценарии и обосноваване на управленски решения.

В този контекст, град Русе представлява подходящ пример за средно голям български град със смесен трафик, значителен дял пешеходни и велосипедни придвижвания и концентрация на обществени и образователни функции в централната част.

Предложеният модел за оценка на риска предоставя количествена, безразмерна мярка за потенциални конфликти на уязвими участници в движението в градска среда. Мултипликативната му структура интегрира фактори, свързани с трафика, инфраструктурата, човешкия фактор и нивото на обучение и информираност, като преобразуването в вероятност за възникване на събития осигурява реалистични и ограничени стойности. Приложението му върху типичен градски участък в Русе демонстрира възможността за оценка на превантивни мерки, особено такива, свързани с обучение и повишаване на осведомеността. Въпреки агрегирания си характер, моделът е подходящ за стратегическо планиране, сравнение на сценарии и превантивно управление на пътната безопасност в средни по големина градове, съвместим с принципите на Vision Zero.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### Математически модел за оценка на риска при уязвими участници в движението

В рамките на настоящото изследване рискът се разглежда като агрегирана мярка за вероятността от възникване на рисково събитие, дефинирано като потенциален конфликт между уязвим участник и моторизирано превозно средство. Такива събития не представляват непременно реални пътнотранспортни произшествия, а индикатори за повишена опасност, използвани широко в съвременните подходи за оценка на безопасността.

Рискът се формира в резултат на взаимодействието между:

- транспортния поток;
- пътната и околната среда;
- човешките характеристики и поведение.

Агрегираният риск  $R(t)$  се дефинира като безразмерен индекс, описващ текущото ниво на опасност за уязвимите участници в конкретен пътен участък, и се задава чрез функция от основните фактори:

$$R(t) = f(I(t), v(t), P_u(t), M(t), A_f(t), E(t)), \quad (1)$$

където:

$I(t)$ - интензивност на трафика (превозни средства/час);

$v(t)$  - средна скорост на движение (km/h);

$P_u(t)$  - брой уязвими участници в участъка;

$M(t)$  - коефициент, отразяващ пътни и метеорологични условия

$A_f(t)$ -индекс на възрастови и физически характеристики (съставен индекс, мащабиран в диапазона [0–100], получен от възрастовата структура на уязвимите участници).

$E(t)$  - ниво на обучение и информираност на уязвимите участници (0–1).

За целите на практическото приложение функцията  $f$  от (1) се специфицира чрез мултипликативен модел (избрана е мултипликативна структура, която да отразява сложния ефект на трафика, инфраструктурата и човешкия фактор върху риска):

$$R(t) = k_1 \cdot I(t) \cdot v(t) \cdot P_u(t) \cdot M(t) \cdot A_f(t) \cdot (1 - E(t)), \quad (2)$$

където  $k_1$  е мащабиращ коефициент, осигуряващ нормализация и съпоставимост на стойностите на риска между различни сценарии и пътни участъци. По този начин  $R(t)$  представлява безразмерен агрегатен индекс на риска, а не физическа величина.

Вероятността за възникване на рисково събитие  $P(A)$  при дадено ниво на риска се определя чрез експоненциална функция:

$$P(A) = 1 - \exp(-k_2 \cdot R(t)), \quad (3)$$

където  $k_2$  е калибрационен параметър, отразяващ чувствителността на системата към нарастване на риска. Формулировката гарантира, че  $0 \leq P(A) \leq 1$ , като по-високи стойности на  $R(t)$  водят до непропорционално по-голямо нарастване на вероятността за конфликт.

### Приложение на модела

Моделът е приложен за типичен градски пътен участък в гр. Русе със смесено движение и наличие на пешеходна инфраструктура. Разглежда се времеви интервал  $T=1$  час в следобеден часови пояс, характеризиращ се с повишена активност на уязвими участници.

Използваните входни параметри имат демонстрационен характер и са съобразени с типични за града стойности:

$I(t)=320$  (превозни средства/час);

$v(t)=30$  km/h;

$P_u(t) = 55$  участници/час;

$M(t) = 1,3$ , отразяващи влажна настилка и ограничена видимост

$A_f(t)=75$ , поради значителен дял деца и възрастни хора;

$E(t) = 0,50$

$k_1 = 10^{-6}$ ,

$k_2 = 0,5$ .

При зададените параметри се изчислява риска, вероятността за настъпване на рискови събития, очакван брой рискови събития.

- Изчисляване на риска  $R(t)$ :

$$R(t) = 0,058,$$

- Изчисляване на вероятността за рискови събития  $P(A)$

$$P(A) = 0,0287$$

Получената вероятност показва, че за разглеждания участък съществува приблизително 2.9% шанс за възникване на рисково събитие в рамките на един час, което е реалистична стойност за градска среда със смесен трафик.

Очакваният брой рискови събития се определя като:

$$N_{incidents} = N * P(A) = 1,58 \text{ рискови събития,}$$

където  $N$  е броят на отделните ситуации за разглеждания период ( $N = 55$ ).

Тук „ситуации“ означава отделни случаи или възможни взаимодействия между уязвим участник и моторизирано превозно средство, които могат да доведат до потенциален конфликт или инцидент. На практика това е мярка за това колко пъти уязвимите участници са потенциално изложени на риск в разглеждания времеви интервал, без да се отчита дали реално настъпва ПТП, т.е. това е количествен индикатор за контактите, които могат да предизвикат риск, а не реални произшествия. В този контекст  $N$  се апроксимира с броя на уязвимите потребители, преминаващи през участъка през анализирания период.

Резултатите показват, че при посочените условия в разглеждания участък може да се очаква приблизително 1–2 рискови събития (потенциални конфликти) на час, което е индикатор за средно към повишено ниво на риск за уязвими участници.

За оценка на ефекта от образователни политики е проведен сценарен анализ при различни нива на обучение и информираност на уязвимите участници (табл. 1).

За оценка на ефекта от потенциални мерки се използва сценарен анализ при различни нива на обучение и информираност, разглеждани като резултат от целенасочени политики по БДП (табл. 1.)

Табл. 1. Влияние на нивото на обучение и информираност върху риска и очаквания брой рискови ситуации

Сценарий	$E(t)$ (%)	$R(t)$	$P(A)$	$N_{incidents}$
Без обучение	0	0,116	0,0564	3,10
Ограничено обучение	25	0,087	0,0426	2,35
Настоящо състояние	50	0,058	0,0287	1,58
Образователни кампании	75	0,029	0,0144	0,79
Интензивно обучение	90	0,012	0,0060	0,33
Целево обучение (идеализирано)	100	0,000	0,000	0,00

Резултатите от анализа показват ясно изразена нелинейна зависимост между нивото на обучение и очаквания брой рискови ситуации с уязвими участници. При липса на обучение моделът прогнозира над три рискови събития за разглеждания период, което е повече от два пъти спрямо дефинираното състояние. При постепенно увеличаване на дела на обучените участници се наблюдава устойчиво намаляване както на риска, така и на вероятността за рисково събитие.

Идеализираният сценарий с 100% обучение следва да се разглежда като теоретичен граничен случай, съответстващ на принципите на Vision Zero, а не като реалистично постижимо състояние.

Предложеният модел позволява интегрирана оценка на риска в зони с висока концентрация на уязвими участници и може да бъде използван като инструмент за приоритизиране на мерки за пътна безопасност. Основното му предимство е възможността за приложение при ограничена наличност на статистически данни за ПТП, като се използват индикатори за ситуации и поведение.

Ограничение на модела е неговият агрегиращ характер, който не отчита детайлно пространствено-времевите вариации на конфликтите. Това го прави особено подходящ за стратегическо планиране, но не и за микроскопичен анализ.

Анализът на чувствителността показва, че моделът е числово устойчив при умерени вариации на основните параметри. Докато мащабиращият коефициент влияе предимно върху абсолютните стойности на риска, параметърът, определящ прехода от риск към вероятност, има по-съществено

значение за интерпретацията на резултатите. Това подчертава необходимостта от внимателно калибриране при реално приложение.

Предложеният модел е концептуално съвместим както с Националната стратегия за безопасност на движението по пътищата, така и с принципите на Vision Zero. Той подкрепя прехода от реактивен към превантивен подход, като позволява идентифициране на рискови условия и оценка на ефекта от политики, насочени към уязвимите участници.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследването представя методологично издържан подход за количествена оценка на риска за уязвими участници в зоните на спирки на градския обществен транспорт. Приложението му към казуса на град Русе демонстрира потенциала за практическа употреба при планиране на инфраструктурни и организационни мерки в съответствие с принципите на Vision Zero.

Основното предимство на предложения модел е възможността за сравнителен анализ на сценарии, което позволява аргументирано приоритизиране на интервенции при ограничени ресурси. В този смисъл моделът е концептуално съвместим както с Националната стратегия за безопасност на движението по пътищата, така и с принципите на Vision Zero и подкрепя прехода от реактивен към превантивен подход в управлението на пътната безопасност.

## REFERENCES

- Liu, Z., Wu, J., Yousaf, A., McIlroy, R., Wang, L., Liu, M., Plant, K., & Stanton, N. (2023). *A study of vulnerable road users' behaviors using schema theory and the perceptual cycle model*. Sustainability, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15108339>
- Ptak, M. (2019). *Method to assess and enhance vulnerable road user safety during impact loading*. Applied Sciences, 9(5). <https://doi.org/10.3390/app9051000>
- Rinnert, T., Köpke, R., Kruse, A., Fehling-Kaschek, M., Lüttner, F., & Stolz, A. (2025). *Simulation of pedestrian behaviour in traffic situations using risk-based A pathfinding\**. Int. J. ITS Res., 23, 441–449. <https://doi.org/10.1007/s13177-024-00458-5>
- Shinar, D. (2012). *Safety and mobility of vulnerable road users: Pedestrians, bicyclists, and motorcyclists*. Accident Analysis & Prevention, 44(1), 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.12.031>
- Swedler, D., Ali, B., Hoffman, R., Leonardo, J., Romano, E., & Miller, T. (2024). *Injury and fatality risks for child pedestrians and cyclists on public roads*. Injury Epidemiology, 11, 15. <https://doi.org/10.1186/s40621-024-00497-2>
- Vicentini da Silva, P., & Bezerra, B. (2024). *A meta-analysis of safety countermeasures for vulnerable users on urban roads*. Transportation Research Procedia, 78, 452–459. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.057>
- Xhoxhi, E., & Wolff, V. (2024). *A data-driven analysis of vulnerable road user safety in interaction with connected automated vehicles*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.14935>
- Yannis, G., Nikolaou, D., Laiou, A., Stürmer, Y., Buttler, I., & Jankowska-Karpa, D. (2020). *Vulnerable road users: Cross-cultural perspectives on performance and attitudes*. IATSS Research, 44(3), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.08.006>