

ФАКТОРИ ЗА ФОРМИРАНЕ НА ПЪТЕН НАНОС В УРБАНИЗИРАНИ ТЕРИТОРИИ

Даниела Тонева*, Ива Василева

Технически университет – Варна, Варна, България
**кореспондиращ автор: dtoneva@abv.bg*

FACTORS FOR THE FORMATION OF ROAD SEDIMENT IN URBAN AREAS

Daniela Toneva*, Iva Vasileva

Technical University of Varna, Varna, Bulgaria
**Corresponding author: dtoneva@abv.bg*

Abstract:

This paper addresses some of the main factors for the formation of road sediment. In the context of urbanization and the increase in road transport in urban areas, possible risks to human health are increasing for a number of reasons, some of which are the content of road sediment. The content of some atmospheric air pollutants, which under the influence of a number of factors can fall into road sediment, is examined.

Keywords: road sediment, road transport, road dust, airborne pollutions, air quality.

ВЪВЕДЕНИЕ

Градската среда се характеризира с висок интензитет на пътен трафик, разнообразни настилки, интензивна човешка дейност и множество импулси на замърсяване, които се комбинират в сложни процеси на акумулация, резуспендиране и отмиване на твърди частици. Една от ключовите категории на тези твърди частици е пътният нанос (*road-deposited sediments, RDS*), който представлява съвкупност от частици, натрупани върху пътната настилка и прилежащите повърхности чрез износване, атмосферно депозиране, улична мръсотия и други антропогенни и природни източници [1]. Това е сумарното количество несвързани помежду си твърди частици (най-често почва, пясък и др.), попаднали върху пътното платно по всички възможни начини. Този нанос се измерва в g/m^2 от пътното

платно и представлява осреднена величина. За нанос се считат само частици с аеродинамичен диаметър до $75 \mu\text{m}$ (чрез предварително пресяване, поголемите частици се отделят). Пътният нанос е разпределен неравномерно върху пътното платно. Той е най-малко около осевата линия на пътя и се увеличава в направление към банкета на пътя или бордюра на улицата. В градски условия бордюра играе задържаща роля, поради което плътността на наноса там може да достигне много високи стойности [2].

Произходът на пътния нанос е мултифакториален. Съществуват *non-exhaust* емисии, включително износване на гуми, спирачни накладки, настилка на пътищата, както и резуспендиране на вече депозираните частици [2]. Тези източници често превъзхождат емисиите от изпускателните системи (*exhaust*), особено в ур-

банизирани, с голям трафик зони [3]. Съставът включва минерални частици (пясък, прах, части от настилка), метали (например Cu, Zn, Fe, Sb от спирачки, корозия, спирачни накладки) и органични компоненти [4]. Също важна е фракционната структура: частиците $< 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) и $< 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) са особено значими по отношение на здравето [5].

Акумулирането на нанос зависи от множество фактори – трафикова натовареност, тип и състояние на настилка, климатични условия и конфигурация на улиците [6]. При преминаване на превозни средства се наблюдава резуспендиране на вече депозираните частици, което е важен източник на вторично замърсяване [7]. По време на валежи настъпва т.нар. *wash-off* феномен – начален интензивен отток, който „измества“ значителна част от натрупания нанос в канализацията и/или водните тела [8].

Пътният нанос не е просто „улична прах“ – той е носител на потенциално токсични елементи и съединения.

Той може да попадне в човешкия организъм чрез директно вдишване, консумирайки запрашена от него вода, храна и т. н., което само по себе си може да доведе до влошаване на човешкото здраве.

Метали като Cu, Zn, Pb, Cd и др. могат да се адсорбират или да бъдат част от самите частици [4].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Образуването на пътен нанос вследствие на антропогенни и естествени фактори е проблем, който е наличен при всички пътни артерии.

В Съединените американски щати пътният нанос се изследва чрез стандартизирани методи за пробонабиране, разработени от Агенцията за опазване на околната среда (EPA) и Американското общество за изпитване и материали (ASTM). Те включват специализирано оборудване и процедури за събиране на проби от атмосферния въздух и повърхностните отлагания в градска среда [30].

В България, този проблем до скоро е бил слабо изследван, като изключение прави дисертацията на д-р Димитринка Славова, посветена на изследване на замърсяването с пътен нанос в град Бургас.

Основните причини за замърсяването на пътните платна с частици могат да се класифицират като естествени (природни) и антропогенни (предизвикани от различни видове човешка дейност). Към естествените причини спадат процесите на непрекъснато утаяване на частици с разнообразен произход от атмосферата върху земната повърхност. Освен това, пръст, кал, тиня и пясък попадат върху пътните платна при екстремни метеорологични условия като проливни дъждове, порои, свлачища, ураганни ветрове и др. Възможностите на хората да влияят върху тези процеси е минимална. [12].

Антропогенните причини са твърде много на брой.

Изкопни работи на строителни обекти – извозването на изкопаната земна маса е съпроводено с разкалване на прилежащите райони. Задължителното измиване на гумите на автомобилите е много рядка практика, а на повечето места това не се прилага. Количеството пръст, която се изнася по този начин води, до увеличаване на пътния нанос многократно, а неговото самопочистване е свързано с високи емисии на прах и ФПЧ10.

Изграждане на подземни мрежи (канализационни, електрически, телефонни и др) – обикновено изкопаната пръст се натрупва върху пътното платно. По време на целия строителен период тя непрекъснато се разнася от превозните средства и дъждовете в обширен район и допринася за значително увеличаване на пътния нанос;

Малки и средни ремонти на фасади на сгради – след завършване на ремонтите (частична топлоизолация, запълване на фуги, ремонт на покриви и др.) прилежащите тротоари обикновено са силно замърсени с различни остатъци от строителни разтвори и материали. Независи-

мо, че строителните фирми извозват едрогабаритните отпадъци, тротоарите остават непочистени (задължително измиване на замърсените тротоари след ремонтни работи не се практикува). Постепенно всички замърсявания попадат на пътното платно и допринасят за увеличаване на пътния нанос.

Натрупване на пътен нанос до бордюрите – това е често срещана картина в по-крайните квартали на големите градове. Земната маса постепенно се уплътнява и разширява. Става неподатлива на машинно, даже и на ръчно измиване. При всеки дъжд тя се изнася към уличните платна.

Лошо състояние на тротоарите – в редица случаи тротоарите са в лошо състояние и върху тях от дъждовете непрекъснато се намира земна маса от прилежащите зелени площи. От там тя непрекъснато се пренася върху прилежащите пътни платна.

Лошо състояние на територии, определени за зелени площи – при всеки дъжд, дълго време неподдържаните зелени площи стават източник за пренос на земна маса към тротоарите, а от там към пътните платна. [12].

Формирането на пътен нанос представлява сложен и динамичен процес, при който се комбинират физични, химични и биотични фактори, типични за урбанизирани територии. Този процес се определя от интензитета на трафика, характеристиките на настилка, климатичните условия, морфологията на уличното пространство и атмосферните влияния [4]. Пътният нанос действа като междинен „резервоар“ за различни замърсители, които могат впоследствие да бъдат ремобилизирани чрез вятър, транспорт или дъждовен отток [13].

След като разгледахме общите предпоставки за възникване на пътен нанос, следващият важен фактор е трафиковата натовареност и източниците от износване.

Основен фактор за натрупване на пътен нанос е трафиковото натоварване,

което пряко определя количеството и състава на частиците.

Основен фактор за натрупване на пътен нанос е трафиковото натоварване, което пряко определя количеството и състава на частиците, депозирани върху настилка [14]. Износването на гуми, спирачни накладки и пътна настилка води до образуване на микрочастици, съдържащи метали (Cu, Zn, Fe, Sb), органични съединения и микропластмаси [15]. Гумите носят товара на превозното средство, осигуряват сцепление и поглъщат вариациите на повърхността на пътя и като цяло подобряват качеството на возене. Материалът на гумата е сложна смесица от каучук, въпреки че точният състав на гумите на пазара, обикновено не се публикува, като правило за гуми за леки автомобили. Той е 75% стирен бутадиев каучук (SBR), 15% естествен каучук и 10% полибутадиев. Съдържат се и метали и органични добавки [16]. Ефектът върху износването от спирачките на превозно средство е още по-значим от този за гумите. В леките автомобили и мотоциклетите, спирачната сила се прилага главно към предните колела, докато задните са основно за поддържане на стабилността на превозното средство. В резултат накладките на предната ос се заменят по-често (30 000 km) от накладките на задната ос (~50 000 km). При тежките камиони, спирачната енергия е по-равномерно разпределена между осите. За товарни автомобили и автобуси, животът на спирачните накладки е от порядъка на 60 000 km. Редица проучвания (Garg и др. 2000), показват, че износването възлиза на 11-18 mg/km за леки автомобили, за лекотоварни около 29 mg/km и 54 mg/km за тежки автомобили. [16].

Спирачните системи са значителен източник на мед и антимон, докато гумите отделят цинк и каучукови микрочастици [4]. Микрочастиците, съдържащи се в пътния нанос, представляват една от най-съществените заплахи за качеството на въздуха, водата и човешкото

здраве. Те включват твърди фрагменти с размер под 5 mm, произхождащи както от естествени процеси на износване, така и от различни антропогенни източници – гуми, спирачки, пътна настилка и атмосферно утаени прахови частици [17]. В урбанизираните зони, където трафиковата плътност е висока, натрупването на такива микрочастици е особено интензивно, а тяхната концентрация се увеличава при сухо и ветровито време поради резуспендиране [11].

По своя състав микрочастиците са изключително разнообразни – съдържат метали (Cu, Zn, Fe, Sb), органични вещества, микропластмаси и минерални компоненти от настилката.

Най-значим принос имат частиците от износване на гуми и спирачни накладки, които освобождават еластомерни и метални фрагменти, богати на цинк, мед и антимон [15]. Микропластмасите, произхождащи от автомобилни гуми, са сред основните небioresградими замърсители в градските дъждовни оттоци и могат да навлизат във водните тела, почвите и дори хранителната верига [17].

Фините фракции ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) имат способността да се задържат във въздуха и да проникват дълбоко в дихателната система, предизвиквайки оксидативен стрес, възпалителни процеси и кардиореспираторни заболявания [11]. Освен това, микрочастиците служат като носители на други токсични вещества – полициклични ароматни въглеводороди (PAHs), тежки метали и органични замърсители, което увеличава техния комбиниран ефект върху човешкото здраве и околната среда. Високата плътност на движението и честото спиране в градските условия усилват тези процеси [15].

Проучванията показват, че при задръствания с чести спирания и тръгвания количеството на пътни прахови емисии и спирачни частици е значително по-високо в сравнение с нормално движещ се трафик [29]. Измерванията в градска среда показват, че натрупването на пътен нанос може да достигне над 100 g на метър

бордюр на ден при силно натоварени улици [8]. Пътните транспортни произшествия (ПТП) са предпоставка за изключително отежняване на пътната обстановка и допълнително образуване на пътен нанос.



Фиг. 1. Натовареност на Аспарухов мост – Варна – 07.08.2025 г., вследствие на ПТП [28]

След трафика, друг съществен източник на пътен нанос са атмосферните отлагания, пренесени от индустриални зони, отоплителни системи и други източници. Утаяването на тези частици – както сухо, така и влажно – допринася за натрупването на фини прахови фракции и тежки метали върху пътните повърхности.

Към пътния нанос се добавят и атмосферно утаени частици, пренесени от индустриални зони, отоплителни системи, строителна прах и други източници [18]. Утаяването на атмосферните замърсители – както сухо, така и влажно (чрез валежи) – допринася за натрупването на фини прахови фракции и тежки метали върху пътните повърхности [19]. Проучванията показват, че до 40% от масата на пътния нанос в някои градове може да произхожда именно от атмосферни утаявания [20]. Тези частици често имат по-малък размер ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) и по-висока повърхностна реактивност, което ги прави по-опасни за здравето и по-мобилни при измиване от дъждовни води [11].

Съществуват два вида замърсители на въздуха.

Първични газообразни замърсители.

Трите основни групи газообразни замърсители на въздуха с негативни общи ефекти върху околната среда и здравето на експонираното население са серен диоксид SO_2 , азотни оксиди NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) и озонът O_3 . Серният диоксид и азотният оксид са първични замърсители - те се отделят директно от източниците на емисии. Азотният диоксид (NO_2) е както първичен, така и вторичен замърсител - една част от него се емитира при горивни процеси, а друга част се образува в атмосферата по време на химични реакции. O_3 се отнася към вторичните замърсители, тъй като основно се образува в атмосферата от първични замърсители [21].

Вторични газообразни замърсители

Голяма част от основните замърсители на въздуха се получават в резултат на различни атмосферни химически реакции [21].

Освен атмосферните влияния, типът и състоянието на пътната настилка също оказват важно въздействие върху процеса на натрупване на нанос.

Физичните свойства на настилка – грапавост, порьозност, материален състав – влияят върху скоростта на натрупване и задържане на наноса [22]. Асфалтовите настилки с микропукнатини задържат по-големи количества прах и метали, докато бетонните повърхности са по-гладки и улесняват частичното им издухване или отмиване [8]. Повредените настилки генерират и собствен принос към наноса чрез микрофрагменти от битум и минерални агрегати [12]. По-голямата част от пътната настилка в градовете е на основата на асфалт и бетон. Бетонните повърхности са съставени от груби агрегат, пясък и цимент. Асфалтовите покрития са смеси от минерален агрегат, пясък, пълнител и битумни свързващи вещества, въпреки че съставът може да варира в широки граници. Обикновено съдържанието на камък е

около 90-95%, а битумното свързващо вещество е около 5-10%. Свойствата на асфалта могат да бъдат модифицирани чрез добавки като адхезиви, полимери и различни видове пълнител [16].

Следващият аспект, който определя интензитета на процесите, са климатичните и сезонните фактори.

Метеорологичните условия имат пряко влияние върху процесите на натрупване и ремобилизиране на пътния нанос. При сухи и ветровити периоди се засилва резуспендирането на фини прахови частици [7], докато валежите и снеготопенето предизвикват измиване на натрупания нанос (*wash-off* процес) и пренасянето му към канализационната система [23]. Сезонната употреба на пясък и сол през зимата води до временен пик в масата на наноса и промяна в йонния му състав [24].

Не по-малко значение има и морфологията на уличното пространство, включително наклонът, наличието на бордюри и растителност, които определят начина, по който частиците се отлагат и пренасят.

Наклонът, наличието на бордюри, растителност и дренажни системи също влияят върху разпределението и задържането на пътния нанос [25]. В зоните с по-нисък наклон и лош дренаж се наблюдава по-интензивна акумулация на частици [26]. Растителните пояси и зелени ивици по пътната мрежа действат като естествени филтри, улавящи прах и метали, но в същото време могат да акумулират замърсители в почвата [27]. Накрая, следва да се обърне внимание на общия прах, който представлява основен атмосферен замърсител и често е тясно свързан с пътния нанос.

Прахът е основен атмосферен замърсител на въздуха. Вредният му здравен ефект зависи главно от размера и химичния състав на суспендираните прахови частици, от адсорбираните на повърхността им други химични съединения, в това число мутагени, ДНК - модулатори и др., както и от участъка на рес-

пираторната система, в която те се отлагат. Основни източници на прах са промишлеността, транспорта, енергетиката и битово отопление. През отоплителния сезон на локално ниво основен източник на замърсяване с прахови частици е изгарянето на твърди и течни горива в бита. Причина за това са ниските комини и специфичните метеорологични условия през зимния сезон, при които се намалява възможността за разсейване на атмосферните замърсители. Фините прахови частици се емитират в атмосферата директно или се образуват от емитираните в атмосферата газове [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направеният литературен обзор могат да се изведат следните по важни изводи и заключения.

Пътният нанос представлява сложен и многокомпонентен екологичен проблем, чиято поява и динамика се определят от взаимодействието на природни и антропогенни фактори. Естествените процеси – атмосферни отлагания, климатични влияния и морфологични особености на уличното пространство – създават условия за първично натрупване на частици, докато човешката дейност, свързана с транспорт, строителство и поддръжка на инфраструктурата, усилва и усложнява тези процеси.

Особено внимание следва да се отдели на микрочастиците, образувани при износване на гуми, спирачки и настилки, които не само влошават качеството на въздуха, но и допринасят за вторично замърсяване на водите и почвите чрез оттичане и ресуспендиране.

Ефективното управление на пътния нанос изисква системен подход, включващ редовен мониторинг, използване на устойчиви материали, ограничаване на строителния прах, модерни методи за почистване и интегриране на екологични стандарти в градското планиране. Само чрез съчетаване на научно познание и практическо прилагане могат да се ми-

нимизират вредните последици и да се подобри качеството на градската среда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Haynes, H. M., et al. (2020). Characterisation of road-dust sediment in urban systems: A review of a global challenge. *Environmental Pollution*, 263, 114611.
- [2] Loganathan, P., et al. (2013). Road-Deposited Sediment Pollutants: A Critical Review of Their Characteristics, Source Apportionment and Management. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(13), 1315–1348.
- [3] OECD (2020). Non-Exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge. OECD Publishing.
- [4] Jeong, H., et al. (2021). Potentially toxic elements pollution in road deposited sediment. *Scientific Reports*, 11, 11324.
- [5] Fussell, J. C., et al. (2022). A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1453–1470.
- [6] Mao, J., et al. (2024). Characterization of road-deposited sediment wash-off and initial runoff processes. *Science of the Total Environment*, 921, 169836.
- [7] Zhang, K. & Kim, H. (2021). Understanding the sources and processes of urban road dust. *Atmospheric Environment*, 259, 118540.
- [8] Zhao, H., et al. (2010). Role of particle size and composition in road-deposited sediment wash-off. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1-3), 132–140.
- [9] Jeong, H., et al. (2021). Potentially toxic elements pollution in road deposited sediment. *Scientific Reports*, 11, 11324.
- [10] Unice, K. M., et al. (2019). Tire wear particles in the environment: A review and evaluation of sampling methods. *Science of the Total Environment*, 667, 777–789.
- [11] Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.

- [12] Slavova, D. (2020). Research on road sediment pollution on the transport arteries of the city of Burgas. University "Prof. Dr. Asen Zlatarov", Burgas (author's abstract).
- [13] Mao, J., et al. (2024). Characterization of road-deposited sediment wash-off and initial runoff processes. *Science of the Total Environment*, 921, 169836.
- [14] OECD (2020). Non-Exhaust Particulate Emissions from Road Transport. OECD Publishing
- [15] Grigoratos, T. & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2491–2504.
- [16] O. Varna, "Minutes No. 39 of the meeting held on 29.04.2019," Varna, 2019.
- [17] Unice, K. M., et al. (2019). Tire wear particles in the environment. *Science of the Total Environment*, 667, 777–789.
- [18] Gunawardena, J., et al. (2013). Atmospheric deposition as a source of heavy metals in urban road dust. *Atmospheric Environment*, 68, 147–157.
- [19] Fergusson, J. E., & Kim, N. D. (1991). Trace elements in street and house dusts: Sources and speciation. *Science of the Total Environment*, 100, 125–150.
- [20] Han, Y. M., et al. (2019). Source apportionment of urban road dust using receptor modeling. *Environmental Pollution*, 255, 113287.
- [21] Chuturkova R., Air Pollution (2015)
- [22] Sansalone, J., et al. (2018). Street sweeping and particulate matter control in urban environments. *Urban Water Journal*, 15(2), 156–168.
- [23] Huber, M., et al. (2016). Traffic-related metal emissions and stormwater pollution control. *Science of the Total Environment*, 541, 895–903.
- [24] Zafra, C. A., & Temprano, J. (2018). Seasonal variation in road-deposited sediment and wash-off load. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 584
- [25] Sartor, J. D., & Boyd, G. B. (1972). Water pollution aspects of street surface contaminants. EPA Report.
- [26] Li, X., et al. (2013). Spatial variation of urban road dust metal contamination and its relationship with road traffic. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 6941–6948.
- [27] Charlesworth, S., et al. (2011). A review of the distribution of particulate pollutants in urban vegetation and soil. *Environmental Pollution*, 159(10), 2768–2780.
- [28] <https://www.focus-news.net/novini/regioni/Avariral-avtovoz-prichini-ogromno-zadrustvane-na-Asparuhov-most-vuv-Varna-2659564>
- [29] Thorpe, A. & Harrison, R. (2008). Sources and properties of non-exhaust *particulate matter from road traffic: A review*. *Science of The Total Environment*, 400(1-3), 270–282.
- [30] <https://www.astm.org/search/result>