

FRI-20.21-1-SITSTL-17

INTEGRATED MODEL FOR ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF MEASURES TO REDUCE HARMFUL EMISSIONS FROM ROAD TRANSPORT ¹⁷

Assistant Svetoslav Babanov

Department of Machine Science, Machine Elements, Engineering Graphics and Physics,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: 082 888 592
E-mail: snbabanov@uni-ruse.bg

Prof. Velizara Pencheva, PhD

Department of Transport
Phone: 082888377
E-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Ivan Georgiev, PhD

Department of Applied Mathematics and Statistics
University of Ruse “Angel Kanchev”
Phone: 082888424
E-mail: irgeorgiev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Vyarka Ronkova, PhD

Department of Machine Science, Machine Elements, Engineering Graphics and Physics,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: 082 888 461
E-mail: vronkova@uni-ruse.bg

***Abstract:** This paper presents a dynamic two-stage model for assessing the effectiveness of measures to reduce harmful emissions from road transport in urban environments. The study presents the two stages of the model: the first, shortterm monitoring with daily data on pollutant concentrations, and the second, longterm analysis to assess lasting results and take global measures, if necessary. The model allows for the simulation of different scenarios, optimization of the transport infrastructure and evaluation of the implemented interventions. In conclusion, the model supports strategic decisionmaking for sustainable urban development, adaptation and improvement of measures to improve ambient air quality.*

***Keywords:** Dynamic Two-Stage Model; Harmful Emissions; Air Quality; Sustainable Urban Development; Road Transport.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Ускорената урбанизация и интензифицираният автомобилен транспортен поток в съвременните градове пораждаат сериозни предизвикателства по отношение на качеството на атмосферния въздух и общественото здраве. Автомобилният транспорт се определя като основен източник на емисии на вредни вещества, включително фини прахови частици (PM_{2.5} и PM₁₀), азотни оксиди (NO_x), озон (O₃) и серни съединения (SO_x) (Giunta, M., 2020, ЕЕА, 2019). Тези замърсители имат доказано отрицателно въздействие върху човешкото здраве, допринасят за климатични промени и водят до значителни икономически загуби вследствие на повишена заболяемост и деградация на околната среда (Cropper, M.L., Suri, P., 2023).

Сегашните институционални и нормативни механизми, свързани с управлението на качеството на въздуха, се характеризират с ограничена ефективност и липса на реален контрол

¹⁷ 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: Интегриран Модел За Оценка И Управление На Мерки За Намаляване На Вредните Емисии От Пътния Транспорт

върху прилагането им (Calatayud, V and all, 2023, Zhong, H. and all., 2024). Основен недостатък е липсата на достатъчно интегрирано отчитане на комплексната и динамична природа на замърсяването – в частност влиянието на транспортната натовареност, метеорологичните условия и ефективността на прилаганите екологични мерки.

Настоящото изследване си поставя за цел да разработи динамичен и интегриран модел за оценка на ефективността на мерки, насочени към ограничаване на негативното въздействие на автомобилния транспорт върху качеството на атмосферния въздух в градска среда. Моделът обединява краткосрочен мониторинг на емисиите със стратегически, дългосрочен анализ на ефекта от предприетите мерки. Въз основа на това се създава основа за информирано и адаптивно управление на градската екологична политика.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Разработване на динамичен модел за оценка на устойчивостта на транспортни политики

Необходимостта от прилагане на систематичен, интегриран и научно обоснован подход при оценката на ефективността на мерките за ограничаване на негативното въздействие на автомобилния транспорт върху качеството на атмосферния въздух в градска среда налага разработването на многостепен динамичен модел. Състои се от няколко етапа всеки, от който се фокусира върху различен аспект от процеса, като заедно те осигуряват цялостен анализ и прогноза. Първият етап акцентира върху краткосрочното проследяване на текущите нива на замърсяване, а вторият обхваща дългосрочен статистически анализ на въздействието и устойчивостта на приложените мерки.

Динамичният модел предоставя възможността за по-ефективно прогнозиране на ефективността на мерките за намаляване на вредните емисии в реално време.

Моделът осигурява научно обоснована основа за вземане на решения относно бъдещите стъпки за намаляване на замърсяването и за ефективно управление на ресурсите. Моделът е важен инструмент за мониторинг и оценка на напредъка на вече предприетите мерки.

Възможност за интегриране на нови източници на информация в реално време, позволява бързо адаптиране на прогнозите и управляваните решения. Гъвкавостта и адаптивността на този подход са ключови, тъй като условията в градската среда са динамични и подлежат на постоянни промени.

Двуетапният модел осигурява:

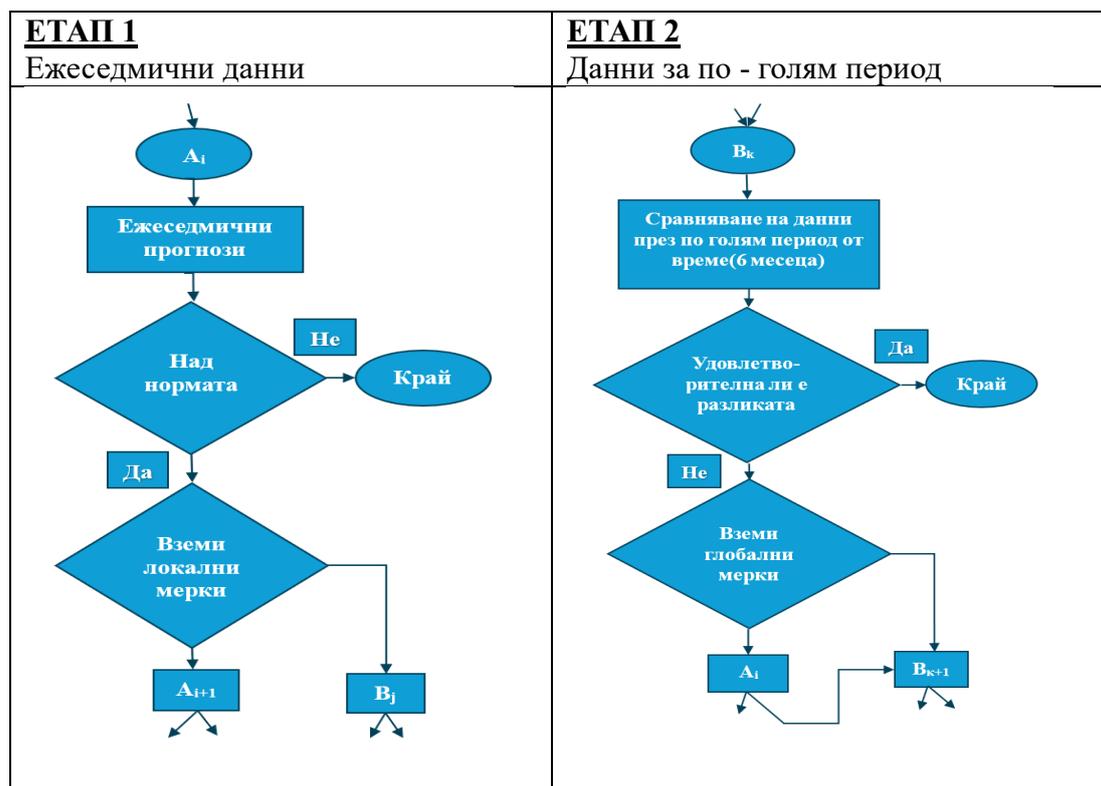
1. Последователност на модела - последователна и строго дефинирана методология за анализ, започвайки с обективна оценка на настоящото състояние и разширявайки се в средносрочен времеви хоризонт от шест месеца;

2. Гъвкавост и адаптивност - моделът позволява регулярно актуализиране на входните данни и динамична корекция на стратегиите в хода на прилагане на дадените мерки;

3. Итеративен процес - всеки цикъл завършва с аналитична оценка на междинните резултати. След втория етап е предвидена възможност за обратна връзка към изходната фаза, позволяваща преоценка и оптимизация на приложените интервенции въз основа на актуализирани емпирични данни. Тази циклична структура създава механизъм за непрекъснато усъвършенстване, което е критично за дългосрочната ефективност и устойчивост на градските екологични политики в контекста на динамично променяща се среда.

Двуетапната структура на модела осигурява възможност за провеждане на комплексен и детайлизиран анализ на динамиките в градската среда. Този подход представлява критичен компонент за постигане на ефективно управление на качеството на атмосферния въздух и за формулиране на устойчиви стратегически мерки за ограничаване на емисиите от автомобилния транспорт.

Фиг. 1 представлява блок схеми на логическите връзки на двуетапен динамичен модел за оценка на ефективността на взетите мерки за подобряване качеството на атмосферния въздух в градска среда. Тук взетите ежеседмични данни са представени символично с „Аi”, а данните за по големия период са обозначени символично с „Вк“.



Фиг. 1. Двуетапен динамичен модел за оценка на ефективността на мерки

Компонентите на модела са:

• **Етап 1**

В рамките на първия етап се извършва непрекъснат мониторинг на краткосрочните ефекти от приложените локални мерки. Систематично се събират ежеседмични данни относно концентрацията на атмосферни замърсители и интензивността на автомобилния транспортен поток. Това позволява оценка на непосредственото въздействие на интервенциите, които могат да включват управление на транспортния поток, оптимизация на транспортната инфраструктура, стимулиране на електрическата мобилност и други локални инициативи.

• **Етап 2**

На този етап се прави оценка на дългосрочните резултати и предприемане на глобални мерки. Моделът може да бъде използван като стратегически инструмент за прогнозиране и адаптиране на градската транспортна система спрямо бъдещи предизвикателства, свързани с демографски трансформации, технологичен напредък и прилагане на климатични политики. Чрез използване на симулации и сценарийно планиране се създава възможност за идентифициране на най-ефективните подходи за преход към интелигентни, устойчиви и въглеродно неутрални градове. Комбинацията от емисионен анализ, транспортно моделиране и социално-икономически оценки позволява формулирането на дългосрочни стратегии, насочени към намаляване на замърсяването на въздуха и повишаване на качеството на живот в градска среда.

След определен период от време (обикновено шест месеца) се извършва по-задълбочена оценка на ефективността на приложените мерки. В този етап се анализират данни за по-дълъг период, който включва сезонни вариации и други фактори. Целта е да се оцени как локалните мерки са повлияли на общото състояние на атмосферния въздух и дали тези мерки водят до трайни подобрения. В случаите, когато резултатите показват ограничена ефективност на локалните мерки спрямо нормативно установените или стратегически цели, се преминава към прилагане на по-мощни – глобални – политики. Те включват структурни промени в транспортната система, инфраструктурни интервенции и регулаторни механизми с цел устойчиво намаляване на замърсяването на по-голяма територия.

При анализ показващ, че местните мерки не са достатъчни за постигане на устойчиви подобрения, се предприемат по-мощни действия, които обхващат цялостната транспортна политика и инфраструктура. Глобалните мерки, които могат да бъдат предприети включват:

- Регулаторни промени - въвеждане на по-строги екологични стандарти за автомобилите и разширяване на нискоемисионните зони;
- Подобряване на обществения транспорт - увеличаване на броя на екологичните транспортни средства (електробуси, трамваи, тролейбуси);
- Градско планиране и инфраструктурни подобрения - разработване на интелигентни транспортни системи за устойчива мобилност, развитие на велосипедни и пешеходни зони, оптимизация на светофарните системи за подобряване на транспортния поток.

Процесът на оценка и адаптиране на прилаганите мерки следва да бъде обект на регулярна актуализация, чрез извършване на нови измервания и прогнозни оценки след всяка съществена промяна в условията на средата или при въвеждането на нови мерки. Основен акцент в този етап е провеждането на сравнителен анализ между емпиричните данни преди и след прилагането на съответната мярка с цел обективна оценка на нейното въздействие.

Експериментални резултати от прилагането на динамичния модел и сравнителна оценка на мерки за намаляване на емисиите

В тази част са разгледани примерни резултати от прилагането на Двуетапния динамичен модел. Целта на настоящия анализ е да се оцени ефективността на конкретна мярка за намаляване на вредните емисии в даден град.

Първоначално се прилагат по-леки мерки предприети през първия етап на модела. Такива мерки могат да бъдат:

- Информационни и образователни;
- Инфраструктурни промени.

Извършва се ежедневен мониторинг и при положение, че не се установява значимо подобрение в качеството на въздуха след определен период се предприемат по-драстични мерки.

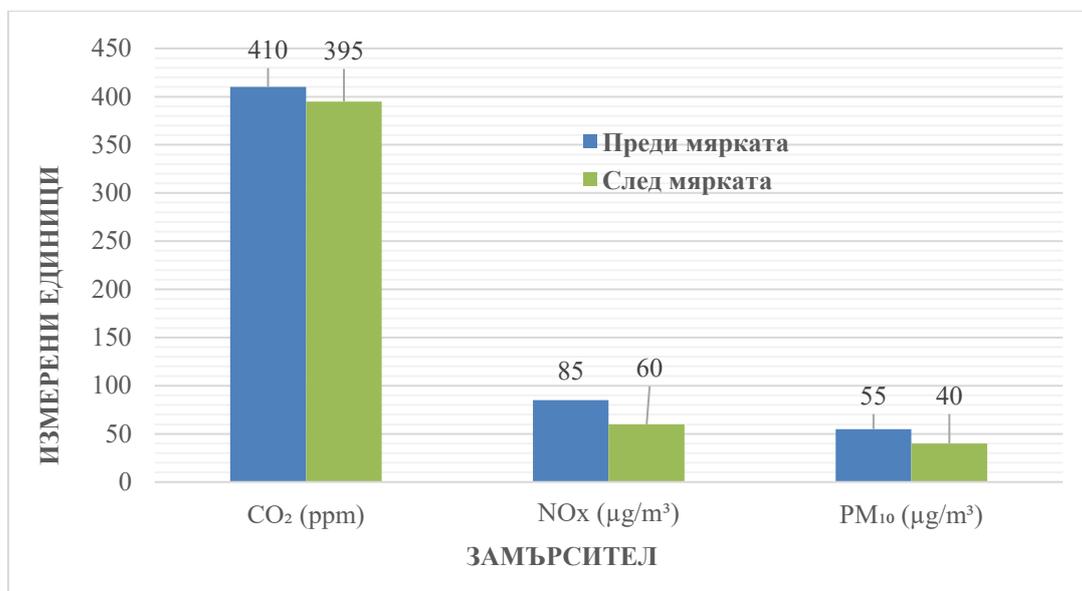
Въвежда се конкретната мярка – електрификация на обществения транспорт. Във втория етап се анализират стойностите на емисиите преди и след прилагането ѝ. Примерните данни се получават от мониторингови станции в определен град и обхващат период от 6 месеца.

В таблица 1 са представени примерни стойности на някои от измерените концентрации на замърсители в атмосферния въздух в примерен град, където е приложен моделът.

Таблица 1. Средни концентрации на замърсители

Замърсител	Преди мярката	След мярката
CO ₂ (ppm)	410	395
NO _x (µg/m ³)	85	60
PM ₁₀ (µg/m ³)	55	40

Резултатите представени в таблица 1 показват приемливо намаляване на емисиите след прилагане на първата мярка - електрификация на обществения транспорт. Сравнителният анализ е представен на Фиг. 1, на която ясно се виждат разликите в концентрациите на емисиите измерени преди и след вземане на конкретна мярка за подобряване на качеството на въздуха.



Фиг. 1. Сравнение на стойностите преди и след прилагането на дадена мярка

Оценката на икономическата ефективност на прилаганите мерки се основава на съотношението между направените инвестиции и постигнатото намаление на емисиите на дадени замърсители. Например, при закупуване на десет електрически автобуса може да доведе до редукция от приблизително 25 µg/m³ азотни оксиди (NO_x) и 15 µg/m³ фини прахови частици (PM₁₀). Подобните количествени анализи са от съществено значение за информирано приоритизиране на бъдещи инвестиции и за стратегическо планиране в контекста на устойчивото управление на транспортния сектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване демонстрира значимостта на прилагането на динамичен, двуетапен модел за оценка на ефективността на мерки, насочени към намаляване на вредното въздействие на автомобилния транспорт върху качеството на атмосферния въздух в градска среда. Моделът съчетава краткосрочен мониторинг с дългосрочен анализ и предлага аналитична рамка за вземане на адаптивни, научно обосновани управленски решения.

Основните изводи от изследването са:

1. Динамичният модел е ефективен инструмент за обективна оценка на въздействието на транспортни и екологични политики, като осигурява структурирана, итеративна рамка за проследяване и оптимизация на предприетите мерки;
2. Електрификацията на обществения транспорт показва сравнително голям потенциал за намаляване на ключови замърсители (NO_x и PM₁₀), като същевременно демонстрира висока икономическа ефективност и възможност за мащабиране чрез допълнителни стимули;
3. Гъвкавостта и адаптивността на модела позволяват навременна реакция при промяна на условията, включително чрез сценарийно планиране, алармени механизми и периодична актуализация на стратегиите спрямо новите емпирични данни;
4. Предложената методология е приложима и трансферируема към други урбанизирани райони и може да се използва като основа за формулиране на дългосрочни политики за устойчиво развитие и климатична неутралност на градската мобилност.

REFERENCES

- Calatayud, V.; Diéguez, J.J.; Agathokleous, E.; Sicard, P. (2023) Machine learning model to predict vehicle electrification impacts on air quality in Valencia (Spain). *Using XGBoost. Environmental Research* 2023, 228, 115835. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115835>.
- Cropper, M.L., Suri, P. (2023). Measuring the air pollution benefits of public transport projects. *Regional Science and Urban Economics* 2023, 107, 103976. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2023.103976>.

Giunta, M. (2020). Assessment of the Impact of CO, NO_x and PM₁₀ on Air Quality during Road Construction and Operation Phases. *Sustainable Management of Transportation Infrastructure Projects*, 2020, 12, 10549. <https://doi.org/10.3390/su122410549>.

European Environment Agency. (2019). Europe's urban air quality – re assessing implementation challenges, EEA Report 2019, <https://www.eea.europa.eu/> (accessed on 18.06.2025).

Zhong, H.; Lu, H.; Gan, T.; Liu, Y.; Zheng, H. (2024). High resolution on road air pollution exposure informed by taxi based mobile monitoring sensors. *Electrical Engineering and Systems Science* 2024, 2412, 17831. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.17831>.