Cieto daļiņu emisiju variācijas un to ietekmējošie faktori abrāzijas procesos

2012.gada oktobris

Cieto daļiņu emisiju variācijas un to ietekmējošie faktori abrāzijas procesos

2012.gada oktobris

SATURS

Ievads	4
Izmantotie saīsinājumi un apzīmējumi	5
1. Cieto daļiņu rašanos ietekmējošie faktori un procesi	
1.1. Auto simulatoru testēšanas rezultātu apkopojums	9
1.2. Cieto daļiņu emisiju sastāva novērtējums	26
2. Emisijas faktoru metode cieto daļiņu emisiju novērtēšanai	30
 Cieto daļiņu sagaidāmais dzīves ilgums 	37
Kopsavilkums un secinājumi	38
Izmantotā literatūra	40
Pielikums.	

ASV Vides aizsardzības aģentūras resuspensijas un	
abrāzijas emisijas faktoru apkopojums	45

IEVADS

Pēdējo 10 - 15 gadu laikā veiktajos epidemioloģiskajos pētījumos ir pierādīta cieša saikne starp sirds, asinsvadu un elpošanas ceļu saslimstības rādītājiem un cieto daļiņu ar diametru mazāku par 10 mikroniem piesārņojuma līmeni (*Ackermann Liebrich et al., 1997; Braun Fahrlander et al., 1997; Dockery and Pope, 1994; Kunzli et al., 2000; Pope at al., 2002*). Līdz ar to, gan Eiropas Savienības dalībvalstīs, gan citās valstīs pasaulē ir noteikti gaisa kvalitātes normatīvi ne tikai PM₁₀, bet arī sīkākām cieto daļiņu frakcijām (piemēram, PM_{2.5}, atsevišķos gadījumos arī PM₁). Pašreiz noteiktie normatīvi lielā daļā valstu tiek pārsniegti.

Autotransporta plūsma ir specifisks cieto daļiņu emisijas avots, jo atmosfērā tās nonāk ne tikai degvielas sadegšanas rezultātā, bet arī citu ne mazāk nozīmīgu procesu kā abrāzija un resuspensija rezultātā. Ja degvielas sadegšanas procesa norise un izplūdes gāzu veidošanās ir salīdzinoši labi izpētīta, tad abrāzijas procesi ir pētīti fragmentāri. Šajos pētījumos arī pierādīts, ka bieži vien abrāzijas procesi katrai konkrētai vietai ir specifiski un pētījumu rezultāti nav ekstrapolējami citām vietām un situācijām. Abrāzijas procesos tiek ievērtēti vairāki procesi un faktori, kuru nenoteiktība ir gana liela, līdz ar to pašreizējos apstākļos kā viena no rekomendējamām metodēm abrāzijas procesu novērtēšanā ir transporta simulatoru testēšana, kaut arī šī metode nav uzskatāma par absolūti precīzu, jo simulatori bieži vien tiek testēti laboratorijas apstākļos, kas ir atšķirīgi no reālās vides apstākļiem.

Galvenie procesi un faktori, kas tiek pētīti, novērtējot cieto daļiņu ne-izplūdes gāzu emisijas:

- abrāzija automašīnas riepas un autoceļa saskares punktā;
- bremžu disku nodilums dažādos braukšanas režīmos (bremzēšana, taisnvirziena, lokveida kustība u.c.);
- citu kustīgo detaļu nodilums;
- > dažādu riepu veida (vasaras, ziemas riepas, riepas ar/bez radzēm) ietekme;
- dažādu ceļa segumu (asfaltbetons, dažādas porainības asfalts, asfalta tehniskais stāvoklis) ietekme;
- dažāda veida (kravas, vieglo) transporta līdzekļu ietekme uz abrāziju;
- ceļa segumu apsaimniekošanas (dažāda veida tīrīšana, ceļa segumu apstrāde) prakses ietekme.

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

ABS	Bremžu pretbloķēšanas sistēma
ADT	Vidējais diennakts automašīnu plūsmas daudzums
HDV	Smagais (kravas) transporta līdzeklis
LDV	Vieglais transporta līdzeklis
РАН	Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži
PM	Cietās daļiņas
PM ₃₀	Cietās daļiņas ar aerodinamisko diametru mazāku par 30 mikroniem
PM ₁₅	Cietās daļiņas ar aerodinamisko diametru mazāku par 15 mikroniem
PM ₁₀	Cietās daļiņas ar aerodinamisko diametru mazāku par 10 mikroniem
PM _{2.5}	Cietās daļiņas ar aerodinamisko diametru mazāku par 2,5 mikroniem
PM ₁	Cietās daļiņas ar aerodinamisko diametru mazāku par 1 mikronu
PM _{2.5-10}	Cieto daļiņu frakcija ar izmēriem robežās no 2,5 līdz 10 mikroniem
SP	Suspendētās daļiņas
TSP	Kopējās suspendētās daļiņas
VKT	Transporta līdzekļu skaits, kas nobrauc kilometru
VMT	Transporta līdzekļu skaits, kas nobrauc jūdzi
VTI	Zviedrijas Nacionālais ceļu un transporta institūts

1. CIETO DAĻIŅU RAŠANOS IETEKMĒJOŠIE FAKTORI UN PROCESI

Cieto daļiņu formēšanās (veidošanās) process atmosfērā ir ļoti sarežģīts, lielu lomu spēlē primāri emitētās cietās daļiņas, prekursoru gāzu klātbūtne un līdz ar to - sekundāro aerosolu veidošanās. Pie tam jāņem vērā tas, ka aerosolu veidošanās process nav vēl pilnīgi izprasts nepietiekamo zināšanu dēļ.

Kā zināms, PM ir dažādu komponentu komplekss maisījums, kā izcelsme var būt gan antropogēna, gan dabiska. Minerālas izcelsmes sastāvdaļas (silikāti, karbonāti, fosfāti, oksīdi) galvenokārt ir PM_{2.5-10} frakcijas daļā nevis PM_{2.5}. Tieši minerāldaļiņu daudzums galvenokārt nosaka PM₁₀ variabilitāti. Zinot minerālās daļas nozīmību, atsevišķos PM sastāva un izcelsmes pētījumos konstatēta to īpatsvara palielināšanās ķēdītē "lauku apvidus \rightarrow piepilsēta \rightarrow pilsētas fons \rightarrow brauktuve" kā galveno emisiju avotu izceļot resuspensiju. *Ketzel et al. (2007)* konstatējis, ka vairākās Eiropas valstīs liela daļa (atkarībā no novietojuma aptuveni 50 – 85%) PM₁₀ emisiju saistāmas ar t.s. cieto daļiņu ne-izplūdes emisijām, kas norāda, ka stingrāki nosacījumi emisijas sastāvam tikai daļēji samazinās kopējo PM piesārņojuma līmeni.

Lielākā daļa valstu automašīnu izplūdes gāzu emisijas reglamentē likumdošanas aktos, tādēļ, ņemot vērā nākotnes normatīvus, tiek plānots, ka šīs emisijas samazināsies. Citas ar transportu saistītās emisijas ir grūtāk novērtējamas, pie šāda tipa emisijām pieskaitāmas cieto daļiņu emisijas no riepu nodiluma, riepu tipa, virsmas tipa (asfalts, grantēta virsma) un resuspensija (*Thorpe & Harrison, 2008*), kā arī kancerogēnu smago metālu emisijas no bremžu, rotoru, disku un katalizatoru nodiluma. Skandināvijas valstīs augstāks PM₁₀ piesārņojums ir konstatēts saistībā ar ceļu kaisīšanu, t.sk. sāls maisījuma kaisīšanu, kā arī, radžotu riepu izmantošanu ziemas periodā. Šādas emisijas parasti sastāv no liela izmēra daļiņām. Līdzīgi secinājumi iegūti Nevadā, Kolorado un Ņujorkā. (*Amato et al., 2010*).

Tātad PM emisijas nevar saistīt tikai ar autotransporta izplūdes gāzēm, tās atmosfērā nonāk arī dažādu citu mehānisku procesu rezultātā, galvenie no tiem - mehāniskā abrāzija un resuspensija. Ja izplūdes gāzu sastāvu ir iespējams izmērīt (lai arī pastāv aizdomas par laboratorisko mērījumu daļēju neatbilstību reālajai situācijai transporta līdzekļu lielo variāciju dēļ, jo, kā zināms, cieto daļiņu emisija no dīzeļdzinējiem ir būtiski atkarīga no transporta līdzekļa tehniskā stāvokļa), tad ziņas par mehāniskas abrāzijas ceļā radušos cieto daļiņu emisijām ir fragmentāras. Abrāzijas ceļā radušos emisiju priekšnovērtējums atsevišķām urbānām pilotteritorijām ir veikts Šveicē (2000.gadā), ASV un Zviedrijā ir izstrādātas empīriskas novērtējuma procedūras, kas diemžēl nedeva adekvātu (pietiekami ticamu) rezultātu validācijas procesā (salīdzinājumā ar mērījumiem) (*Gehrig et al., 2004*).

2004.gadā Šveicē tika veikts papildus novērtējums abrāzijas un resuspensijas procesiem, kurā mēģināja izstrādāt PM₁₀ emisijas faktorus dažādām situācijām (*Gehrig et al., 2004*), tomēr iegūtie rezultāti vēl arvien ir drīzāk eksperimentāli un norāda uz tālāku pētījumu nepieciešamību.

Smilšu kaisīšanas faktora ietekmes novērtējums veikts (*Kuhns et al., 2003*) pētījumā, kur konstatēts, ka 2,5 stundas pēc sausu ceļu kaisīšanas novērojams PM₁₀ koncentrāciju palielinājums par 75% (īstermiņa efekts) un piesārņojuma līmenis pirmskaisīšanas stadijā atgriežas vidēji 8 stundu laikā. Citā pētījumā (*Zhu et al., 2009*) savukārt konstatēts, ka PM piesārņojuma līmenis palielinās 10-kārt, ja kaisīšana veikta uzreiz pēc snigšanas epizodes. Kā arī, saskaņā ar izstrādātajiem emisijas faktoriem, samazinoties braukšanas ātrumam, konstatēta samazinoša tendence.

Orientējoši tiek pieņemts, ka PM_{10} piesārņojuma līmenis, kas rodas resuspensijas procesos, pēc apmēra ir līdzīgs PM daudzumam izplūdes gāzēs. Tiek pieņemts (saskaņā ar pētījumu rezultātiem dažādās ASV pilsētās), ka primāri emitētās izplūdes gāzes ir 4 - 40%, savukārt resuspensija – 30 - 50% (*Chow et al., 1992; Kim et al., 1992; Watson et al., 1989*).

Bez reglamentējošiem ierobežojumiem automašīnu izplūdes gāzu emisijām, PM emisiju samazināšanai tiek izmantoti arī citi pasākumi – ielu tīrīšana, ūdens un citu saistvielu smidzināšana. Diemžēl šo pasākumu efektivitāti novērtēt ir sarežģīti, jo šajā jomā nav zinātnisku pētījumu, pasākumi galvenokārt tiek veikti atsevišķās pašvaldībās, ziņojumi par veiktajiem pasākumiem ir tikai nacionālās valodās un tie nav publiski pieejami.

Jāatzīst, ka iepriekš minētajiem mehāniskajiem PM emisijas avotiem pietiekami ticami un universāli emisijas faktori nav izstrādāti, vai arī, ja tie pastāv, tiem raksturīga liela nenoteiktība (*Tucker*, 2000). Saskaņā ar EMEP/CORINAIR metodiku (*EMEP/CORINAIR*, 2004.), ar ne-izplūdes PM emisijas avotiem Eiropas valstīs tiek saistītas 3,1% PM₁₀ un 1,7% PM_{2.5} emisiju. Tātad, cieto daļiņu rašanās un ietekmējošo faktoru novērtējums ir svarīgs, lai novērtētu PM un kancerogēno savienojumu (piemēram, PAHs) daudzumus.

Ne-izplūdes gāzu PM, kā izmēri ir gan lielāki par 30 mikroniem, gan mazāki par 30 mikroniem, emisijas veidojas riepām mijiedarbojoties ar virsmas segumu. Berzes spēka un virsmas relatīvo kustību dēļ veidojas cietās daļiņas. Tiek lēsts, ka riepu protektora nodiluma pakāpe ir robežās no 0,008 līdz 0,09 g/km katrai riepai un tā veidošanās ir atkarīga no braukšanas apstākļiem, ceļiem, riepu konstrukcijas, transporta līdzekļa noslodzes un citiem faktoriem (*Rogge et al., 1993; Luhana et al., 2004*). Cietās daļiņas, kas ir lielākas par 30 mikroniem, parasti nosēžas ceļu tuvumā. Protektora nodilums ir būtisks cinka (*Adachi and Tainosho, 2004; Hjortenkrans et al., 2007*) un PAH piesārņojuma avots (*Pengchai et al., 2005; Boonyatumanond et al., 2007*). Atsevišķos laboratoriskos pētījumos konstatēta ceļu noteces ūdeņu toksicitāte ūdens organismiem (*Gualtieri et al., 2005; Stephensen et al., 2005*). Kā sekundārs mehānisms minama materiālu iztvaikošana no riepu un ceļu virsmas paaugstinātu temperatūru gadījumā, ja šīs temperatūras cēlonis ir savstarpējā berze. Šī procesa rezultātā atmosfērā nonāk ļoti kancerogēni gaistoši savienojumi, piemēram, PAH (*KEMI, 2003*).

Pētījumos (*EMEP/CORINAIR*, 2004; *Luhana et al.*, 2004; *ChemRisk*, 2008) ir pierādīts, ka emisijas lielā mērā ir atkarīgas no ceļa virsmas stāvokļa (mitruma saturs, tips, u.c.), riepu un transporta līdzekļa tehniskā stāvokļa, braukšanas režīma. Receptortipa

modelēšanā pierādīts, ka iepriekš minēto faktoru variācijas ir grūti aprakstāmas, līdz ar to modelēšanas rezultāti ir katrai konkrētai pētījumu vietai specifiski un nav pārnesami/piemērojami citām vietām.

Dahl et al. (2006) savā pētījumā izmantoja VTI (Zviedrijas Nacionālā ceļu un transporta institūta) ceļa simulatoru, lai pētītu radžotu un neradžotu riepu ietekmi uz dažāda tipa ceļu segumiem. Radžotu riepu izmantošana ir pieļaujama tikai nelielā skaitā valstu (t.sk. arī Latvijā). Neradžotas ziemas riepas ir ražotas no mīkstākas gumijas, lai tās būtu mīkstas arī aukstos apstākļos un samazinātu automašīnas slīdēšanu (palielinot saķeri). Pētījumā konstatēts, ka daļiņu izcelsme galvenokārt saistāma ar riepām, bet ne asfalta segumu. Īpaši smalko daļiņu grupā (< 0,1 mikronu), vidējais daļiņu diametrs (pēc sadalījuma) ir no 15 – 50 nm. Tika konstatēts, ka emisijas, kas rodas riepas - virsmas segums kontakta rezultātā, pēc apjoma ir salīdzināmas ar izplūdes gāzu emisijām. *Gustafsson et al. (2008 a,b)* izmantoja VTI simulatoru, lai testētu dažādu ceļa segumu, riepu tipa un transporta līdzekļu ātruma ietekmi uz seguma nodilumu. Tika konstatēts, ka visizturīgākais ir granīta segums salīdzinot ar kvarcītu. Netika atrastas būtiskas atšķirības starp PM₁₀ emisijām no vasaras riepām salīdzinājumā ar radžotām un neradžotām ziemas riepām.

Cits veids, kā novērtēt ne-izplūdes gāzu PM emisijas, ir emisijas faktoru izmantošana, lai arī ASV Vides aģentūras USEPA (2003) piedāvātā metodika tiek kritizēta (Venkatram, 2000; APEG,1999). USEPA novērtēšanas metodē tiek pieņemts, ka galvenais faktors ir smilšu saneses uz ceļa un galvenās ne-izplūdes PM emisijas saistāmas ar resuspensiju. Tas ir nepatiess pieņēmums, jo liela daļa no PM emisijām var rasties arī abrāzijas procesos. Bez tam, resuspensijas cēlonis var būt arī cits, jo eksistē ne tikai automašīnu kustību inducēta resuspensija, bet arī vēja inducēta resuspensija.

Ir pavisam neliels skaits pētījumu par abrāzijas procesiem dažādu riepu izmantošanas gadījumos atšķirīgiem ceļu segumiem. Pamatojoties uz atsevišķiem specifiskiem pētījumu projektiem, var apgalvot, ka betona segumam, salīdzinot ar asfalta segumu, ir savas priekšrocības (*CAC*, 2004). Betona segumam ir mazāka iespējamība iegūt rises, tas ir izturīgāks pret buksēšanu, ilgmūžīgāks, labāka redzamība nakts laikā, labāka siltuma atstarošanās. Šāda veida ceļa segumi ir biežāk novērojami vietās, kas pakļautas stipriem nokrišņiem (lai novērstu ceļu izskalošanos), piemēram, Indijā.

1.1. Auto simulatoru testēšanas rezultātu apkopojums

Viena no metodēm, kā novērtēt PM emisijas, kas rodas automašīnu riepām un ceļa segumam mijiedarbojoties, ir ceļa simulatoru izmantošana. Šo metožu piemērošanas gadījumā iespējams iegūt tīrus paraugus un droši noteikt daļiņu izcelsmi. Parasti šādos simulatoros riepu kustība tiek organizēta pa apli, izmantoto riepu skaits ir atkarīgs no simulatora lieluma un veida. Simulatora piemērs dots 1.1.1.attēlā.



1.1.1.attēls. Ceļa simulators Zviedrijas Nacionālajā ceļu un transporta pētījumu institūtā (*Kupiainen et al.*, 2002)

Konstatēts, ka smalkās daļiņas ($\emptyset < 100$ nm), kas rodas automašīnu riepām mijiedarbojoties ar ceļa segumu, lielā mērā ir galvenais faktors, kas Ziemeļvalstīs nosaka PM₁₀ koncentrāciju palielinājumu ceļu tuvumā ziemas periodā un agros pavasaros (*Kupiainen et al., 2002*). Riepu nodiluma daļiņas parasti ir lielākas nekā sadegšanas ceļā radušās daļiņas, to izmēri parasti ir lielāki par 1 µm, kā arī konstatēts, ka pamatā emisijās dominē smalkās daļiņas.

Parasti simulatora (riteņu) kustības ātrumu ir iespējams mainīt robežās no 0 - 70 km/h. Virsma, pa ko riteņi kustas, var būt dažāda, atkarībā no pētījuma mērķa, tāpat arī transporta līdzekļa tips ir maināms. Temperatūra telpā ir robežās no 20 - 35 °C, parasti tā nav aprīkota ar kondicionēšanas iekārtām. Pirms simulatora darbības uzsākšanas, parasti tiek veikti PM fona mērījumi telpā, lai pavisam droši novērtētu abrāzijas efekta ietekmi uz PM piesārņojuma līmeni (*Dahl at al., 2006*).

Simulatoram uzsākot darbību, PM koncentrācijas sāk palielināties un stabilizējas aptuveni 1 stundas laikā. Konstatēts, ka:

- neradžotu riepu gadījumā pie kustības ātruma 70 km/h vidējais daļiņu skaits ir 25 000 1/cm³, vidējais daļiņu diamters 27 nm;
- radžotu riepu gadījumā pie kustības ātruma 70 km/h vidējais daļiņu skaits ir 18 000 1/cm³ (15 - 700 nm), vidējais daļiņu diametrs 44 nm.

Samazinoties kustības ātrumam, daļiņu sadalījums ir līdzīgs, tikai samazinās to skaits, ražotu riepu gadījumā skaits ir 8000 1/cm³ (50 km/h). Atkārtotos simulatora darbības mēģinājumos, kā virsmas pamatni izmantojot granītu, konstatēts, ka vidējais daļiņu skaits ir 26 000 1/cm³, bet to vidējais diametrs ir 50 nm (pie kustības ātruma 70 km/h), skat. 1.1.2.attēlu.



1.1.2.attēls. Daļiņu skaita un izmēra sadalījums dažādos simulatora kustības ātrumos radžotu un riepu bez radzēm gadījumos (*Dahl at al., 2006*)

Pamatojoties uz *Dahl at al., 2006* veiktajiem pētījumiem, tika izstrādāti emisiju faktori. Emisijas avota ietekmi interesējošā cieto daļiņu izmēru diapazonā (15 - 700 nm) iespējams novērtēt, izmantojot ilgstošus nepārtrauktus mērījumus. Šādos gadījumos emisijas avota darbības ietekmes stiprumu iespējams konvertēt emisijas faktoros, ko pēc tam, savukārt, iespējams izmatot, piemēram, modelēšanā. Pamatojoties uz šādiem iepriekš veiktiem mērījumiem, izstrādāts "box-modeļa" masas bilances vienādojums:

$$\frac{dN}{dt} = Q - kN \, \mathbf{C}, \, \text{kur} \tag{1}$$

N(t) daļiņu skaits tilpuma vienībā (daļiņas/cm³) simulatora telpā; Q – iekārtas darbības ietekmes stipruma rādītājs (daļiņas/(cm³×s)); k – daļiņu samazinājuma pakāpes konstante (daļiņas/s). Pieņemts, ka daļiņu samazinājums ir proporcionāls kopējam daļiņu skaitam N(t). Kā arī, šajā modelī tiek pieņemts, ka emitētās daļiņas pilnīgi sajaucas visas telpas tilpumā un nav pieplūdes/nosūces ventilācijas, kas varētu būs papildus PM piesārņojuma avots.

Tādējādi iespējams apgalvot, ka daļiņu skaits ir laikā mainīgs (atkarīgs):

$$N = N_o e^{-kt} + \frac{Q}{k} \left(-e^{-kt} \right), \text{ kur}$$
(2)

 $N_o = N(t=0) - daļiņu sākotnējā koncentrācija pirms simulatora darbības uzsākšanas.$

Kustības simulatoram uzsākot darbu, apstākļi telpā kļūst turbulenti, piemēram, pie kustības ātruma 70 km/h, gaisa kustība telpā ir 4 - 6 m/s, līdz ar to var pieņemt, ka sajaukšanās ir efektīva. Daļiņu samazinājums ir atkarīgs no laika faktora ($\tau = 1/k$), jo kustība turbulentāka, jo laika faktors mazāks:

- > 70 km/h gadījumā $\tau = 10 24$ minūtes;
- > 50 km/h gadījumā $\tau = 25 45$ minūtes.

Pētījumā (*Dahl at al., 2006*) iegūtie daļiņu ($\emptyset = 15 - 700$ nm) emisiju faktori doti 1.tabulā.

1.tabula

Riepas	Ceļa virsma	Kustības ātrums, km/h	Emisijas faktors, daļiņas/(transporta līdzeklis×km)
Bez radzēm	Gumija	50	$3,7 \times 10^{11}$
Bez radzēm	Gumija	70	$1,1 \times 10^{12}$
Bez radzēm	Kvarcīts ¹	50	$3,8 \times 10^{11}$
Ar radzēm	Kvarcīts ¹	70	$1,9 \times 10^{12}$
Ar radzēm	Kvarcīts ¹	50	$6,1 \times 10^{11}$
Ar radzēm	Granīts (asfaltbetons)	70	$3,1 \times 10^{12}$

Cieto daļiņu (15 - 700 nm) emisijas faktori dažādiem ceļa segumiem un kustības ātrumiem (*Dahl at al., 2006*)

Saskaņā ar šo pētījumu, galvenais faktors, kas ietekmē daļiņu emisiju, ir ātrums. Pie kustības ātruma 30 km/h abrāzijas efekts netika konstatēts (daļiņu piesārņojuma līmenis palika fona līmenī kvarcīta seguma gadījumā). Bez tam, ātrums (mehāniskais stress) ietekmē riepas temperatūru. Temperatūrai paaugstinoties, sāk iztvaikot eļļas, kas riepu ražošanā izmantotas kā mīkstinošas piedevas. Temperatūras ietekme uz daļiņu emisiju parādīta 1.1.3. - 1.1.4.attēlā.

¹ Akmens masas asfalts



1.1.3.attēls. Monodispersu riepu daļiņu relatīvā izmēra izmaiņas dažādos temperatūras režīmos



1.1.4.attēls. Mērījumos iegūtā riepu daļiņu ar izmēru 80 nm attiecība pret temperatūru

Pamatojoties uz iepriekš minēto, iespējams apgalvot, ka daļiņas, ar izmēru mazāku par 200 nm, rodas no riepu materiāla. Kā pierādījums tam – tās ir atkarīgas no temperatūras, savukārt daļiņas, kā izmēri ir lielāki par 320 nm, ir termiski stabilas līdz 300 °C temperatūrai, tādējādi tās sastāv galvenokārt no oglekļa un to izcelsme ir virsmas pamatnes materiāls.

Nošķirt abrāzijas un resuspensijas daļiņas ir ļoti sarežģīti to līdzīgā sastāva un korelāciju laikā dēļ. Eksperimentāli pierādīts, ka cieto daļiņu abrāzijas emisija ir niecīga (tikai daži mg/km) vai dažos gadījumos pat kvantitatīvi nav iespējams to novērtēt, gadījumos, ja ceļa virsmas stāvoklis ir labs. Abrāzijas efekts būtiski palielinās, ja ceļa virsmas stāvoklis

ir slikts. Poraina virsma suspendēto materiālu piesaista labāk nekā blīva (piemēram, asfaltbetons), līdz ar to ir mazāks resuspensijas efekts (*Gehrig et al.*, 2010).

Bez cirkulārajiem ceļu simulatoriem tiek izmantoti arī lineārie simulatori (tos vairāk pielieto ceļu inženieri, lai testētu dažādus ceļu materiālus). Simulatora grafiskais attēlojums dots 1.1.5.attēlā.



1.1.5.attēls. Vieglā transporta līdzekļa simulators asfaltbetona seguma testēšanai (pa kreisi) un smagā transporta līdzekļa simulators (pa labi) (*Gehrig et al., 2010*)

1.1.5.attēlā parādītie simulatori izmantoti pētījumā, kur novērtēts abrāzijas efekts 2 ceļa segumu gadījumos:

- asfaltbetons 3 fāzu ceļa klājuma materiāls, kas sastāv no smalkiem un rupjiem materiāliem, kā arī no gaisa ieslēgumiem bitumena matricā, porainība – 5%;
- (2) porains asfaltbetons arī 3 fāzu materiāls, videi draudzīgāks, jo samazina troksni, uzlabo braukšanas drošību lietainos apstākļos, porainība 20%.

Porains asfaltbetons dažkārt tiek izmantots tikai virskārtā. Shematiskas abu veidu asfaltbetonu minerālās kompozīcijas skat. 1.1.6. attēlā.

Saskaņā ar *Gehrig et al. (2010)* pētījumu rezultātiem, raksturīga daļiņu sadalījuma aina atspoguļota 1.1.7.attēlā, kur skaidri redzama abrāzija efekta ietekme. Kā jau bija sagaidāms, abrāzijas efekta līkne ir novirzīta pa labi, kas nozīmē, ka dominē lielāka izmēra daļiņas.



1.1.6.attēls. Minerālās kompozīcijas struktūra asfaltbetonam (kreisā pusē) un porainam asfaltbetonam (labā pusē) (*Gehrig et al., 2010*)



1.1.7.attēls. Cieto daļiņu sadalījums smagā transporta līdzekļa simulatora darbības laikā Gehrig et al., 2010

1.1.8. – 1.1.9.attēlā parādīti modeļa simulatora rezultāti, smagā transporta līdzekļa simulatoram strādājot uz kvalitatīvas (labā stāvoklī esošas) un nekvalitatīvas asfaltbetona virsmas.



1.1.8.attēls. Resuspendēto un abrāzijas efekta rezultātā iegūto daļiņu koncentrācijas HDV simulācijas laikā, ceļa segums – bojāts asfaltbetona segums. Katra kolonna (melnā krāsā) attēlo 5 minūšu mērījumu, kas atbilst 500 garām braucošām kravas automašīnām



1.1.9.attēls. Resuspendēto un abrāzijas efekta rezultātā iegūto daļiņu koncentrācijas HDV simulācijas laikā, ceļa segums – asfaltbetona segums labā stāvoklī. 2 dienu mērījumu rezultāti - pirmajā dienā redzama emisija g-k resuspensijas rezultātā, savukārt 2.dienā – abrāzijas efekts. Melnās kolonnas attēlo 5 minūšu mērījumus, kas atbilst 500 garām braucošām kravas automašīnām

Attēla 1.1.10 pirmajā mērījumā skaidri redzams resuspensijas efekts, kur turbulences efekta rezultātā tiek resuspendētas iepriekš nosēdušās daļiņas. Pēc tam koncentrācija lēni samazinās un eksperimenta beigās redzama abrāzijas efekta nelielā ietekme.



1.1.10.attēls. Resuspendēto un abrāzijas efekta rezultātā iegūto daļiņu koncentrācija LDV simulācijas laikā, ceļa segums – jauns (nesen uzklāts) asfaltbetona segums. Katra kolonna (melnā krāsā) attēlo 6 minūšu mērījumus, kas atbilst 750 garām braucošām vieglām automašīnām

1.1.11.attēlā redzamo mērījumu rezultātu skaidrojums ir analoģisks iepriekšējam. Vēlāk redzama piesārņojuma līmeņa izlīdzināšanās, abrāzijas efekts ir neliels un tikai nedaudz palielina fonu. Atsevišķie piesārņojuma "*pīķi*" mērījumu veikšanas nobeigumā skaidrojumi ar porainā materiāla nodilumu – lielāku daļiņu nonākšanu apkārtējā vidē.



1.1.11.attēls. Resuspendēto un abrāzijas efekta rezultātā iegūto daļiņu koncentrācijas LDV simulācijas laikā, ceļa segums – jauns (nesen uzklāts) porains asfaltbetona segums. Katra kolonna (melnā krāsā) attēlo 6 minūšu mērījumus, kas atbilst 750 garām braucošām vieglām automašīnām

Atbilstoši mērījumu rezultātiem, abrāzijas un resuspensijas procesiem izstrādāti emisijas faktori, tie apkopoti 2.tabulā.

2.tabula

Abrāzija					
Mobilā simulatora tips	LDV	LDV	HDV	HDV	
Virsmas tips	Asfaltbetons	Porains asfalts	Asfaltbetons	Asfaltbetons	
Virsmas stāvoklis	Jauns	Jauns	Labs	Bojāts	
PM ₁₀ emisijas faktors 1 ritenim, mg/km	0,25	0-0,2	0,7	8	
PM ₁₀ emisijas faktors LDV, mg/km	3	0 - 2			
PM ₁₀ emisijas faktors HDV, mg/km			7	80	
Resuspensija	-		-	-	
Mobilā simulatora tips	LDV	LDV	HDV	HDV	
Virsmas tips	Asfaltbetons	Porains asfalts	Asfaltbetons	Asfaltbetons	
Virsmas stāvoklis	Jauns	Jauns	Labs	Bojāts	
PM ₁₀ emisijas faktors 1 ritenim, mg/km	6,3	0,41	11	66	
PM ₁₀ emisijas faktors LDV, mg/km	76	5			
PM ₁₀ emisijas faktors HDV, mg/km			110	660	

Abrāzijas un resuspensijas emisijas faktori dažādiem ceļa segumiem un transporta līdzekļiem

Paskaidrojumi 2.tabulai, simulatoru raksturojums:

- LDV vieglā autotranspota simulators, attiecīgi 1/3 no auto slodzes, kustības ātrums 9 km/h; nobraukums – 1,2 m; garāmbraucošu auto ekvivalents minūtes laikā – 125 automašīnas, ass svars – 212 kg;
- (2) HDV smagā autotransporta simulators, reprezentē 1 kravas automašīnas slodzi; kustības ātrums – 25 km/h; nobraukums – 4 m; garāmbraucošu auto ekvivalents minūtes laikā – 100 automašīnas, ass svars – 6570 kg.

Kā redzams no rezultātiem 2.tabulā, pastāv milzīgas atšķirības resuspensijai, salīdzinot asfaltbetonu un porainu betonu. Līdz ar to ir lietderīgi (un arī interesanti) uzzināt, kā virsmas porainība ietekmē deponētā materiāla resuspensiju. Lai to novērtētu, uz virsmas tika nosēdināts zināms daudzums (10 g) sausu, ļoti smalku daļiņu un pēc tam iedarbināts LDV simulators. 1.1.12.attēlā parādītas resuspensijas procesa emisijas faktoru izmaiņas laikā - salīdzinoši augstas emisijas faktoru vērtības novērojamas pirmo 30 minūšu laikā, abrāziju šajā periodā faktiski var neņemt vērā. Ir arī redzams, ka resuspensija praktiski visā novērojumu periodā (1 h laikā) ir augstāka uz asfaltbetona virsmas. Šķiet, ka poraina virsma ir spējīga labāk saistīt (uztvert, iekļaut sevī) smalkās daļiņas nekā gluda virsma. Tas varētu būt efektīvs instruments resuspensijas ietekmes mazināšanai, tomēr jāņem vērā, ka eksperimenti veikti jaunām virsmām.

Bez tam, lietus gadījumā, automašīnām kustoties, novērojama porainā materiāla attīrīšanās un smalko daļiņu notece kopā ar lietusūdeņiem. Pateicoties šim pašattīrīšanās procesam, porainā materiāla īpašības saistīt sīkās daļiņas saglabājas ilgstoši. Tomēr jāatzīmē, ka eksperiments veikts izmantojot 1 simulatoru un reālajā dzīvē resuspensijas process novērojams katrai automašīnai.



1.1.12.attēls. Resuspensijas emisijas faktoru izmaiņas laikā, LDV simulators; kreisajā pusē – mērījumu rezultātu kopskats, labajā pusē – detalizēts skats attiecībā pret Y ass sākumu. Apzīmējumi: PA11 – porains asfalts; AC11 – asfaltbetons

Bremžu nodiluma rezultātā emitēto daļiņu izmēri ir robežās no dažiem simtiem nm līdz dažiem desmitiem μ m. Tā kā bremžu nodilums faktiski ir mehānisko procesu rezultāts, tad vairāk dominē lielākā izmēra daļiņas. Emisijas ir atkarīgas no kustības ātruma, transporta līdzekļa svara, bremzēšanas biežuma, transporta līdzekļa tehniskā stāvokļa. Citos iepriekš veiktos pētījumos (*Cha et al., 1983*) konstatēts, ka bremžu nodiluma gadījumā 90% daļiņu diametrs ir lielāks par 1 μ m, pīķa diapazons – 2,1 - 3,3 μ m. Jāpiemin, ka šajā pētījumā tika testētas azbestu saturošas bremzes, kas nozīmē, ka šie pētījumi mūsdienās nav aktuāli, jo šādu materiālu izmantošana (jaunām automašīnām) vairs nav atļauta.

Vēl citā pētījumā (*Garg et al., 2000*) konstatēts, ka 86% no visām cietajām daļiņām ir PM_{10} , 63% - $PM_{2.5}$, un 31% - $PM_{0.1}$. Tiek pieņemts, ka lielāko daļiņu rašanās saistāma ar gaistošo organisko savienojumu iztvaikošanu un kondensēšanos.

Berzes rezultātā atmosfērā nonākušo riepu materiāla daļiņu izmēri var būt arī lielāki par 2,5 μ m, kā arī bieži vien ir liels to daļiņu īpatsvars, kā izmēri ir lielāki pat par 10 μ m. Ne visas daļiņas, kas radušās berzes ceļā, nonāk gaisā, daļa (pēc izmēriem lielākā) no tām tūlītēji nosēžas gravitācijas spēka ietekmē. Bez tam, dažos pētījumos konstatēts, ka gumijas daļiņas ir lādētas, līdz ar to tās viegli pieķeras automašīnas virsbūvei. Šo faktu gan ir ļoti grūti pierādīt (*Hildemann et al., 1991; Rogge et al., 1993*).

Savukārt citos pētījumos konstatēts, ka riepu nodiluma daļiņu vidējais diametrs ir 20 μ m un pastāv tikai dažas daļiņas, kā izmēri ir mazāki par 3 μ m. Atbilstoši citiem pētījumiem PM₃ < 10% (*Dannis, 1974; Pierson and Brachaczek, 1974*). Kā zināms, šāda izmēra daļiņu noturība atmosfērā ir neliela jeb to dzīves ilgums ir īss.

Laboratoriskos eksperimentos konstatēts, ka riepu nodiluma daļiņu izmēri var būt gan mazāki par 100 nm, gan arī lielāki par 30 µm. Sīkāko daļiņu klātbūtne skaidrojama ar atkārtoti kondensētā materiāla (piemēram, polimēru) iztvaikošanu. Savukārt 1999.gadā veiktajā pētījumā konstatēts, ka 90% no riepu nodiluma daļiņām ir mazākas par 1 µm (*Cadle and Williams, 1978; Fauser, 1999*).

2010.gadā veiktā pētījumā (*Mathissen et al., 2011*) mēģināts ielas apstākļos novērtēt PM emisijas dažādiem braukšanas stiliem. 1.1.13.attēlā parādīti paraugu ņemšanas punkti, bet 1.1.14 - rezultāti.



1.1.13.attēls. Paraugu ņemšanas vietu attēlojums abrāzijas procesu raksturošanai: (1) riepas un ceļa seguma kontakta vieta; (2) – (4) paraugu ņemšanas vietas, kas vertikāli izlīdzinātas protektora segumā; (5) fona mērījums; (B) bremžu disku nodiluma vieta (*Mathissen et al.*, 2011)

Vidējā fona koncentrācija visos testos bija 3000 - 8000#/cm³ (vidējā - 5100 ± 1400 #/cm³).



1.1.14.attēls. Cieto daļiņu izmaiņas atkarībā no taisnvirziena kustībā esoša transporta līdzekļa braukšanas ātruma. Paskaidrojumi no augšas: 1.attēls – kustības ātrums;
2.attēls – PM frakcionārais sadalījums; 3.attēls – PM skaita izmaiņas; 4.attēls – PM koncentrācija dažādos braukšanas ātrumos, novirzes norāda 68 procentili (*Mathissen et al.*, 2011)

Tāpat emisiju testi veikti, automašīnai kustoties pa apli (tā diametrs 48 m) ar dažādiem kustības ātrumiem – 30 km/h un 48 km/h. Lēnākās kustības gadījumā PM koncentrācija praktiski neatšķīrās no fona koncentrācijas (skat. 1.1.15.attēlu), šajā gadījumā papildus sīko daļiņu veidošanās kustības ātruma un laterālās bremzēšanas dēļ netika novērota, ko var izskaidrot ar to, ka šāds ātrums ir nepietiekams, lai berzes rezultātā temperatūra paaugstinātos tik ļoti, lai sāktu iztvaikot riepu sastāvā esošā gaistošā daļa. Savukārt palielinoties ātrumam, daļiņu skaits būtiski palielinās (līdz pat 3,5×10⁶/cm³) – mērījumu rezultāti 1.pozīcijā. Daļiņu skaits, kas noteikts 3.pozīcijā ir būtiski mazāks (~ 100 reizes), kā arī novērojama liela mērījumu nenoteiktība (1.1.16.attēls).



1.1.15.attēls. PM emisijas faktoru variācijas atkarībā no braukšanas ātruma, braukšanas nosacījumi – taisnvirziena kustība (*Mathissen et al., 2011*)



1.1.16.attēls. Apļveida kustības (\emptyset = 48 m; 30 km/h) testēšanas rezultāti. Attēlu skaidrojumi no augšas: 1.attēls. Transporta līdzekļa kustības ātrums; 2.attēls. PM frakcionārais sadalījums; 3.attēls. Kopējā daļiņu koncentrācija (*Mathissen et al.*, 2011)

Izmērāmas PM koncentrācijas izmaiņas normālas sajūga izmantošanas gadījumā, paātrinājumam nepārsniedzot 2,4 m/s², netika novērotas (lietojot riepas bez radzēm). Būtiskas PM izmaiņas tika konstatētas tikai ļoti strauji uzsākot braukšanu un gadījumos, ja tika izmantotas riepas ar radzēm, šajā gadījumā konstatēto daļiņu izmēri bija robežās no 30 - 60 nm, bet to apmērs praktiski līdzvērtīgs kā apļveida kustības gadījumā.

Bremzēšanas ietekme (līdz 5 m/s²) praktiski netika novērota, tika konstatēts tikai neliels salīdzinoši lielāko daļiņu (> 200 nm) palielinājums mērījumu punktā (B), t.i., tuvu bremžu diskam. Normālos braukšanas apstākļos (bremzēšana < 3 m/s²) sīko daļiņu piesārņojuma palielinājums nav sagaidāms. Izmantojot ABS bremzēšanas sistēmu, līdz ar to samazinot riepu bloķēšanos, samazinās arī PM skaita izmaiņas, 1.1.17. un 1.1.18.attēlā parādītas PM koncentrāciju atšķirības, izmantojot ABS dažādu kustības ātrumu gadījumos.

1.1.17.attēls. Augšējais attēls – PM sadalījums dažādiem braukšanas režīmiem mērījumu punktos (1) un (B). Apakšējais attēls – kopējā maksimālā PM koncentrācija 157 ABS bremzēšanas gadījumiem ar sākotnējo kustības ātrumu 100 km/h

1.1.18.attēls. (a) bremzēšana, izmantojot ABS, ar sākotnējo kustības ātrumu 30 km/h; b) bremzēšana, izmantojot ABS, ar sākotnējo kustības ātrumu 100 km/h. Attēlu skaidrojums no augšas uz leju: 1.attēls. Kustības ātrums. 2.attēls. PM frakcionārais sadalījums. 3.attēls. PM kopējā koncentrācija. Mērījumi veikti punktā (1)

PM frakcionārais sadalījums ABS bremzēšanas gadījumā mērījumu punktā tuvu riepuceļa virsmas segumam ir bimodāls, nukleācijas stāvoklis novērojams pavisam sīkām daļiņām (< 10 nm), savukārt otrs dominējošais daļiņu īpatsvars ir robežās no 30 – 60 nm. Sākotnējā kustības ātruma 100 km/h gadījumā ABS bremzēšanas rezultātā iegūto daļiņu sadalījums ir analogs (salīdzināms) ar daļiņu sadalījumu uzsākšanas un apļveida kustības gadījumā. Salīdzinājumam, sākotnējā ātruma 30 km/h gadījumā, pielietojot ABS, daļiņu sadalījums ir unimodāls, netiek novērota nukleācijai pakļautā daļiņu grupa, kā arī sadalījums tiek nobīdīts pa labi - tiek novērotas daļiņas ar lielāku diametru (70 - 90 nm). Iespējamais atšķirību iemesls – sākotnējā ātruma 30 km/h gadījumā ir atšķirīga ABS aktivizācijas shēma – 100 km/h gadījumā ABS darbojas vairāk tādā kā pumpēšanas režīmā, periodiski atlaižot bremzēšanu, un līdz ar to novēršot iespējamo bremžu bloķēšanos, 30 km/h kustības gadījumā bremžu bloķēšanās nav tik bīstama. Šis pieņēmums apstiprinājās videonovērošanas laikā.

Temperatūras paaugstināšanās bremzēšanas laikā, izmantojot ABS, novērota ~ 10 K apmērā (30 km/h) un 100 K apmērā (100 km/h). Netika konstatētas nekādas sakarības starp bremžu disku temperatūru un daļiņu koncentrāciju, tomēr, temperatūrai paaugstinoties līdz 500 °C, augstas PM koncentrācijas tika novērotas mērījumu punktā tuvu bremžu diskiem (B) pat tādos gadījumos, kad bremzes vēl netika lietotas. Acīmredzot šis piesārņojums saistīts ar gaistošo materiālu iztvaikošanu.

Novērtējot PM frakcionāro sadalījumu bremžu disku tuvumā (B), konstatēts, ka, palielinoties kustības ātrumam, daļiņu koncentrācija palielinās eksponenciāli, ABS bremzēšanas gadījumā daļiņu sadalījums ir unimodāls un dominējošais diametrs 11 nm, kas nozīmē, ka, iespējams, to izcelsme ir nukleācijas procesi.

1.2. Cieto daļiņu emisiju sastāva novērtējums

Atsevišķu procesu abrāzijas efektu iespējams novērtēt, izmantojot t.s. procesa indikatorus – elementus, kas raksturo konkrēto detaļu nodilumu. Šādi iespējams novērtēt:

- abrāziju no mobilo simulatoru kustīgām detaļām (ķēdēm, elektromotoriem, bremžu diskiem);
- (2) riepu nodilumu.

Kā indikatorelementi iepriekš minēto procesu ietekmes novērtējumam izmantoti dzelzs (Fe) un cinks (Zn). Tiek pieņemts, ka kustīgo detaļu sastāvā dominē Fe, savukārt Zn tiek izmantots kā vulkanizācijas procesa paātrinātājs riepu vulkanizēšanas procesā (Zn saturs riepā ~ 1%). Pētījumā konstatēts, ka izmērāmas Fe un Zn koncentrāciju atšķirības (no fona) konstatētas tikai LDV simulatora gadījumā. Pētījuma rezultāti apkopoti 3.tabulā.

3.tabula

	Fe	Zn	Riepa (1% Zn)
Kopējā koncentrācija, μg/m ³	1	0,02	2,0
Emisijas faktors 1 ritenim, mg/km	0,03	0,001	0,067
Emisijas faktors LDV, mg/km	0,40	0,008	0,80

Dzelzs un cinka emisijas faktori (Gehrig et al., 2010)

Arī citos pētījumos (*Stein et al., 2009*) konstatēts, ka PM₁₀ emisija no riepām nepārsniedz 0,5% no kopējā PM līmeņa.

Bremžu nodiluma emisijas atkarīgas no bremžu materiāla un braukšanas stila. Novērtēšana ir sarežģīta lielo nenoteiktību dēļ – ne vienmēr ir zināms sastāvs (ne visi ražotāji šādu informāciju sniedz), plūsma ir pārāk dažāda (dažādu ražotāju automašīnas). Parasti bremzes sastāv no šādiem materiāliem:

- (1) šķiedras nodrošina mehānisko stiprību, dažādi metāli, ogleklis, stikls, Kevlars (materiāla tirdzniecības nosaukums, sastāv no vieglām sintētiskām šķiedrām, kas ir mehāniski un termiski izturīgas; to sastāvs 6 - 35%);
- (2) abrazīvie materiāli kalpo, lai palielinātu berzi, nodrošinātu tīrību starp kontaktvirsmām; satur Al oksīdus, Fe oksīdus, kvarcu, cirkonu; sastāvs ~ 10%;
- (3) lubrikanti daudzums 5 29%, stabilizē berzes procesu, jo īpaši augstas temperatūras apstākļos, satur grafītu un dažādu metālu sulfīdus (piemēram, antimona trisulfīdu Sb₂S₃);
- (4) piedevas komerciāli lētas piedevas, kas tiek pievienotas, lai samazinātu izmaksas; saturs 15 70%; bārija sulfāts (BaSO₄), kalcija karbonāts (CaCO₃), vizla;
- (5) saistvielas nodrošina strukturālo viendabību mehāniskā un termiskā stresa apstākļos (*Thorpe and Harrison, 2008*).

Kā redzams, sastāvdaļu variācijas iespējas ir milzīgas, parasti visas sastāvdaļas tiek iedalītas 3 galvenajās grupās (skat. 4.tabulu)

4.tabula

Klasifikācija	Ingredienti		
Metāliskās sastāvdaļas	Metāliskas, tērauda šķiedras, vara šķiedras		
Daļēji metāliskās sastāvdaļas	Organisko un metālisko ingredientu maisījums (30 - 60%)		
Bez-azbesta organiskās sastāvdaļas	Minerālšķiedras, grafīts		

Bremžu disku sastāvdaļu iedalījums (Chan and Stachowiak, 2004)

Tā kā modernās bremzes ir dažādu sastāvdaļu kompozītmateriāls un emisiju sastāvs ir atkarīgs no tā, tomēr, saskaņā ar vairāku pētījumu rezultātiem, emisijās dominē Fe, Cu, Pb un Zn. Cieto daļiņu ķīmiskā sastāva raksturojumu bremžu disku nodiluma rezultātā skat. 5.tabulā.

Aplēsts, ka Apvienotajā Karalistē riepu nodiluma rezultātā ik gadu atmosfērā nonāk 53×10^6 kg PM₁₀ (*Environment Agency, 1998*), un tiek uzskatīts, ka šis varētu būt viens no lielākajiem ne-izplūdes PM emisijas avotiem pēc resuspensijas (*Lukewille et al., 2001*), kaut gan, saskaņā ar pēdējiem indikatīvajiem aprēķiniem, bremžu nodiluma emisijas sāk prevalēt (*Thorpe et al., 2007*).

Riepai, saskaroties ar ceļa virsmu, berzes rezultātā atmosfērā nonāk riepu nodiluma daļiņas. Daļiņu izmēri, daudzums un ķīmiskais sastāvs ir atkarīgs no vairākiem faktoriem – riepu raksturojuma, ceļu virsmas konstruktīvā risinājuma, transporta līdzekļa veida un tehniskā stāvokļa, kā arī no braukšanas režīma.

Bremžu disku nodiluma galvenās sasāvdaļas

(Hildemann et al., 1991; Legret and Pagotto, 1999; Garg et al., 2000; Kennedy et al., 2002; Westerlund and Johansson, 2002; Kennedy and Gadd, 2003)

Metāls	Bremžu sastāvdaļa, mg/kg	PM sastāvdaļa, mg/kg
Al	3765	330 - 2500
As	< 2 - 18	< 2 - 11
Ba	2638	5900 - 74 400
Ca	14 300	920 - 8600
Cd	< 1 - 41,4	< 0,06 - 2,6
Со	6,4 - 45,8	12 - 42,4
Cr	< 10 - 41	135 - 1320
Cu	$11 - 234\ 000$	70 – 39 400
Fe (%)	1,2 - 63,7	1,1 - 53,7
K	857	190 - 5100
Li	55,6	Nav zināms
Mg	6140	83 000
Mn	181 - 3220	620 - 5640
Мо	0,4 - 215	5 - 740
Na	15 400	80
Ni	3,6 - 660	80 - 730
Pb	1,3 – 119 000	4 - 1290
Sb	0,07 - 201	4 - 16 900
Se	< 1 - 15	4,5 - 115
Sr	81,4	300 - 990
Zn	25 - 188 000	120 - 27 300

Piezīme: tabulā izceltas tās vielas, kā īpatsvars bremžu nodiluma rezultātā ir lielākais

Līdzīgi kā bremžu gadījumā, riepu sastāvs ir ļoti daudzveidīgs, piemēram, smago automašīnu riepu sastāvs būtiski atšķiras no vieglo automašīnu riepām, kas saistīts ar papildus slodzi. Pasažieru automašīnu riepu sastāvs dots 6.tabulā.

6.tabula

Automašīnu riepu galvenās sastāvdaļas (Environment Agency, 1998; Gadd and Kennedy, 2003; Milani et al., 2004)

Komponents	Sastāvs, %
Gumija (ogļūdeņraži)	47 - 55
Ogleklis	22 - 30
Eļļas piedevas (ogļūdeņraži)	5
Sveķi	5
Konservēšanas piedevas, aktivatori	3 - 5
Citas piedevas	2 - 10

Riepu nodiluma daļiņu ķīmiskais sastāvs apkopots 7.tabulā.

7.tabula

Metāls	Hildermann et al., 1991	Legret and Pagotto, 1999	Kennedy and Gadd, 2003
Al	470	-	7 - 129
Ba	370	-	10,4 - 166
Ca	2000	-	100 - 1680
Cd	-	2,6	< 0,05 - 0,34
Со	-	-	0,5 - 4,1
Cr	30	-	< 1 - 2
Cu	490	1,8	< 1 - 2
Fe	4600	-	40 - 220
К	380	-	110 - 410
Mg	-	-	< 4 - 37
Mn	100	-	0,8 - 2,5
Na	-	-	120 - 530
Ni	50	-	< 1 - 3
Pb	160	6,3	1 - 5,7
Sb	-	-	< 0,2 - 0,9
Sr	40	-	< 0,5 - 2,6
Ti	560	-	_
Zn	430	10 250	5650 - 9640

Metālu koncentrācija automašīnu riepu protektoros

Riepu nodiluma daļiņas galvenokārt ir saistāmas ar organisko savienojumu emisiju, aptuveni 13% ir neorganiskās daļas, kā arī ir sastopami daži mikroelementi – Cd, Cu, Pb un Zn. Īpaši liela uzmanība jāpievērš Zn, jo tas ir riepu sastāvā (~ 1%). Cd un Pb ir sastopami gumijas sastāvā.

2. EMISIJAS FAKTORU METODE CIETO DAĻIŅU EMISIJU NOVĒRTĒŠANAI

ASV Vides aizsardzības aģentūras emisijas faktoru metodes (USEPA, 2011) pamatā ir vairāku gadu garumā veikti mērījumi, pamatojoties uz kuriem, izstrādāti emisijas faktori.

Analizējot pētījumu rezultātus, konstatēts, ka būtisks cieto daļiņu piesārņojuma avots ir autoceļu ne-izplūdes PM emisijas, kas atkarīgas no vairākiem faktoriem – autoceļu apsaimniekošanas prakses (pretslīdes materiālu lietošanas), vēja erozijas rezultātā atnestu cieto daļiņu daudzuma u.c. faktoriem. Tomēr, ja kādu laiku ilgstoši nav lietoti nekādi pretslīdes materiāli un nav nekādu citu ārējo avotu, pēc kāda laika iestājas līdzsvars un resuspensijas īpatsvars ir nemainīgs un atkarīgs no:

- transporta līdzekļu kustības ātruma;
- vidējās diennakts automašīnu plūsmas (ADT);
- ➢ joslu skaita;
- transporta līdzekļu skaita pa joslām;
- smago transporta līdzekļu (kravas un autobusu) īpatsvara kopējā plūsmā;
- brauktuves nomaļu, stāvvietu un kanalizācijas noteku esamība vai neesamība.

Tiek pieņemts, ka cieto daļiņu emisijas ir atkarīgas no t.s. "smilšu slodzes" faktora (sL), kas attiecināms uz cieto daļiņu (ar izmēru līdz 75 μm) klātesamību uz konkrētā autoceļa.

Emisijas, kas tiek aprēķinātas pēc šīs metodes, attiecināmas tikai uz resuspensiju. Riepu un bremžu nodiluma aprēķiniem tiek rekomendēts izmantot ASV Vides aizsardzības aģentūrā izstrādātās programmas *MOBILE6.2* un *MOVES2010*.

Emisijas faktoru aprēķins:

$$E = k \left(L_{\perp}^{7.91} \times \left(V_{\perp}^{7.02} \right), \text{ kur} \right)$$
(3)

E – cieto daļiņu emisijas faktors;

k – reizinātājs, kas attiecināms uz noteikta izmēra daļiņām (PM_{2.5}; PM₁₀; PM₁₅; PM₃₀) un nosaka emisijas faktora mērvienības (skat. 8.tabulu);

 $sL - smilšu slodzes faktors, g/m^2;$

W – transporta līdzekļu vidējais svars, t (piemēram, ja 99% no visiem transporta līdzekļiem ir 2 t smagi, savukārt 1% ir 20 t smags, tad vidējais svars ir 2,2 t).

Iepriekšējais vienādojums nav paredzēts, lai aprēķinātu katras transporta līdzekļu klases radīto PM piesārņojumu.

DM :	Izmēra reizinātājs, k			
PM izmers	g/VKT	g/VMT	lb/VMT	
PM _{2.5}	0,15	0,25	0,00054	
PM_{10}	0,62	1,00	0,0022	
PM ₁₅	0,77	1,23	0,0027	
PM_{30}	3,23	5,24	0,011	

Reizinātājfaktors emisijas faktora aprēķinam dažāda izmēra daļiņām

VKT - transporta līdzekļu skaits, kas nobrauc kilometru;

VMT – transporta līdzekļu skaits, kas nobrauc jūdzi;

PM_{2.5}- attiecināms uz vidējo PM_{2.5}/ PM₁₀ attiecību (US EPA, 1997);

 PM_{30} – dažkārt tiek aizstāts ar terminu "suspendētās daļiņas" (SP) vai kā aizvietotājs terminam TSP (kopējās suspendētās daļiņas).

Vienādojums (3) ir empīrisks novērtējums, pamatojoties uz testiem dažāda veida noslodzes ceļos (kopā 83 testi), tai skaitā sastrēguma stundām (22 testi). Testēšanas apstākļi:

- > smilšu slodzes faktors $-0.03 400 \text{ g/m}^2$;
- ➢ vidējais transporta līdzekļu kustības ātrums − 1 88 km/h;
- ➢ vidējais transporta līdzekļu svars − 1,8 38 t.

Novērtējuma lielākās problēmas parasti saistāmas ar smilšu slodzes faktora noteikšanu, šādi mērījumi lielākoties nav pieejami, tādēļ novērtējumam tiek piedāvāta speciāla metode (*USEPA*, 2011, Appendices C1 un C2), tomēr, ja arī šāds novērtējums nav iespējams, tiek piedāvātas vispārinātas vērtības (skat. 9.tabulu).

9.tabula

ADT kategorija	< 500	500 - 5000	5000 - 10000	> 10000
Parasti apstākļi, g/m ²	0,6	0,2	0,06	0,03 0,015 (ierobežotas pieejamība)
Reizinātājs attiecībā pret parastiem apstākļiem (piemēram, ziemas mēnešiem ar nokrišņiem)	X4	X3	X2	X1
Pretslīdes abrazīvu materiālu lietošana, g/m ²	2	2	2	2
Dienu skaits, kas nepieciešams, lai nonāktu sākuma stāvoklī ("parastos apstākļos"), lineārā dilšana	7	3	1	0,5

Smilšu slodzes faktora vispārinātās vērtības

Gadījumos, kad tiek izmantotas t.s. vispārinātās smilšu slodzes faktora vērtības (no 9.tabulas), jāņem vērā, ka šo vērtību kvalitātes rādītājs reitingā samazinās par vismaz 2

vietām. Kopumā emisijas vienādojuma kvalitāte ir vērtēta ar kvalitātes rādītāju A (atbilst augstai kvalitātei un ir pamatota ar atkārtotiem mērījumiem), savukārt, izmantojot vispārinātās vērtības, kvalitāte samazinās līdz vidējai, līdz ar to jārēķinās ar augstāku nenoteiktību.

Ņemot vērā to, ka iepriekš piedāvātais emisijas faktora aprēķins ir vispārīgs, vienādojumu iespējams modificēt un piemērot atšķirīgiem laika periodiem, ņemot vērā nokrišņu esamību:

$$E_{ext} = \int \langle L \rangle^{0.91} \times \langle V \rangle^{1.02} \times \left(1 - \frac{P}{4N} \right), \text{ kur}$$
(4)

Eext – cieto daļiņu emisijas faktors gadam vai ilgtermiņam;

k – reizinātājs, kas attiecināms uz noteikta izmēra daļiņām (PM_{2.5}; PM₁₀; PM₁₅; PM₃₀) un nosaka emisijas faktora mērvienības;

sL – smilšu slodzes faktors, g/m²;

W - transporta līdzekļu vidējais svars, t;

P-t.s. "mitro dienu" skaits, kad nokrišņu skaits bijis vismaz 0,254 mm vidējojot laikā;

N – novērtējuma perioda dienu skaits (gadam – 365 dienas, sezonai – 91 diena, mēnesim – 30 dienas).

Emisijas faktora aprēķins 1 stundas periodam:

$$E_{ext} = \left[\underbrace{\P L}_{\checkmark}^{\textcircled{0.91}} \times \underbrace{\P L}_{\checkmark}^{\textcircled{1.02}} \times \left[1 - \frac{1.2P}{N} \right], \text{ kur} \right]$$
(5)

Eext – cieto daļiņu emisijas faktors 1 stundai;

k – reizinātājs, kas attiecināms uz noteikta izmēra daļiņām (PM_{2.5}; PM₁₀; PM₁₅; PM₃₀) un nosaka emisijas faktora mērvienības;

 $sL - smilšu slodzes faktors, g/m^2;$

W - transporta līdzekļu vidējais svars, t;

P – t.s. "lietus stundu" skaits, kad nokrišņu skaits bijis vismaz 0,254 mm;

N – stundu skaits kopējā novērtējuma periodā (gadam – 8760 stundas, sezonai – 2124 stundas, mēnesim – 720 stundas).

Emisijas faktoru izmaiņas (mērījumu rezultāti) dažādām ceļa kopšanas tehnoloģijām apkopotas 10.tabulā.

10.tabula

		TP, lb	/VMT	PM ₁₅ , I	b/VMT	PM_{2.5}, lb/VMT	
Apstrādes veids	Testu skaits	Ģeometriskā vidējā vērtība	Diapazons	Ģeometriskā vidējā vērtība	Diapazons	Ģeometriskā vidējā vērtība	Diapazons
Bez apstrādes	7	1,22	0,29 - 5,50	0,38	0,13 - 2,14	0,10	0,04 - 0,52
Vakuuma tīrīšana	4	0,87	0,53 - 1,46	0,45	0,27 - 0,87	0,14	0,08 - 0,26
Ūdens laistīšana	4	1,43	1,30 - 1,74	0,47	0,32 - 0,65	0,08	0,08 - 0,09
Laistīšana un rotējošās birstes	4	0,96	0,54 - 2,03	0,20	0,10 - 0,49	0,07	0,04 - 0,13
Bez apstrādes	4	3,12	0,83 - 5,46	0,92	0,31 - 1,83	0,26	0,06 - 0,62

Emisijas faktoru vērtības dažādām ceļa segumu kopšanas tehnoloģijām

Gaiši zilā krāsā atzīmēti tie mērījumi, kas veikti ASV ziemeļu štatos, dzeltenā krāsā - mērījumi, kas veikti ASV dienvidu štatos.

Mērījumu ceļā iegūtie emisijas faktori un novērotie braukšanas apstākļi, kustības ātrums, transporta līdzekļu masa un smilts slodzes faktors iekļauts 11.tabulā. Saskaņā ar mērījumu rezultātiem, konstatēta apgriezeniska sakarība - palielinoties transporta līdzekļu kustības ātrumam, samazinās PM_{10} emisijas faktora vērtība, savukārt sakarība starp transporta līdzekļu svaru un emisijas faktoru ir tieši proporcionāla — palielinoties transporta līdzekļa svaram, palielinās PM_{10} emisijas faktora vērtība (skat. 2.1.attēlu). Virsmas smilts slodzes faktora vērtība nav viennozīmīgi vērtējama, iespējams satiksmes sastrēguma apstākļos smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora matis slodzes faktora ietekme nav ipaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga, savukārt lēnas braukšanas apstākļos — palielinoties smilts slodzes faktora ietekme nav īpaši nozīmīga smil

11.tabula

Braukšanas apstākļi	Transporta plūsma, skaits/stundā	Plūsmas ātrums, mph	Vidējais transporta līdzekļu svars, t	Virsmas smilts slodze, g/m ²	Izmērītais PM ₁₀ emisijas faktors, lb/VMT
Apstājas-brauc	38	nav piemērojams	36	1,16	0,059
Apstājas-brauc	32	nav piemērojams	36	0,86	0,14
Apstājas-brauc	47	nav piemērojams	39	0,86	0,1
Lēni brauc	35	5	12	1,34	0,34
Lēni brauc	48	5	13	1,34	0,051
Lēni brauc	30	5	40	1,91	0,14
Lēni brauc	28	5	40	1,41	0,17
Lēni brauc	47	14	27	0,05	0,0066
Lēni brauc	29	5	40	2,39	0,091
Lēni brauc	61	5	38	0,76	0,041

Emisijas faktora atkarība no braukšanas apstākļiem, kustības ātruma, transporta līdzekļu masas un smilts slodzes faktora

 $mph-j\bar{u}dzes/stund\bar{a}$

2.1.attēls. PM10 emisiju faktora atkarība no transporta līdzekļu svara

Lai izvērtētu dažādu faktoru ietekmes īpatsvaru, izmērītajiem PM₁₀ emisijas faktoriem, smilts slodzes faktoram, transporta līdzekļu masai un kustības ātrumam veikta regresijas analīze (analīzes rezultāti doti 12.tabulā). Konstatēts, ka kopumā tomēr pastāv cieša pozitīva sakarība starp smilts slodzes faktoru un PM₁₀ emisijas faktoru (korelācijas koeficients 0,8010), pārējiem parametriem ietekme nav tik būtiska, kaut arī vērtējama kā vērā ņemama.

12.tabula

	PM ₁₀ emisijas faktors, g/VMT	Smilts slodze, g/m ²	Transporta masa, t	Ātrums, mph
PM ₁₀ emisijas	1			
faktors, g/VMT	1			
Smilts slodze, g/m ²	0,8010	1		
Transporta masa, t	0,3280	-0,1841	1	
Ātrums, mph	-0,4066	-0,2785	-0,7784	1

PM₁₀ log-transformēto datu korelācijas matrica

2.2.attēls. PM10 emisiju faktora atkarība no transporta līdzekļu kustības ātruma

3. CIETO DAĻIŅU SAGAIDĀMAIS DZĪVES ILGUMS

Cieto daļiņu uzturēšanās ilgums atmosfērā ir atkarīgs no to izmēriem - lielāko daļiņu dzīves ilgums ir īsāks, savukārt mazākās (\emptyset 0,1 – 1,0 mikrons) atmosfērā var uzturēties vairākas dienas vai pat nedēļas. Atmosfērā nonākušās cietās daļiņas ir pakļautas vairākiem procesiem - kondensācijai, koagulācijai, higroskopiskai augšanai, ķīmiskām transformācijām, transportam jeb pārnesei un citiem procesiem.

Cietām daļiņām ir raksturīgi dažādi nosēšanās mehānismi:

- 1) gravitācijas spēka ietekmē, kas ir atkarīga no cieto daļiņu izmēriem;
- 2) Brauna difūzijas ietekmē;
- 3) slapjā nosēšanās nokrišņu formā.

3.1.attēls. Cieto daļiņu nosēšanās ātrums atmosfērā atkarībā no daļiņu diametra (pēc *Dahl, 2008*).

Sedimentācijas procesus ietekmē vairāki apstākļi, tā var būt gan sausā, gan slapjā.

A. slapjā izkrišana ir ciešā saistībā ar ūdeni un nokrišņiem; tā ietver šādus procesus:

- a. izlīšana aerosolu daļiņu (kondensācijas kodolu) augšana kondensācijas apstākļos ar tam sekojošu izlīšanu pilieniņu veidā;
- b. izskalošana lietus pilieniņu agregācija un sekojoša izlīšana; šajā gadījumā aerosolu daļiņas ir pilienu iekšienē, izskalošana notiek nokrišņu veidā;
- c. izskalošana no aerosolu fāzes atmosfērā esošas aerosolu daļiņas lietus laikā nokļūst lietus pilieniņos, kā rezultātā, līdzīgi kā izskalošanas procesā, uz zemes virsmas nonāk lietus veidā.
- B. sausajā izkrišanā aerosoli nokļūst uz zemes virsmas bez nokrišņu palīdzības; parasti sauso izkrišanu raksturo ar sausās izkrišanas ātrumu. Vismazākais sausās izkrišanas ātrums ir akumulācijas lieluma aerosoliem. Sausās izkrišanas ātrums palielinās, pārsniedzot daļiņu izmērus 1 µm.

KOPSAVILKUMS UN SECINĀJUMI

Abrāzijas procesu ietekmes novērtēšanai pasaulē galvenokārt tiek izmantotas 2 metodes:

- autotransporta simulatori (tie var būt gan lineāri, gan cirkulāri, kā arī tie var būt mērījumi dabiskā ielas vidē);
- emisijas faktoru metodes, kas gan nav iesakāmas lielo nenoteiktību dēļ, kā rezultātā aprēķinos iegūtās emisijas ir ar salīdzinoši viduvēju ticamību.

Ne-izplūdes gāzu PM emisijas vispārīgi tiek iedalītas 2 grupās – daļiņas, kā izmēri ir lielāki par 30 mikroniem (rupjās daļiņas, kas salīdzinoši ātri nosēžas turpat brauktuves tuvumā) un to izcelsme galvenokārt saistīta ar resuspensiju, un daļiņas, kā izmēri ir mazāki par 30 mikroniem. Šīs mazākās daļiņas tiek pētītas sīkāk, lai novērtētu izcelsmi (riepas, ceļa segums, bremžu disku nodilums) un ietekmējošos faktorus (braukšanas stils un apstākļi, transporta līdzekļa veids un tehniskais stāvoklis, brauktuves tips).

Galvenās atziņas, kas iegūtas šīs analīzes laikā:

- (1) Izplūdes gāzu cieto daļiņu emisijas pēc apjoma ir līdzvērtīgas resuspensijas procesa emisijām, tomēr abrāzijas procesu norises īpatnības un lielās nenoteiktības neļauj precīzi kvantitatīvi novērtēt šo procesu radītās cieto daļiņu emisijas. Saskaņā ar pētījumu rezultātiem, to apjoms mainās milzīgās robežās no līdzvērtīgām emisijām (salīdzinot ar resuspensiju) līdz 10% apmērā no tām.
- (2) Abrāzijas procesi palielina galvenokārt smalko daļiņu ($\emptyset < 100$ nm) frakcijas īpatsvaru kopējā PM₁₀ frakcijā.
- (3) Radžotu riepu gadījumā mainās PM frakcionārais spektrs sadalījuma līkne nobīdās pa labi vidēji par 20 nm.
- (4) Riepu materiāla daļiņu izmēri parasti ir mazāki par 200 nm, savukārt ceļa seguma daļiņu izmēri ir lielāki par 320 nm.
- (5) Palielinoties ātrumam, palielinās PM abrāzija. Abrāzijas efektu bieži vien nenovēro vispār, ja kustības ātrums ir < 30 km/h.</p>
- (6) Blīvākiem un monolītākiem ceļu segumiem raksturīgas zemākas PM abrāzijas vērtības.
- (7) Mehāniskā stresa rezultātā (palielinoties kustības ātrumam, palielinās berze un līdz ar to arī temperatūra) un abrāzijas procesā radušos daļiņu diametrs samazinās.
- (8) Poraina betona gadījumā emisijas faktoru vērtības ir vidēji 15 reizes zemākas, salīdzinot ar blīvu asfaltbetonu, kas skaidrojams ar to, ka poraina virsma ir spējīga labāk saistīt (uztvert, iekļaut sevī) smalkās daļiņas nekā gluda virsma. Tas varētu būt efektīvs instruments resuspensijas ietekmes mazināšanai (jāņem gan vērā tas, ka eksperiments veikts laboratorijas apstākļos jaunai virsmai). Pie tam konstatēts, ka lietus gadījumā, automašīnām kustoties, novērojama porainā materiāla attīrīšanās un smalko daļiņu notece kopā ar lietusūdeņiem. Pateicoties šim pašattīrīšanās procesam, porainā materiāla īpašības saistīt sīkās daļiņas saglabājas ilgstoši.
- (9) taisnvirziena automašīnu kustības gadījumā, palielinoties ātrumam, palielinās arī cieto daļiņu koncentrācija un to noteikšanas nenoteiktības robežas (izkliedes diapazons).

- (10) apļveida kustības gadījumā cieto daļiņu koncentrācija būtiski neatšķiras no fona koncentrācijas, ja kustības ātrums ir mazāks par 30 km/h, savukārt, palielinoties ātrumam, daļiņu skaits būtiski palielinās.
- (11) Cieto daļiņu frakcionārais sadalījums ABS bremzēšanas gadījumā mērījumu punktā tuvu riepu-ceļa virsmas segumam ir bimodāls, nukleācijas stāvoklis novērojams pavisam sīkām daļiņām (< 10 nm), savukārt otrs dominējošais daļiņu īpatsvars ir robežās no 30 60 nm. Bez tam ABS sistēmas lietošanas laikā nelieliem kustības ātrumiem (< 30 km/h) emisijās konstatētas lielākas daļiņas, t.i. PM frakcionārais sadalījums ir nobīdīts pa labi, kas saistīts ar ABS sistēmas darbības specifiku.</p>
- (12) pretslīdes materiālu lietošana emisijas faktoru vērtību var paaugstināt pat četras reizes.
- (13) Atsevišķu abrāzijas procesu novērtēšanai bieži tiek izmantoti šo procesu indikatori:
 - mobilo kustīgo detaļu nodilumam dzelzs koncentrācijas PM frakcijā;
 - riepu nodilumam cinka koncentrācijas PM frakcijā (Zn tiek izmantots kā vulkanizācijas procesa paātrinātājs riepu vulkanizēšanas procesā un tā saturs automašīnas riepā ~ 1%).
- (14) Gan automašīnu riepu, gan kustīgo detaļu elementu sastāvs ir ļoti mainīgs, tādēļ ir praktiski neiespējami paredzēt visu sastāvdaļu daudzumu cieto daļiņu frakcijā, bet tiek pieņemts, ka dominējošās sastāvdaļas ir dzelzs, varš, svins un cinks.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

AckermannLiebrich U., Leuenberger P., Schwartz J., Schindler C., Monn C., Bolognini C., Bongard J.P., Brandli O., Domenighetti G., Elsasser S., Grize L., Karrer W., Keller R., KellerWossidlo H., Kunzli N., Martin B.W., Medici T.C., Perruchoud A.P., Schoni M.H., Tschopp J.M., Villiger B., Wuthrich B., Zellweger J.P., and Zemp E., 1997. Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 155(1), 122-129.

Adachi K., Tainosho Y., 2004. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. Environment International 30, 1009–1017.

Amato F., Querol X., Johansson C., Nagl C., Alastuey A, 2010. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods. Science of the Total Environment 408, 3070–3084.

APEG (Airborne Particles Expert Group), 1999. Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom. DETR, London, UK.

Boonyatumanond R., Murakami M., Wattayakorn G., Togo A., Takada H., 2007. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust in a tropical Asian mega-city, Bangkok, Thailand. Science of the Total Environment 384, 420–432.

BraunFahrlander C., Vuille J.C., Sennhauser F.H., Neu U., Kunzle T., Grize L., Gassner M., Minder C., Schindler, C., Varonier, H.S., and Wuthrich B., 1997. Respiratory health and long-term exposure to air pollutants in Swiss schoolchildren, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 155(3), 1042-1049.

CAC, 2004. The Benefits of Concrete Highways, Concrete Thinking in Transport Solution. Cement Association of Canada. Printed in Canada. Part Number: TPCH- 006.

Cadle S.H., Williams R.L., 1978 Gas and particle emissions from automobile tires in laboratory and field studies. Rubber Chem & Technol, 52, 146–58.

Cha S., Carter P., Bradow R., 1983. Simulation of automobile brake wear dynamics and estimation of emissions. SAE Paper 831036. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

Chan D., Stachowiak G.W.,2004. Review of automotive brake friction materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Automobile Engineering, 218D, 953–66.

ChemRisk, Inc., DIK, Inc., July 2008. State of Knowledge Report for Tire Materials and Tire Wear Particles. ChemRisk, Inc., Pittsburgh, PA; San Francisco, CA, USA. DIK Inc., Hannover, Germany.

Chow J.C., Watson J.G., Lowenthal D.H., Frazier C.A., Hinsvark B.A., Pritchett L.C., 1992 Wintertime PM10 and PM2.5 chemical compositions and source contributions in Tucson, Arizona. In: Chow JC, Ono DM, editors. Transactions, PM10 Standards and Nontraditional Particulate Controls. Pittsburgh, Pennsylvania: Air Waste Management Assoc., 311–323;

Dahl A., Gharibi A., Swietlicki E., Gudmundsson A., Bohgard M., Ljungman A., Blomqvist G., Gustafsson M., 2006. Traffic-generated emissions of ultrafine particles from pavement–tire interface, Atmospheric Environment 40, 1314–1323.

Dahl E., 2008. Aerosols Physical Characteristics. State University of New York College of Environmental Science and Forestry.

Dannis M.L., 1974. Rubber dust from the normal wear of tires. Rubber Chem & Techn, 47, 1011–37.

Dockery D.W., Pope,C.A., 1994. Acute Respiratory Effects of Particulate Air-Pollution, Annual Review of Public Health 15, 107-132.

EMEP/CORINAIR, 2004. Emission Inventory Guidebook, third ed. European Environment Agency, September 2004

Environment Agency, 1998. Tyres and the environment. London: Environment Agency.

Fauser P., 1999. Particulate air pollution with emphasis on traffic generated aerosols. Riso.

Garg B.D., Cadle S.H., Mulawa P.A., Groblicki P.J., Laroo C., Parr G.A., 2000. Brake wear particulate matter emissions. Environ Sci Technol, 34(21), 4463–9.

Gadd J., Kennedy P., 2003. Preliminary examination of organic compounds present in tyres, brake pads, and road bitumen in New Zealand, Prepared for Ministry of Transport, New Zealand, Infrastructure Auckland, Revised edition.

Gehrig R., Hill M., Buchmann B., Imhof D., Weingartner E., Baltensperger U., 2004. Infield verification of PM10 emission factors of road traffic.4th Swiss Transport Research Conference, Monte Verita/Ascona, March 25-26.

Gehrig R, Zeyer K, Bukowiecki N, Lienemann P, Poulikakos L.D., Furger M, Buchmann B., 2010. Mobile load simulators e A tool to distinguish between the emissions due to abrasion and resuspension of PM10 from road surfaces. Atmospheric Environment (44), 4937-4943.

Gualtieri, M., Andrioletti, M., Vismara, C., Milani, M., Camatini, M., 2005. Toxicity of tire debris leachates. Environment International. 31, 723–730.;

Gustafsson M., Blomqvist G., Gudmundsson A., Dahl A., Swietlicki E., Bohgard M., Lindbom J., Ljungman A., Rudell B., 2008a. Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tyres, road pavements and winter traction material. Science of the Total Environment 393, 226–240.;

Gustafsson M., Blomqvist G., Gudmundsson A., Dahl A., Jonsson P., Swietlicki E., 2008b. Factors influencing PM10 emissions from road pavement wear. Atmospheric Environment.

Hildemann LM, Markowski GR, Cass GR. Chemical-composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol. EnvironSci Technol 1991;25:744–59.

Hjortenkrans D.S.T., Bergback B.G., Haggerud A.V., 2007. Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. Environmental Science and Technology 41, 5224–5230.

Hussein T., Johansson C., Karlsson H., Hansson H.C., 2008. Factors affecting nontailpipe aerosol particle emissions from paved roads: On-road measurements in Stockholm, Sweden. Atmospheric Environment. 688–702.

KEMI, 2003. HA Oils in Automotive Tires-prospects of a National Ban. Report on a government commission. Swedish National Chemicals Inspectorate, Report No. 5/03.

Kennedy P., Gadd J., 2003. Preliminary examination of trace elements in tyres, brake pads, and road bitumen in New Zealand., Prepared for Ministry of Transport, NewZealand, InfrastructureAuckland.

Kennedy P, Gadd J, Moncrieff I., 2002. Emission factors for contaminants released by motor vehicles in New Zealand., Prepared for Ministry of Transport, New Zealand, Infrastructure Auckland.

Ketzel M., Omstedt G., Johansson C., During I., Pohjola M., Oettl D., 2007. Estimation and validation of PM2.5/PM10 exhaust and non-exhaust emission factors for practical street pollution modeling Atmospheric Environment 41(40), 9370–85.

Kim B.M., Lewis R., Hogo H., Chow J.C., 1992. Source apportionment by chemical mass balance: a comparison between measured source profiles and SAFER model estimated source profiles. In: Chow JC, Ono DM, editors. Transactions, PM10 standards and nontraditional particulate controls. Pittsburgh, Pennsylvania: Air Waste Management Assoc., 311–23..

Kuhns H., Etyemezian V., Green M., Hendrickson K., McGrown M., Barton K., 2003. Vehicle based road dust emissions measurements—Part II: effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM10 emission potentials from paved and unpaved roads. Atmospheric Environment, 37, 4573–82.

Kunzli N., Kaiser R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Horak F., Puybonnieux-Texier V., Quenel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.C., Sommer H., 2000. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, Lancet 356(9232), 795-801.

Kupiainen K., Tervahattu H., Raisanen M., 2002. Experimental studies about the impact of traction sand on urban road dust composition. The Science of the Total Environment 308, 175–184.

Legret M, Pagotto C., 1999. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. The Science of the Total Environment 235, 143–50.

Luhana L., Sokhi R., Warner L., Mao H., Boulter P., McCrae I., Wright J., Osborn D., 2004. Measurement of non-exhaust particulate matter. Project: Characterisation of Exhaust Particulate Emissions from Road Vehicles (PARTICULATES).

Lukewille A, Bertok I, Amann M, Cofala J, Gyarfas F, Heyes C, Karvosenoja N, Klimont Z, Schöpp W., 2001. A framework to estimate the potential and costs for the control of fine particulate emissions in Europe. Laxenburg, Austria, IIASA Interim Report IR-01-023.

Mathissen M., Scheer V., Vogt R., Benter T., 2011. Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire – road interface. Atmospheric Environment, 45, 6172-6179.

Milani M., Pucillo F.P., Ballerini M., Camatini M., Gualtieri M., Martino S., 2004. First evidence of tyre debris characterization at the nanoscale by focused ion beam. Mater Charact, 52, 283–8.

Pengchai, P., Nakajima, F., Furumai, H., 2005. Estimation of origins of polycyclic aromatic hydrocarbons in size-fractionated road dust in Tokyo with multivariate analysis. Water Science and Technology 51 (3–4), 169–175.;

Pierson W.R., Brachaczek W.W., 1974. Airborne particulate matter from rubber tires. Rubber Age, 106, 36-36.

Pirjola L., Johansson C., Kupiainen K., Stojiljkovic A., Karlsson H., Hussein T. 2010. Road Dust Emissions from Paved Roads Measured Using Different Mobile Systems. Journal of the Air & Waste Management Association. 1422-1433.

Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K., Thurston G.D., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, Jama-Journal of the American Medical Association 287(9), 1132-1141.

Rogge W., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., 1993. Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks. Environmental Science and Technology 27, 1892–1904.

Stein, G., Wünstel, E., Travnicek, W., 2009. Reifenabrieb in Feinstaub e Bewertung auf Basis einer neu entwickelten Messmethode. 12. Internationale VDI-Tagung: Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn im Spannungsfeld von Sicherheit und Umwelt; VDIBericht Nr. 2086. Hannover (D).

Stephensen E., Erici M.A., Celander M., Hulander M., Parkkonen J., Forlin L., 2005. Rubber additives induce oxidative stress in rainbow trout. Aquatic Toxicology 75, 136–143.;

Thorpe A.J., Harrison R.M., Boulter P.G., McCrae I.S., 2007. Estimation of particle resuspension source strength on a major London road. Atmos Environ 41, 8007–20.

Thorpe A.J., Harrison R.M., 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. Science of the total Environment. 270-282

Tucker W.G., 2000. An overview of PM2.5 sources and control strategies. Fuel Processing Technology 65–66, 379–392.

USEPA, 1997. Fugitive Particulate Matter Emissions. Research Triangle Park, NC, Midwest Research institute Project No. 4604-06, April 15.

USEPA, 2003. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, USEPA Report AP-42, fifth ed. vol. I.

USEPA, 2011. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, USEPA Report AP-42. Section 13.2.1. Paved Roads

Venkatram A., 2000. A critique of empirical emission factor models: a case study of the AP-42 model for estimating PM10 emissions from paved roads. Atmospheric Environment 32, 1–11.;

Watson J.G., Chow J.C., Mathai C.V., 1989. Receptor models in air resources management: a summary of the APCA international speciality conference. J Air Waste Assoc, 39, 419–26.

Westerlund K.G., Johansson C., 2002. Emission of metals and particulate matter due to wear of brake linings in Stockholm. Air Poll, 10, 793–802.

Zhu D., Kuhns H.D., Brown S., Gillies J.A., Etyemezian V., Gertler A.W., 2009. Fugitive dust emissions from paved road travel in the Lake Tahoe basin. J Air Waste Manage, 59(10), 1219–29.

PIELIKUMS

ASV VIDES AIZSARDZĪBAS AĢENTŪRAS RESUSPENSIJAS UN ABRĀZIJAS EMISIJAS FAKTORU APKOPOJUMS

Pielikuma tabula

Reference	Testa Nr.	Smilts slodze, g/m ²	Ātrums, mph	Svars, t	Koncentrācija pa vējam, mg/m ³	Izmērītais PM ₁₀ emisijas faktors, g/VMT	Smago kavas līdzekļu īpatsvars	Novērtētais dzinēja, bremžu un emisijas faktors, g/VMT	Novērtētais PM ₁₀ ceļa putekļu emisijas faktors, g/VMT
USX 5/1990	1	0.42	27	5.5	0.011	2.25	0.153	0.3298	1.920
	2	0.52	25	6	0.04	16.1	0.173	0.3537	15.746
	3	0.23	29	3.9	0.07	15.3	0.087	0.1941	15.106
	4	0.23	27	6.2	0.03	3.7	0.182	0.3961	3.304
	5	0.26	27	3	0.01	0.402	0.050	0.1653	0.237
	6	0.15	27	2	0.03	7.88	0.009	0.0936	7.786
	7	4	15	12	0.01	3.22	0.420	0.9337	2.286
	8	4	16	5.1	0.6	10.6	0.136	0.3709	10.229
	9	2.2	15	2.6	0.08	16.1	0.033	0.1804	15.920
	10	1.3	15	2.6	0.06	9.01	0.033	0.1804	8.830
EPA 7/1984	1	0.46	30	5.6	0.124	4.99	0.157	0.3610	4.629
	2	0.26	30	3.8	0.033	1.55	0.083	0.2486	1.301
	3	0.147	30	4.5	0.070	3.54	0.122	0.2845	3.256
	4	0.432	35	2.1	0.030	0.177	0.013	0.0927	0.084
	5	1.01	35	2.2	0.090	0.692	0.017	0.0749	0.617
	6	0.716	30	2.1	0.063	1.38	0.013	0.1043	1.276
	7	0.59	35	2.3	0.130	4.22	0.021	0.1146	4.105
	8	2.48	20	2.2	0.120	11.2	0.017	0.1063	11.094
	9	0.293	30	4.1	0.130	3.24	0.095	0.2190	3.021
	10	0.022	55	4.5	0.104	0.177	0.112	0.1898	0.010
	11	0.022	55	4.8	0.080	0.322	0.124	0.2009	0.121
	12	0.022	55	3.8	0.080	0.084	0.083	0.1403	0.010
	13	0.11	35	2.7	0.065	0.306	0.038	0.0988	0.207
	14	0.079	35	2.7	0.030	1.37	0.038	0.1044	1.266
	15	0.049	35	2.7	0.090	1.47	0.038	0.0886	1.381
	16	0.022	55	4.3	0.060	0.241	0.103	0.1581	0.083
	17	0.809	30	2	0.056	2.64	0.009	0.0501	2.590
	18	0.731	30	2	0.080	0.37	0.009	0.0501	0.320
	19	0.929	30	2.4	0.050	0.177	0.025	0.0791	0.098

Reference	Testa Nr.	Smilts slodze, g/m ²	Ātrums, mph	Svars, t	Koncentrācija pa vējam, mg/m ³	Izmērītais PM ₁₀ emisijas faktors, g/VMT	Smago kavas līdzekļu īpatsvars	Novērtētais dzinēja, bremžu un emisijas faktors, g/VMT	Novērtētais PM ₁₀ ceļa putekļu emisijas faktors, g/VMT
EPA 1/1983	1	90.7	10	3.6		117	0.075	0.2274	116.773
	2	76.1	10	3.7		182	0.079	0.2359	181.764
	3	193	10	3.8		36.3	0.083	0.2443	36.056
	4	193	10	3.7		200	0.079	0.2359	199.764
	5	11.3	10	8		317	0.256	0.6096	316.390
	6	12.4	15	8		740	0.256	0.5697	739.430
	7	12.4	15	8		1820	0.256	0.5697	1819.430
	8	287	10	5.7		1750	0.161	0.4090	1749.591
	9	188	15	7		1420	0.214	0.4852	1419.515
	10	399	20	3.1		613	0.054	0.1466	612.853
	11	94.8	23	42		1480	1.000	1.8114	1478.189
	12	63.6	23	39		342	1.000	1.8114	340.189
	13	52.9	23	40		233	1.000	1.8114	231.189
EPA 8/1983	1	2.78		28	0.552	188	0.789	1.4388	186.561
	2	2.03		25	0.057	298	0.699	1.2790	296.721
	3	0.201		8.3	0.134	54.7	0.268	0.5320	54.168
	4	0.417		17	0.163	77.2	0.626	1.1617	76.038
	5	0.218		18	0.301	167	0.667	1.2339	165.766
	6	0.441		18	0.177	253	0.667	1.2339	251.766
	7	14.8		14	0.531	130	0.502	0.9292	129.071
	8	0.117		14	0.138	53.1	0.502	0.9292	52.171
	9	17.9		40	0.327	463	1.000	1.8261	461.174
	10	5.11		16	0.744	212	0.585	1.0896	210.910
	11	14.4		36	0.292	317	1.000	1.8226	315.177
	12	5.59		29	0.114	545	0.819	1.5012	543.499

Pielikuma tabulas turpinājums

Reference	Testa Nr.	Smilts slodze, g/m ²	Ātrums, mph	Svars, t	Koncentrācija pa vējam, mg/m ³	Izmērītais PM ₁₀ emisijas faktors, g/VMT	Smago kavas līdzekļu īpatsvars	Novērtētais dzinēja, bremžu un emisijas faktors, g/VMT	Novērtētais PM ₁₀ ceļa putekļu emisijas faktors, g/VMT
EPA 8/1983	1	13.6		9.4	0.225	82.1	0.313	0.5936	81.506
	2	13.6		11	0.410	140	0.379	0.7108	139.289
	3	7.19		12	0.102	35.4	0.420	0.7836	34.616
	4	3.77		10	0.187	93.3	0.338	0.6379	92.662
	5	6.3		11	0.295	183	0.379	0.7108	182.289
	6	2.4		9.2	0.229	126	0.305	0.5794	125.421
	7	10.4		18	0.190	368	0.66	1.2221	366.778
	8	2.32		12	0.358	195	0.420	0.7836	194.216
	9	2.06		11	0.149	348	0.379	7108	247.289
	10	3.19		12	0.339	439	0.420	0.7836	438.216
EPA 4/1997	1	0.184	55	2.2	0.233	1.08	0.017	0.0306	1.049
	2	0.0127	55	2.2	0.030	0.102	0.017	0.0306	0.071
	3	0.0127	55	2.2		0	0.017	0.0305	
	4	1.47	40	2.2	0.300	4.68	0.017	0.0343	4.646
	5	0.06	45	2.2	0.045	0.301	0.017	0.0336	0.267
	6	0.06	45	2.2	0.130	1.94	0.017	0.0336	1.906
	7	0.06	45	2.2		0	0.017	0.0305	
	8	0.06	45	2.2		0	0.017	0.0305	
	9	0.06	45	2.2		0	0.017	0.0305	
	10	0.082	45	2.2	0.033	0.57	0.017	0.0336	0.536
	11	0.082	45	2.2	0.033	0.44	0.017	0.0336	0.406
CRA 5/2008	1	1.16	1	36	0.050	27	1.000	11.06	15.940
	2	0.86	1	36	0.075	64	1.000	11.06	52.940
	3	1.34	5	12	0.200	154	0.420	2.212	151.788
	4	0.86	1	39	0.070	45	1.000	11.06	33.940
	5	1.91	5	40	0.065	63.5	1.000	2.212	61.288
	6	1.41	5	40	0.050	77.1	1.000	2.212	74.888
	7	2.93	5	40	0.040	41.3	1.000	2.212	39.088
	8	0.76	5	38	0.040	18.6	1.000	2.212	16.388

Pielikuma tabulas turpinājums

Reference	Testa Nr.	Smilts slodze, g/m ²	Ātrums, mph	Svars, t	Koncentrācija pa vējam, mg/m ³	Izmērītais PM ₁₀ emisijas faktors, g/VMT	Smago kavas līdzekļu īpatsvars	Novērtētais dzinēja, bremžu un emisijas faktors, g/VMT	Novērtētais PM ₁₀ ceļa putekļu emisijas faktors, g/VMT
EPA 8/1983	1	1.34	5	13	0.085	23.1	0.461	2.212	20.888
	2	0.97	5	40	0.035	4.99	1.000	2.212	2.788
	3	0.97	1	40	0.040	19.5	1.000	11.06	8.440
	4	0.81	5.3	40	0.044	16.3	1.000	2.0868	14.213
	5	0.81	1	40	0.080	63.5	1.000	11.06	52.440
	6	0.63	5.1	40	0.015	1.09	1.000	2.1686	0.010
	7	0.63	1	40	0.025	23.1	1.000	11.06	12.040
	8	1.1	4.7	40	0.019	3.08	1.000	2.3532	0.727
	9	1.4	1	40	0.030	16.3	1.000	11.06	5.240
	10	0.06	15.1	26		0	0.729	1.0008	
	11	0.06	14.85	26		0	0.729	1.0008	
	12	0.006	13.15	27		0	0.759	1.0410	
	13	0.006	14.5	27		0	0.759	1.0410	
	14	0.005	15.3	27	0.030	1.63	0.759	1.0409	0.589
	15	0.005	15.3	27	0.030	2.99	0.759	1.0409	1.949
	16	0.025	13.1	27		0	0.759	1.0410	
	17	0.25	13.1	27		0	0.759	1.0410	
	18	0.72	5	39.8	0.035	6.35	1.000	2.212	4.138
	19	0.72	1	39.6	0.050	63.5	1.000	11.06	52.440
	20	0.7	5	39.5	0.035	7.26	1.000	2.212	5.048

Pielikuma tabulas turpinājums