

EMISIJE TRDNIH DELCEV TER NJIHOV VPLIV NA KAKOVOST ZRAKA IN ZDRAVJE

MARJAN SENEGAČNIK,¹ TATJANA KITIČ JAKLIČ,²

DRAGO VUK,¹ MAJA ZAJEC,¹ EVA KRHAČ ANDRAŠEC¹

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
marjan.senegacnik@um.si, drago.vuk@um.si, maja.zajec@um.si, eva.krhac1@um.si

² Osnovno zdravstvo Gorenjske, OE Zdravstveni dom Kranj, Kranj, Slovenija
tkitic@gmail.com

Sinopsis Obremenjen zrak povzroča precej škodljivih vplivov na zdravje in je po ugotovitvah Svetovne zdravstvene organizacije tudi krivec za veliko število prezgodnjih smrti. Med različnimi vrstami polutantov so problematični predvsem trdni delci PM 2,5. Njihove povišane koncentracije so še posebno nevarne za razvoj srčno-žilnih obolenj in povečane smrtnosti zaradi tovrstnih obolenj. V prispevku je najprej podan pregled študij vpliva kratkotrajne izpostavljenosti zvišanim koncentracijam trdnih delcev na pojav srčno-žilnih zapletov ter smrtnost kot tudi bioloških mehanizmov, preko katerih ti škodljivi učinki potekajo. Temu sledi prikaz učinka dolgotrajne izpostavljenosti trdnim delcem na smrtnost, kjer je bilo sicer izvedeno precej manjše število raziskav. Na koncu prispevka so predstavljene tudi ugotovitve zanimive raziskave vplivov koncentracij PM 2,5 delcev na smrtnost v krajih s prekomerno obremenjenim zrakom, ki so jo izvedli v Sloveniji.

Ključne besede:

trdni delci,
obremenjevanje
ozračja,
antropogene
emisije,
bolezni srca in
ožilja,
smrtnost

EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER AND THEIR IMPACT ON AIR QUALITY AND HEALTH

MARJAN SENEGAČNIK,¹ TATJANA KITIČ JAKLIČ,²
DRAGO VUK,¹ MAJA ZAJEC,¹ EVA KRHAČ ANDRAŠEC¹

¹ University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia
marjan.senegacnik@um.si, drago.vuk@um.si, maja.zajec@um.si, eva.krhac1@um.si

² Primary Health Care of Gorenjska, OU Zdravstveni dom Kranj, Kranj, Slovenia
tkitic@gmail.com

Abstract Polluted air causes many harmful effects on human health and is according to the findings of the World Health Organization the culprit for a great number of premature deaths worldwide. Among various kinds of pollutants the PM 2,5 particles are recognized as especially problematic. It has been estimated that elevated air levels of these particles are connected with the development of cardio-vascular diseases and increased cardio-vascular mortality. In this paper the impact of short-term exposure to the PM particles on the cardio-vascular morbidity and mortality is discussed first. There is also included a brief review of biological mechanisms through which these adverse effects occur. This is followed by the presentation of the impact of long-term exposure to the PM particles on morbidity and mortality where significantly fewer studies have been conducted. At the end of the paper the results of an interesting study addressing to the influence of the PM 2,5 particles on mortality in Slovenian municipalities with excessively polluted air are presented.

Keywords:

particulate matter,
air pollution,
anthropogenic
emissions,
cardio-vascular
diseases,
mortality

1 Uvod

Emisije v ozračju so že vrsto let v središču pozornosti. Vendar zaradi groženj, ki jih prinaša globalno segrevanje in z njim povezani problemi, v ospredje stopajo predvsem emisije ogljikovega dioksida in drugih toplogrednih plinov. Manj pa se govori o problemih onesnažil (v nadaljevanju polutantov) v ozračju in posledično poslabšani kakovosti ozračja, čeprav tudi ta problem ni popolnoma brez pozornosti. Predvsem v laični javnosti je zaznati, da se pogosto medsebojno zamenjujeta pojma polutanti in toplogredni plini. Tako emisije polutantov kot emisije toplogrednih plinov so sicer predvsem posledica človekovih dejavnosti, kot so energetika, industrija, promet, kurilne naprave, kmetijstvo in še nekatera druga področja, vendar je potrebno razlikovati med pojmom. Razlika obstaja v načinu, kako ti dve skupini snovi škodujeta okolju in živim organizmom.

Z izrazom polutanti ali onesnažila imenujemo snovi, prisotne v zraku, ki so ali strupene ali na kakšen drug način škodljive za človeško zdravje in druge žive organizme. Tovrstne snovi so sicer lahko prisotne v zraku tudi zaradi naravnih pojavov, kot so vulkanski izbruhi, gozdni požari, udari strele in podobno, vendar je njihova prisotnost lokacijsko in časovno omejena. V časovnem povprečju v naravnem ozračju tovrstne snovi tako ne zavzamejo omembe vrednega deleža in jih imenujemo tudi slučajne sestavine zraka (Lazarini in Brenčič, 1984). Zaradi človekovih aktivnosti (npr. industrija, energetika, promet, kurilne naprave, ravnanje z odpadki ipd.) pa zdaj emisije teh snovi v ozračje potekajo bolj ali manj stalno. Koncentracija teh snovi je zato v ozračju v okoljih, kot so mestna središča, industrijska območja, bližina prometnic ipd., pogosto znatna in tudi doseže vrednosti, ko nastopijo škodljive posledice za človeško zdravje. Med najpomembnejša onesnažila sodijo žveplov dioksid (SO₂), ogljikovodiki (HC), ogljikov monoksid (CO), dušikova oksida (NO in NO₂), prizemni ozon (O₃) in trdni delci (PM).

Za razliko od polutantov, pri katerih je škodljiv učinek na okolje *neposreden*, pa je pri toplogrednih plinih vpliv *posreden*. Med toplogredne pline sodijo snovi, ki s svojo prisotnostjo povečajo sposobnost ozračja, da absorbira toploto. Zaradi naraščajoče količine teh snovi v ozračju se zato ozračje čedalje bolj segreva. Pri tem ni nujno, da je ta snov sama po sebi škodljiva. Tako na primer najpomembnejši toplogredni plin ogljikov dioksid (CO₂) ne sodi med polutante. Njegove koncentracije v ozračju so

daleč pod ravtnjo, ko bi lahko imele kakršenkoli škodljiv učinek na človekovo zdravje, vendar pa zaradi stalnega naraščanja predstavljajo glavni vzrok za naraščanje temperature ozračja. Po drugi strani pa prizemni (ali troposferski) ozon sodi tako med toplogredne pline kot tudi med polutante.

Agencija Republike Slovenije za okolje navaja, da iz podatkov o obremenjenosti ozračja v Sloveniji lahko razberemo, da večina vrst polutantov ne predstavlja resnejšega problema in so njihove mejne koncentracije le redko ali pa sploh niso nikoli presežene. To velja tako za žveplov dioksid, dušikova oksida, benzen in ogljikov monoksid. Precej drugačno stanje pa je glede ozona in trdnih delcev, saj so pri teh dveh vrstah polutantov pogosto presežene mejne vrednosti. Zvišane koncentracije ozona so pogoste v poletnih mesecih ob suhem in vročem vremenu. Do prekoračitev mejnih vrednosti pri trdnih delcih velikokrat prihaja v hladnem delu leta, ko se k emisijam iz ostalih virov pridružijo še kurilne naprave, svoj prispevek pa pri tem odigra tudi temperaturna inverzija (ARSO, 2020).

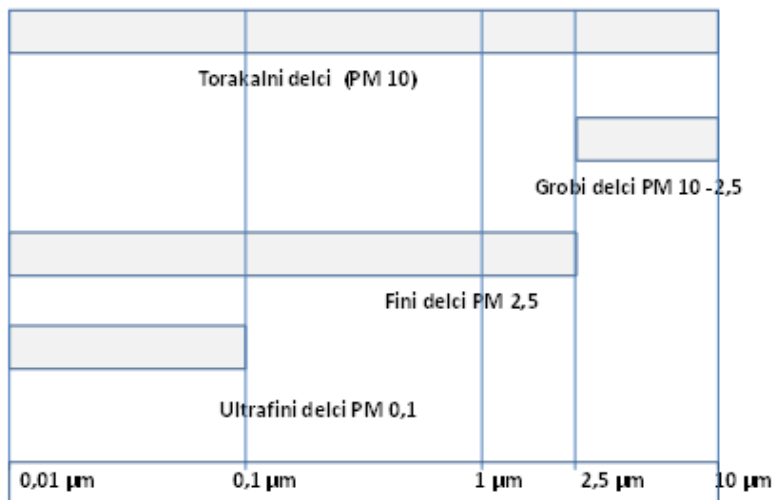
Namen tega prispevka je prikazati škodljive učinke trdnih delcev na zdravje, predvsem povezave med koncentracijo delcev PM 2,5 in obolevnostjo ter smrtnostjo zaradi srčno-žilnih bolezni. Najprej so predstavljeni trdni delci in njihova razdelitev v posamezne kategorije glede na velikost delcev. Sledi prikaz nekaterih najpomembnejših virov trdnih delcev. Glavni del prispevka pa je posvečen škodljivim vplivom trdnih delcev na zdravje, in sicer s poudarkom na srčno-žilnih boleznih. Predstavljeni so rezultati večjega števila tujih raziskav o učinkih tako kratkoročne kot dolgoročne izpostavljenosti. Na koncu so predstavljeni tudi rezultati pomembne raziskave, ki je bila v okviru Nacionalnega inštituta za javno zdravje (NIJZ) opravljena v Sloveniji, v kateri so avtorji opravili tudi modelni izračun, za koliko bi znižali smrtnost ob zmanjšanju koncentracij PM 2,5 delcev (Uršič idr., 2021).

Ko je govora o škodljivih vplivih na zdravje ter prezgodnji umrljivosti, ekonomski dejavniki vsekakor niso v prvem planu. Vendar je kljub temu zanimiva ugotovitev, da bi z vlaganjem v znižanje emisij trdnih delcev dosegli nekaj desetkrat večje prihranke v zdravstvenem sektorju, kot pa bi bili stroški preventivnih ukrepov (Curry Brown, 2013).

2 Trdni delci ali partikulati

Trdni delci, ki jih včasih imenujemo tudi s tujko partikulati, vključujejo tako majhne trdne delce kot tudi tekočinske kapljice – praviloma v to kategorijo uvrščamo delce, ki imajo aerodinamični premer manjši od 10 μm – za primerjavo, premer človeškega lasu je 50–70 μm , zrnca mivke pa imajo premer okrog 90 μm (EPA, 2021). Za razliko od ostalih polutantov, kjer gre za točno določene spojine (npr. CO, SO₂, NO, NO₂) ali pa skupine spojin (ogljikovodiki), se trdni delci po kemijski sestavi in po izvoru lahko zelo razlikujejo (Cheng idr., 2015).

Trdne delce pogosto označujemo s kratico PM, ki izvira iz angleškega izraza particulate matter. Te delce razdelimo v več kategorij. Pod oznako PM 10 so vključeni vsi delci, katerih aerodinamični premer je manjši od 10 μm oz. 0,01 mm. Te delce imenujemo tudi torakalne delce, saj po dihalnih poteh prodrejo v prsni koš. Kategorija PM 2,5 vključuje tako imenovane fine delce, ki imajo aerodinamični premer manjši od 2,5 μm . Delce, katerih premer znaša med 2,5 μm in 10 μm , imenujemo tudi grobi (zrnati) delci. Delce s premerom pod 0,1 μm imenujemo tudi ultrafini delci in jih označujemo z oznakama UFP (ultrafine particles) ali pa PM 0,1. Kategorija PM 10 (torakalni delci) vsebuje tako grobe kot fine delce (PM 2,5) in ultrafine delce (UFP). V kategorijo PM 2,5 pa so zajeti vsi delci s premerom, manjšim od 2,5 μm , torej tudi ultrafini delci. Koncentracije delcev PM 10 in PM 2,5 se merijo v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, medtem ko se koncentracije ultrafinih delcev (UFP oz. PM 0,1) izražajo v številu delcev v m^3 (Brook idr., 2004; Brook idr., 2010). Razporeditev delcev po velikosti je prikazana na sliki 1 (Brook idr., 2004).



Slika 1: Razporeditev velikosti trdnih delcev (uporabljena je logaritemska skala).

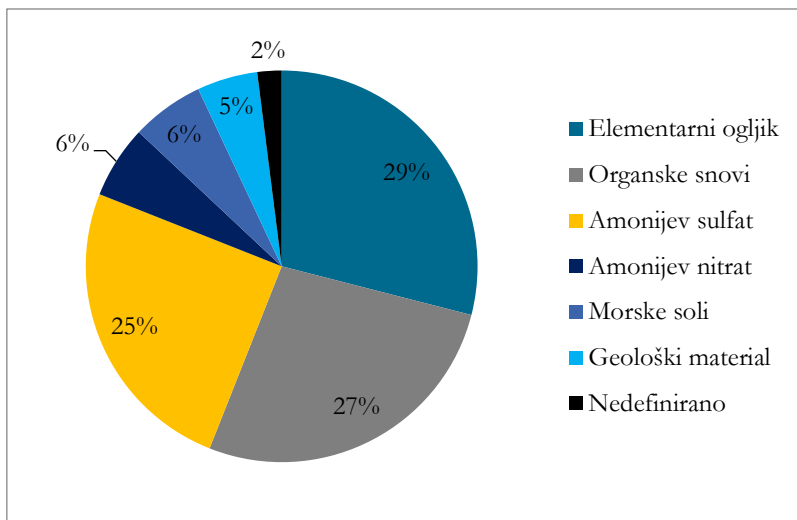
Vir: Brook idr., 2004

Načeloma velja, da manjši kot so delci, dalj časa ostanejo v zraku. Tako se delci PM 2,5 zadržujejo v zraku toliko časa, da medtem lahko prepotujejo razdalje več sto kilometrov. Nasprotno pa grobi delci (frakcije s premerom med 2,5 µm in 10 µm) ostanejo v zraku precej krajši čas in se zato tudi ne premaknejo daleč od izvora (EPA, 2018).

Med večjimi delci (PM 10 – 2,5) so lahko prisotni tudi prašni delci, cvetni prah, plesni ipd., medtem ko manjši delci PM 2,5 pogosto vsebujejo delce elementarnega ogljika (saj), ki nastanejo pri nepopolnem izgorevanju (EPA, 2021). Te sajaste delce večkrat imenujemo tudi črni ogljik (Curry Brown, 2013). Delce, ki jih v ozračje odda vir (npr. kurilna naprava), imenujemo primarne delce. Med primarne delce sodita npr. cestni prah in sajasti delci oz. tako imenovani črni ogljik. Delce, ki pa nastanejo v zraku pri kemijskih reakcijah med plinastimi polutanti, imenujemo tudi sekundarni delci. Med sekundarne delce sodijo npr. i) sulfatni delci, ki nastanejo iz žveplovega dioksida iz termoelektrarn ali industrijskih izpustov, ali pa ii) nitratni delci, ki nastanejo pri reakcijah dušikovih oksidov iz avtomobilskih motorjev, termoelektrarn ali drugih kurilnih naprav. Med grobo frakcijo so večinoma primarni delci, med finimi delci (PM 2,5) pa je precejšen delež sekundarnih delcev (EPA, 2018).

Glede izvora delcev PM10 v ZDA se ocenjuje, da prevladujejo delci naravnega izvora (predvsem prah). K emisijam PM10 delcev antropogenega izvora namreč največ prispevajo emisije iz industrijskih procesov, nato kurjenje goriv, temu pa sledijo emisije cestnih vozil ter emisije ostalih vozil in strojev (EPA, 2018). Pri finih delcih PM2,5 prevladujejo delci naravnega izvora, a je tu prispevek antropogenih emisij nekoliko večji kot pri delcih PM 10 (okrog 30 %). Tudi za delce PM2,5 antropogenega izvora v ZDA največ prispevajo industrijske emisije, sledi kurjenje goriv, nato pa cestna vozila ter ostala vozila in motorji (Ibid., 2018).

Kot poglavitne vire emisij trdnih delcev Cheng idr. (2015) navajajo avtomobilске emisije, sekundarne anorganske aerosole, sežiganje odpadkov, kurjenje biomase, sežiganje odpadnih olj, morske aerosole, industrijske izpuste in cestni prah. Na sliki 2 prikazujemo strukturo sestave delcev PM 2,5, ki so jo določili Cheng in sodelavci (2015) po analizi vzorcev, odvzetih v urbanem okolju na merilnem mestu, ki je pod močnim vplivom cestnega prometa. Pri sestavi grobih delcev prav tako navajajo prisotnost delcev od obrabe avtomobilskih gum in zavornih oblog, cestni prah, morske aerosole, sekundarne aerosole in avtomobilске emisije (Ibid., 2015).



Slika 2: Sestava trdnih delcev PM 2,5

Vir: Cheng idr., 2015

Pri analizi sestave trdnih delcev na merilnem mestu v urbanem okolju pod izrazitim vplivom prometa je bilo ugotovljeno, da organski ogljik (trdni delci organske sestave) predstavlja 80 +/- 14 % delcev PM 2,5 in 36 +/- 8 % delcev PM 10, medtem ko črni ogljik (elementarni ogljik oziroma saje) predstavlja 14 +/- 8 % sestave delcev PM 2,5 in 7 +/- 4 % sestave delcev PM 10. Več kot 90 % črnega ogljika je v frakciji PM 2,5 delcev. Koncentracija črnega ogljika je obratno sorazmerna s hitrostjo vetra. Tudi vsebnost organskih ogljikovih delcev (tako grobih kot finih) upada s hitrostjo vetra, a povezava ni tako izrazita kot pri črnem ogljiku (Viidanoja idr., 2002).

3 Viri emisij trdnih delcev

Sektorji, ki predstavljajo pomemben vir emisij trdnih delcev, so promet, energetika, industrija in individualne kurilne naprave. V zadnjem obdobju se kot problematične izpostavljajo predvsem emisije iz avtomobilskih motorjev in individualnih kurilnih naprav.

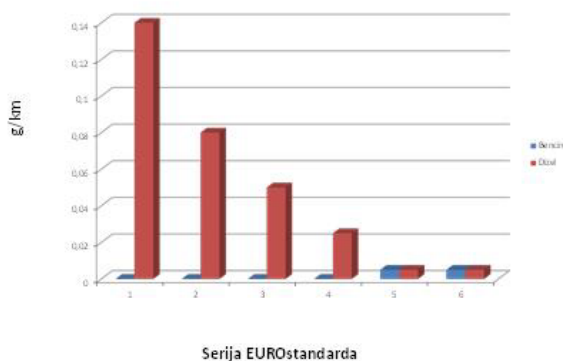
3.1 Emisije trdnih delcev iz prometa

Med najpomembnejše vire trdnih delcev, ki veliko prispevajo k poslabšani kakovosti ozračja v mestih in s tem povezanimi škodljivimi vplivi na zdravje, vsekakor sodijo emisije iz avtomobilskih motorjev. Dolgo vrsto let so problematiko emisij trdnih delcev povezovali le z dizelskimi motorji. Razlog je bil v tem, da so bencinski motorji s posrednim vbrizgom goriva, ki so do pred nekaj leti znatno prevladovali, imeli v izpušnih plinih zanemarljivo majhne vsebnosti trdnih delcev v primerjavi z emisijami iz dizelskih motorjev. Tako je bil prispevek bencinskih motorjev k emisijam trdnih delcev praktično zanemarljiv in tudi ni bil predviden nadzor teh emisij. Vendar se je tudi na področju bencinskih motorjev situacija v zadnjih letih drastično spremenila z uvedbo modernih bencinskih motorjev z neposrednim vbrizgom goriva. Tovrstni motorji so se uveljavili zaradi velike energijske učinkovitosti, ki se odraža v precej nižji porabi goriva. Njihova slaba stran pa je, da niso podobni dizelskim motorjem le po manjši porabi goriva, ampak tudi po visokih emisijah trdnih delcev (Awad idr., 2020).

V obdobju po letu 2000 so proizvajalci razvili filtre trdnih delcev, s katerimi so znatno znižali emisije teh delcev. Tako je bilo možno doseči vedno strožje zahteve evropskih emisijskih standardov *EURO*, ki predpisujejo najvišje dovoljene emisije posameznih vrst polutantov za nova vozila. Kot je razvidno s slike 3, je emisijski standard *EURO 1* iz leta 1992 dovoljeval za osebna vozila emisije do 0,14 g trdnih delcev na km, standard *EURO 2* iz leta 1996 0,08 g/km, *EURO 3* iz leta 2000 pa že skoraj trikrat manj – le 0,05 g/km. *EURO 4* je dopuščal le še 0,025 g/km, *EURO 5* in *EURO 6* pa samo 0,005 g/km. Če so se v preteklosti omejitve nanašale le na avtomobile z dizelskim motorjem, pa standarda *EURO 5* in *EURO 6* vključujeta tudi bencinske motorje z neposrednim vbrizgom goriva (direct injection /DI/ motorje), za katere so predpisane enake omejitve kot za dizelske motorje (DieselNet, 2022).

Vsi avtomobili z dizelskim motorjem morajo biti že vrsto let opremljeni s filtrom trdnih delcev (DPF – diesel particulate filter). Brez tovrstnega filtra emisije trdnih delcev presegajo emisijske standarde in avtomobil tako velja za tehnično neustreznega. Princip delovanja filtra je enostaven. Filter je sestavljen iz kovinskega ali keramičnega satovja, v katerega se trdni delci enostavno mehansko ujamejo. Seveda pa se kanali filtra sčasoma zapolnijo z delci. Da ne pride do zamašitve filtra, je potrebna regeneracija, ki se pri sodobnih dizelskih avtomobilih izvede avtomatično. Regeneracija poteka tako, da se temperatura izpušnih plinov poveča na 600 °C (ali pa še nekoliko več) in pri tem saje v filtru enostavno zgorijo. Regeneracijo je potrebno ponoviti na vsakih 600 do 1200 km, proces pa traja nekaj časa in ga ni priporočljivo prekinjati. Problem se lahko pojavi pri voznikih, ki dizelske avtomobile uporabljajo izključno za kratke mestne vožnje in se v tem primeru avtomatična regeneracija filtra ne izvede (AMZS, 2016; Custard, 2021).

Ker je med novimi avtomobili z bencinskimi motorji v Evropi večina z neposrednim vbrizgom goriva (že v letu 2016 sta bili dve tretjini novih avtomobilov z neposrednim vbrizgom goriva – GDI), emisijski standardi pa se zaostrejejo, postajajo vse bolj aktualni tudi filtri trdnih delcev za bencinske motorje (GPF – gasoline particulate filters). Za bencinske motorje z neposrednim vbrizgom goriva je od septembra 2017 strožja omejitev, emisije so namesto z maso določene s številom delcev, in sicer je po NEDC/WLTC testnem ciklu zgornja meja emisij $6,0 \times 10^{11}$ delcev/km (*EURO 6c* verzija standarda), po RDE ciklu pa $9,0 \times 10^{11}$ delcev/km. Filtri za bencinske motorje (GPF) so sicer precej podobni filtrom za dizelske motorje (DPF), so pa med njimi tudi nekatere pomembne razlike (Majewski, 2021).



Slika 3: Dovoljene emisije trdnih delcev za EURO standarde serij 1–6

Vir: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

Znanstveniki opozarjajo, da pri emisijah trdnih delcev, ki izvirajo iz cestnega prometa, ne gre samo za prispevek izpušnih plinov, ki jih oddajajo motorji z notranjim izgorevanjem. Upoštevati je potrebno tudi emisije delcev od obrabe zavor in pnevmatik, delce s cestne površine in prašne delce. Res je, da za razliko od izpušnih plinov, ki vsebujejo predvsem fine delce PM 2,5, emisije, ki ne izvirajo iz izpušnih plinov, vsebujejo v glavnem grobe delce (frakcijo s premerom med 2,5 in 10 μm), čeprav so v manjši meri tudi tu prisotni fini delci s premerom pod 2,5 μm . Večji delci so manj prodorni in ne zaidejo v krvni obtok, vendar tudi ti povzročajo škodljive posledice za zdravje in prispevajo k povečani smrtnosti (Timmers in Achten, 2016).

Pogosto poudarjajo, da bo s tem, ko se bo znatno povečalo število električnih avtomobilov in s tem posledično zmanjšalo število avtomobilov z bencinskim in dizelskim motorjem, prispevalo k bistveno boljši kakovosti zraka v mestih. Vendar situacija ni tako preprosta. Električni avtomobili iz motorja res ne oddajajo nikakršnih izpušnih plinov, ostale emisije (delci od obrabe zavor in pnevmatik, cestni prah) pa ne le, da so prav tako prisotne, ampak so njihove emisije zaradi večje mase vozil celo večje. Električni avtomobili imajo približno 25 % večjo maso kot primerljivo prostorni avtomobili z bencinskim ali dizelskim motorjem. Znano je tudi, da vozila z večjo maso povzročajo večje emisije trdnih delcev, ki ne izvirajo iz izpušnih plinov. Tako ocenjujejo, da električni avtomobil povzroči prav tolikšne emisije delcev PM 10 in le od 1 % do 3 % nižje emisije delcev PM 2,5 kot primerljiv avtomobil, ki ga poganja motor z notranjim izgorevanjem. Emisije, ki ne izvirajo iz

izpušnih plinov, naj bi bile odgovorne za 90 % emisij delcev PM 10 in 85 % delcev PM 2,5 iz prometa. Tako zamenjava bencinskih in dizelskih avtomobilov z električnimi vozili sama po sebi še ne bo rešila problema trdnih delcev v zraku v mestnih okoljih (Timmers in Achten, 2016).

3.2 Emisije trdnih delcev iz individualnih kurilnih naprav

V zadnjem obdobju se je tudi v urbanih okoljih precej povečal interes za uporabo lesne biomase v kurilnih napravah za individualno ogrevanje. Lesna biomasa se v individualnih kuriščih uporablja v različnih oblikah – kot drva, sekanci, peleti in redkeje tudi briketi (WCM InfoGozd, 2020). Mnogi uporabniki so prešli z rabe fosilnih goriv (npr. kurilnega olja) na lesno biomaso predvsem zaradi ugodnejše cene. Ker ima Slovenija veliko gozdnih površin in zalog lesa, je uporaba lesne biomase primerna tudi z vidika zagotavljanja energetske neodvisnosti.

Z okoljevarstvenega vidika uporaba lesne biomase prinaša tako določene prednosti kot tudi slabosti. Ker veljajo vse oblike lesne biomase za ogljično nevtralna goriva, je zato zamenjava fosilnih goriv z lesom vsekakor dobrodošla z vidika zmanjšanja emisij toplogrednih plinov in prispevka h globalnemu segrevanju. Po drugi strani pa kurjenje lesne biomase lahko prispeva k večjim emisijam trdnih delcev (Polonini idr., 2019). Vzrok za povečane emisije delcev PM 10 so lahko tako nekakovostna goriva kot tudi zastarele kurilne naprave, ki ne omogočajo optimalnega zgorevanja (WCM InfoGozd, 2020). Kot navajajo Zhang idr. (2013), sežiganje lesne biomase (poleg kurilnih naprav so vštetí tudi gozdni požari in sežiganje odpadne biomase v kmetijstvu) povzroča več kot tretjino vseh emisij primarnih PM 2,5 delcev v ZDA.

4 Problematika obremenitve zraka s trdnimi delci v Sloveniji

Trdni delci so ena izmed dveh vrst onesnažil, katerih mejne vrednosti so v Sloveniji najpogosteje presežene. Za razliko od ozona, katerega zvišane koncentracije so pogoste poleti, se povišane koncentracije trdnih delcev in prekoračitve njihovih mejnih vrednosti pojavljajo v hladnem delu leta. Vzrok so tako temperaturne inverzije kot tudi dejstvo, da se ostalim virom emisij v tem obdobju pridružijo še izpusti iz kurilnih naprav, ki tako predstavljajo v času kurilne sezone največji vir emisij trdnih delcev. Pomemben vir predstavljajo tudi promet, industrija ter ponovno

dvigovanje že suspendiranih delcev. Na koncentracije trdnih delcev pomembno vpliva tudi vreme (Koleča, 2016).

Mejna dnevna vrednost za delce PM 10 znaša $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, v posameznem letu pa je dovoljeno, da je do 35 dni v letu ta vrednost presežena. V Sloveniji tako v letu 2020 kot tudi v letu 2021 na nobenem merilnem mestu ni bilo zabeleženih več kot 35 preseganj mejne vrednosti, medtem ko so v letu 2019 zabeležili preko 35 preseganj na dveh merilnih mestih, v letu 2018 na šestih ter v letu 2017 kar na desetih merilnih mestih. Vendar so te razlike precej odvisne od vremenskih vplivov. Včasih prihaja zaradi določenih naravnih vplivov, predvsem prehoda puščavskega prahu, do znatnega povišanja koncentracij delcev PM 10 (tudi preko $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), vendar se preseganja mejnih vrednosti iz naravnih virov odštejejo v skladu z Uredbo o kakovosti zunanega zraka. Mejna letna vrednost je $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vendar v letu 2020 ni bila prekoračena na nobenem izmed merilnih mest (ARSO, 2020). Mejna letna vrednost za delce PM 2,5 se je v letu 2020 celo znižala s $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kljub temu pa mejna vrednost ni bila presežena na nobenem merilnem mestu v Sloveniji. Najvišja izmerjena povprečna letna koncentracija v letu 2020 je bila $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ARSO, 2020).

Predpisane in priporočene mejne vrednosti so podane v tabeli 1. Povprečne mejne letne vrednosti, priporočene s strani Svetovne zdravstvene organizacije, so nižje od predpisanih (Uršič idr., 2021).

Tabela 1: Predpisane in priporočene mejne vrednosti delcev PM 10 in PM 2,5

Kategorija polutanta	Koncentracija ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Delci PM 10 – mejna dnevna vrednost*	50
Delci PM 10 – mejna letna vrednost	40
Delci PM 2,5 – mejna letna vrednost**	20
Delci PM 10 – priporočena mejna povprečna letna vrednost (WHO)	20
Delci PM 2,5 – priporočena mejna povprečna letna vrednost (WHO)	10

*dovoljeno je do 35 preseganj mejne dnevne vrednosti v letu

**do leta 2020 je mejna letna vrednost znašala $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Vir: Uršič idr., 2021

5 Vpliv trdnih delcev na zdravje

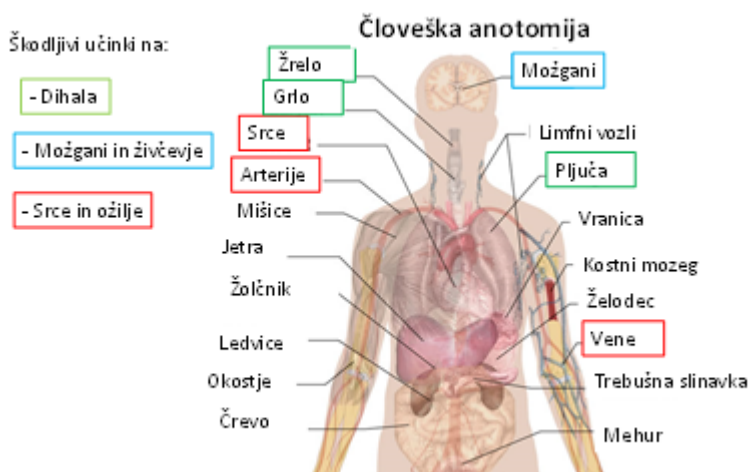
Onesnažen zrak povzroča škodljive posledice za zdravje. Tu se kažejo kot posebej problematični fini trdni delci PM 2,5. Čedalje bolj prihaja do izraza spoznanje o tveganju, ki ga povzroča izpostavljenost zraku, obremenjenemu s trdnimi delci. Tako po ocenah Global Burden Disease (GBD) analize iz leta 2010 izpostavljenost trdnim delcem PM 2,5 povzroči v svetovnem merilu 3 milijone prezgodnjih smrti letno in 74 milijonov izgubljenih let zdravega življenja. GBD uvršča vpliv onesnaženosti zunanjega zraka med deset najpomembnejših zdravstvenih tveganj na svetu (Curry Brown, 2013). Po novejših podatkih ocenjujejo, da je globalno število žrtev še višje, in sicer med 3,7 in 4,2 milijona. GBD študija iz leta 2015 je onesnaženo ozračje tudi uvrstila na četrto mesto med dejavnike tveganja smrtnosti (GBD, 2016; Cohen idr., 2017; Zhang idr., 2018). Za ZDA pa ocenjujejo, da je vplivom PM 2,5 možno pripisati med 130.000 in 320.000 prezgodnjih smrti v letu 2005, kar predstavlja 5,4 % vseh smrti. Njihovi škodljivi učinki prizadenejo tako dihala, možgane in živčevje ter še posebno srce in ožilje. Škodljive učinke trdnih delcev na različne organe prikazuje slika 4. Potrditev zveze med nastankom obolenj na dihalih zaradi vpliva onesnaženega zraka niti ne preseneča, presenetljive pa so ugotovitve, da je onesnaženje zraka celo pomemben okoljski dejavnik tveganja za pojav inzulinske rezistence in sladkorne bolezni (Meo idr., 2015). Še zanimivejši pogled na to problematiko odpirajo vplivi epigenetskih mehanizmov, ki so nedvomno vpeti v celotno zgodbo vpliva onesnažil na zdravje človeka (Del Real idr., 2021).

Z zmanjšanjem dolgotrajni izpostavljenosti delcem PM 2,5 bi dosegli zvišanje pričakovane življenjske dobe. Čeprav, ko je govora o smrtnosti in zdravju, ekonomski dejavniki niso v prvem planu, prav tako stroškovni vidiki niso nepomembni. Tako so ocenili, da bi v ZDA z znižanjem emisij ter posledičnimi pozitivnimi zdravstvenimi učinki za vsako tono znižanja emisij dosegli prihranke med 230.000 in 880.000 \$. To je neprimerno več, kot pa znašajo stroški obvladovanja emisij – stroški znižanja emisij iz novih vozil z dizelskim motorjem znašajo okrog 13.000 \$ na tono (Curry Brown, 2013).

Škodljive posledice za zdravje povzroča tako dolgotrajna kot tudi kratkotrajna izpostavljenost zraku s povišanimi koncentracijami trdnih delcev. Več podatkov je o vplivih kratkotrajne izpostavljenosti, saj je do njih lažje priti, medtem ko so za prepoznavanje učinkov dolgoročne izpostavljenosti potrebni dolgoročni in

kompleksni raziskovalni projekti in je bilo zato izvedeno relativno malo tovrstnih študij (Brook idr., 2004). Zhang idr. (2018) so ugotovili, da se je kakovost zraka v ZDA zaradi omejevanja emisij v obdobju od leta 1990 do leta 2010 znatno izboljšala. Tako so ocenili, da je bilo zaradi manjše obremenjenosti zraka preprečeno 35 800 prezgodnjih smrti zaradi PM 2,5 delcev in 4600 smrti zaradi ozona.

Škodljivi vplivi onesnaženega zraka na zdravje so znani že dolgo časa, vendar so bili več desetletij v središču pozornosti učinki na dihalne organe, šele v osemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja se je večje število raziskav usmerilo tudi na preučevanje vplivov onesnaženega zraka na srce in ožilje (Schwartz, 2001).



Slika 4: Prikaz škodljivega učinka trdnih delcev na različne organe

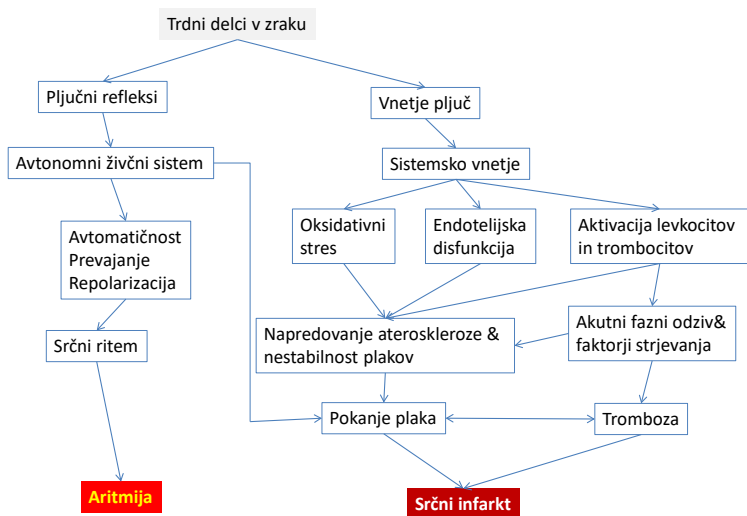
Vir: <http://www.sciencekids.co.nz/pictures/humanbody/humanorgans.html>

Med najpomembnejše bolezni srca in ožilja sodijo arterijska hipertenzija, koronarna bolezen srca, bolezen možganskega žilja, periferna arterijska bolezen, kronična ledvična bolezen in druge redkejšje bolezni, kot so npr. abdominalne in torakalne anevrizme aorte (NIJZ, 2014). Te bolezni najpogosteje nastanejo zaradi ateroskleroze, dejavniki tveganja za nastanek bolezni srca in žilja pa so kajenje, zvišan krvni tlak, zvišan holesterol, zvišan krvni sladkor, prekomerna telesna teža, stres, spol, starost, nezdrav življenjski slog z uživanjem neustrezne prehrane, škodljivim uživanjem alkohola in pomanjkanjem fizične aktivnosti (Brook idr., 2010; Yusuf idr., 2004). Zato je seveda potrebno predvsem preventivno delovati pri odpravljanju teh

dejavnikov in zmanjševanju njihovega vpliva. Razvoj srčno-žilnih obolenj (npr. ateroskleroze) je običajno dolgotrajen proces, ki traja leta ali celo desetletja. Nenadni zapleti koronarne bolezni srca oziroma bolezni možganskega žilja so srčni infarkt, nenadna srčna smrt in možganska kap, ki povzročajo največ smrti in puščajo dolgotrajno telesno prizadetost, največkrat pa je za njihov nastanek potreben še nek sprožilec (Brook idr., 2010).

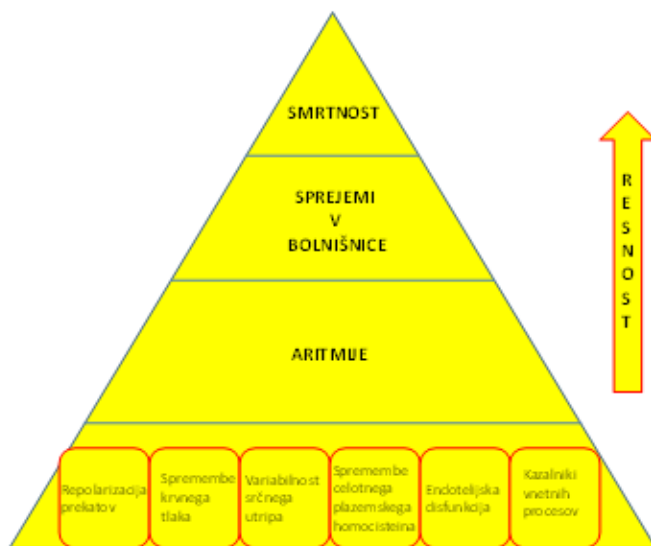
Kot sprožilci zapletov lahko delujejo različni fizični kot tudi psihični dejavniki. Tofler in Muller (2006) navajata kot potencialne sprožilce srčno-žilnih zapletov velike telesne obremenitve, psihosocialne dejavnike (jeza, strah, žalovanje, stres na delovnem mestu in strese ob naravnih nesrečah ter vojnah), respiratorne infekcije, obilne obroke hrane, uživanje drog, vpliv letnih časov in vplive okolja. Med vplivi okolja je predvsem izpostavljen onesnažen zrak.

Rezultati raziskav kažejo, da ima zrak, obremenjen s trdnimi delci, lahko vpliv na pomembne parametre krvnega obtoka, ki so dejavniki tveganja za srčno-žilne zaplete. Seveda je zato potrebno, da delci ali nekatere njihove komponente preidejo iz pljuč oziroma dihal v obtočila (Schwartz, 2001). Glede na dejstvo, da delci PM 2,5 predstavljajo dokaj heterogeno skupino in se po kemijski sestavi med seboj precej razlikujejo, so Ostro in sod. (2007) preučevali korelacijo med dnevno smrtnostjo in koncentracijo različnih komponent PM 2,5 delcev. Dokaj prepričljivo povezavo so ugotovili med smrtnostjo in elementarnim ogljikom, organskimi ogljikovimi zvrstmi, nitrati, bakrom, titanom, kalijem in cinkom ter tudi skupno maso PM 2,5 delcev. Glede smrtnosti zaradi bolezni srca in ožilja se je izkazala predvsem izrazita povezava med elementarnim ogljikom in cinkom. Pokazalo se je, da tako elementarni ogljik kot tudi nekatere druge komponente, ki znatno prispevajo k skupni masi PM 2,5 delcev (vključno z organskimi ogljikovimi zvrstmi, nitrati in cinkom), izkazujejo večje presežno tveganje za smrtnost kot pa skupna masa PM 2,5 delcev (Ostro idr., 2007). Možne načine učinkovanja trdnih delcev na razvoj bolezni srca in ožilja ter na sprožitev srčno-žilnih zapletov prikazujemo na sliki 5 (Brook idr., 2004) in sliki 6 (Curry Brown, 2013). Čeprav je mogoče povezati delce PM 2,5 in dejavnike tveganja za razvoj srčno-žilnih bolezni, pa ostaja izziv interpretacija ugotovljenih povezav, ker bi lahko tudi drugi dejavniki vplivali na samo interpretacijo (Zhao idr., 2020).



Slika 5: Prikaz možnih bioloških učinkov trdnih delcev na razvoj srčno-žilnih obolenj in nastanek zapletov

Vir: Brook idr., 2004



Slika 6: Možni učinki trdnih delcev PM 2,5 na srce in ožilje ter njihove posledice

Vir: Curry Brown, 2013

6 Vplivi kratkotrajne izpostavljenosti zvišanim koncentracijam trdnih delcev

Kratkotrajna izpostavljenost trdnim delcem PM 2,5 lahko povzroča srčno-žilne zaplete z usodnimi ali neusodnimi posledicami, kot so ishemijska miokarda, srčni infarkt, odpoved srca, aritmije in možganska kap. Predvsem so izpostavljeni starejši ljudje, bolniki s koronarno arterijsko boleznijo, sladkorno boleznijo in ljudje z znatno prekomerno telesno težo (Brook idr., 2010).

Precej več raziskav je posvečenih vplivom kratkotrajne izpostavljenosti povišanim koncentracijam trdnih delcev. Med najbolj znanimi raziskavami na tem področju sta projekta APHEA-2 v Evropi in NMMAPS v Združenih državah Amerike (Brook idr., 2004). Raziskovalni projekt APHEA-2 (Air Pollution and Health – An European Approach 2) se je predvsem osredotočil na raziskovanje vplivov kratkotrajne izpostavljenosti trdnim delcem na smrtnost. Zbrali so podatke o dnevni koncentraciji delcev PM 10 in črnega ogljika v zraku za 29 evropskih mest in preučevali njihovo morebitno povezavo s smrtnostjo. Rezultati kažejo, da je zvišanje koncentracij delcev PM 10 za $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ povzročilo za 0,6 % (interval zaupanja 95 %, 0,4 – 0,8 %) povečanje dnevne smrtnosti na splošno, medtem ko je bil v starejšem delu populacije porast smrtnosti še nekoliko večji. Opazna je bila tudi sinergija učinkov obremenjenosti ozračja z delci PM 10 in dušikovim dioksidom (NO_2). V mestih z nižjimi koncentracijami NO_2 je porast smrtnosti za zvišanje koncentracij delcev PM 10 za $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ znašal 0,19 % (interval zaupanja 95-%, 0,00–0,41), medtem ko je bilo v mestih z visokimi koncentracijami NO_2 zvišanje smrtnosti kar 0,80 % (interval zaupanja 95-%, 0,67–0,93). Poleg tega je opazen tudi vpliv klimatskih razmer, saj je bilo v mestih s hladnejšim podnebjem opazno manjše zvišanje smrtnosti (0,29 %, interval zaupanja 95-%, 0,16–0,42) kot v mestih s toplejšim podnebjem (0,82 %, interval zaupanja 95-%, 0,69–0,96) (Katsouyanni idr., 2001).

V primeru, ko so čas zasledovanja vplivov izpostavljenosti povišanim koncentracijam delcev PM 10 podaljšali z nekaj dni na 40 dni, so ugotovili, da se je stopnja smrtnosti zvišala za 0,69 % (interval zaupanja 95-%, 0,31–1,08) na 1,97 % (interval zaupanja 95-%, 1,38–2,55) za srčno-žilno smrtnost in celo še bolj, iz 0,74 % (interval zaupanja 95-%, -0,17–1,55) na 4,2 % (interval zaupanja 95-%, 1,08–7,42) za smrtnost zaradi obolenj dihal (Zanobetti idr., 2003).

V študijo NMMAPS (National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study) je bila vključena populacija 50 milijonov ljudi iz 20 največjih mest v ZDA. Za zvišanje koncentracije delcev PM 10 za $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ so zaznali dnevni porast smrtnosti za 0,21 % (+/- 0,06 SE) na vse oblike smrtnosti in za 0,31 % (+/- 0,09 SE) za srčno-žilno smrtnost (Dominici idr., 2005; Brook idr., 2004). Pri kratkotrajni izpostavljenosti pride do srčno-žilnih zapletov praviloma pri ljudeh, ki so že prizadeti zaradi raznih oblik srčno-žilnih obolenj, čeprav včasih nekaterih njihovih simptomov še niso prepoznali. Tako rezultati raziskav kažejo, da prehodna izpostavljenost emisijam iz prometa poveča nevarnost srčnega infarkta pri osebah, ki imajo povišane klasične dejavnike tveganja (Peters idr., 2004). Tveganje lahko predstavlja delovanje različnih stresorjev, ki povzročijo razne hemodinamske, vazokonstriktivne ali protrombotične obremenitve (obremenitve, ki so povezane s pretokom krvi, krčenjem žil ali nastankom krvnih strdkov) in to ob prisotnosti nestabilnih plakov (oblog na žilnih stenah) lahko privede do pokanja plaka in nastanka strdka (Muller idr., 1994). Ti stresorji so lahko posledica aktivnosti posameznika ali pa gre za zunanje vplive – tudi vplive obremenjenega okolja.

Izpostavljenost zraku s povečano vsebnostjo trdnih delcev lahko povzroči prehodno povečanje viskoznosti krvne plazme, reaktantov akutne faze (kazalnikov vnetnih procesov), endotelijske disfunkcije in tudi privede do sprememb v avtonomnem nadzoru delovanja srca (Peters idr., 2004). Za podrobnejše prepoznavanje vzrokov zapletov in bioloških mehanizmov, ki so odgovorni zanje, so tako raziskovali vplive trdnih delcev in tudi drugih polutantov na vrsto različnih dejavnikov, ki so povezani s srčno-žilnimi zapleti:

- povečano nevarnost nastanka strdkov,
- spremembe koncentracij vnetnih kazalnikov,
- krčenje žil in zvišanje krvnega tlaka,
- vplivi na variabilnost srčnega ritma in povzročanje aritmij.

Tako so pri izpostavljenosti močno onesnaženemu zraku (predvsem z žveplovim dioksidom – povprečne vrednosti $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in suspendiranimi delci – povprečne vrednosti $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ugotovili, da se je viskoznost krvne plazme tako pri moških kot pri ženskah občutno zvišala v primerjavi z normalnimi razmerami. Povečana viskoznost krvne plazme kot posledica vnetja dihalnih poti lahko poveča

koagulabilnost krvi (nagnjenost krvi k strjevanju) in s tem večjo nevarnost nastanka strdkov (Peters idr., 1997).

Opazovali so tudi povezavo med koncentracijami raznih polutantov in koncentracijo proteina fibrinogena, ki igra ključno vlogo pri procesu strjevanja krvi. Povišane vsebnosti fibrinogena v krvni plazmi so nastopile ob povišanih koncentracijah dušikovega dioksida (NO₂) in ogljikovega monoksida (CO), korelacije pa so bile bolj izrazite pri višjih temperaturah. Tudi povišane koncentracije delcev PM 10 so vplivale na povečane vsebnosti fibrinogena, vendar so bile povezave signifikantne samo v toplem obdobju. Tako bi tudi povišane vsebnosti fibrinogena lahko prispevale k večji pojavnosti srčnih infarktov ob onesnaženem ozračju (Pekkanen idr., 2000). Tudi Schwartz (2001) je ugotovil, da povišane koncentracije trdnih delcev PM 10 povzročijo zvišanje serumskih koncentracij fibrinogena, prav tako pa tudi števila trombocitov in levkocitov, medtem ko za plinaste polutante (žveplov dioksid, ogljikov dioksid in ozon) korelacije niso bile potrjene. Do nasprotnih ugotovitev so prišli Seaton idr. (1999), saj njihovi rezultati kažejo negativno korelacijo med koncentracijo delcev PM 10 v zraku in koncentracijo fibrinogena v krvi izpostavljenih oseb. Njihovi rezultati kažejo tudi, da povečanje koncentracije trdnih delcev zniža vsebnost hemoglobina in eritrocitov.

Ob povišanih koncentracijah trdnih delcev v zraku so opazili tudi povečane vsebnosti C-reaktivnega proteina (CRP) v serumu. Povišane koncentracije CRP so znak prisotnosti vnetnih procesov v organizmu, ki predstavljajo povečano tveganje za srčno-žilna obolenja (Peters idr., 2001). Tudi Seaton idr. (1999) poročajo o pozitivni korelaciji med koncentracijo delcev PM 10 in CRP. Eden od pomembnih dejavnikov, ki prispevajo k nastanku oziroma razvoju srčno-žilnih obolenj, je tudi endotelijska disfunkcija oziroma poškodbe endotelija (tanke plasti na notranji strani arterij). Cui idr. (2016) razlagajo kot enega izmed možnih mehanizmov, preko katerega trdni delci poškodujejo ožilje, nastanek reaktivnih kisikovih zvrsti. Reaktivne kisikove zvrsti (reactive oxygen species - ROS) imajo škodljive učinke na endotelijske matične celice, saj znižujejo njihovo možnost samoobnove, njihovo mobilizacijo in širjenje ter pospešujejo njihovo odmiranje. Zmanjšano število endotelijskih matičnih celic pa pomeni povečano verjetnost nastanka srčno-žilnih zapletov (Cui idr., 2016).

Pri izpostavljenosti povišanim koncentracijam trdnih delcev se je zvišal povprečni srčni utrip in je bilo opaziti spremembe variabilnosti srčnega ritma, kar bi tudi lahko bil del patofizioloških mehanizmov, ki povezujejo obremenjenost ozračja s trdnimi delci in smrtnost zaradi srčno-žilnih bolezni (Pope idr., 1999).

Pri pacientih z vstavljenimi defibrilatorji so opazili, da je ob povišanih koncentracijah nekaterih polutantov (dušikov dioksid, ogljikov monoksid, trdni delci in črni ogljik) včasih prihajalo do življenje ogrožajočih motenj srčnega ritma (Peters idr., 2000). Še več drugih raziskav potrjuje povezavo med povečano koncentracijo raznih polutantov (predvsem trdnih delcev PM 2,5) ter znižanim avtonomnim nadzorom srca in spremembami variabilnosti srčnega ritma, kar lahko vodi tudi do nenadnih srčnih smrti (Liao idr., 1999; Gold idr., 2000; Magari idr., 2001). Trdni delci, ki pridejo v organizem, lahko učinkujejo na avtonomni živčni sistem neposredno ali pa posredno preko izločanja citokinov v pljučih in njihovega vnosa v krvni obtok (Magari idr., 2001).

7 Vplivi dolgotrajne izpostavljenosti zvišanim koncentracijam trdnih delcev

Dolgoročna izpostavljenost zraku s povišano koncentracijo trdnih delcev in ostalih polutantov predstavlja še večje tveganje za smrtnost iz naslova srčno-žilnih bolezni od kratkotrajne izpostavljenosti in statistično pomeni znižanje pričakovane življenjske dobe prebivalstva od več mesecev do nekaj let. Znižanja koncentracij trdnih delcev zmanjšajo smrtnost za srčno-žilnimi boleznimi. Rezultati raziskav potrjujejo, da izpostavljenost organizma delcem PM 2,5 pospešuje razvoj ateroskleroze. Poleg tega delci PM 2,5 spodbujajo tudi razvoj drugih srčno-žilnih obolenj, kot so visok krvni tlak, srčno popuščanje in sladkorna bolezen. Vse več študij kaže na dejstvo, da povišane koncentracije delcev PM 2,5 predstavljajo večje tveganje za smrtnost zaradi bolezni srca in ožilja kot pa za smrtnost zaradi pljučnih bolezni (Brook idr., 2010).

Ena izmed najpomembnejših, čeprav starejših, raziskav je bil projekt »Harvard Six Cities study«. Študija je raziskovala povezanost med smrtnostjo in izpostavljenostjo obremenjenemu ozračju. V obdobju od 14 do 16 let so spremljali skupino več kot 8000 oseb iz šestih ameriških mest. Razmerje med smrtnostjo v mestu z najbolj obremenjenim zrakom in v mestu z najmanj obremenjenim zrakom je bilo 1,26 (95-

% interval zaupanja, 1,08 do 1,47). Ker je seveda cela vrsta dejavnikov, ki vplivajo na smrtnost, so v raziskavi skušali čim bolj sistematično upoštevati ostale pomembne dejavnike in odšteti njihov vpliv, da bi dobili čim bolj jasno sliko med obremenjenostjo ozračja in smrtnostjo. Tako so upoštevali starost, spol, indeks telesne mase, kadilske navade in poklicno izpostavljenost prašnim delcem, dimu in plinom. Tudi potem, ko so odšteli vplive navedenih dejavnikov, je bila opazna statistično značilna povezava med obremenjenostjo ozračja in smrtnostjo. Predvsem je bila opazna odvisnost smrtnosti od koncentracije finih delcev (PM 2,5) in sulfatnih delcev, manj izrazita pa je bila med smrtnostjo in koncentracijo torakalnih (PM 10) delcev kot tudi žveplovega dioksida, dušikovega dioksida in kislostjo aerosolov. Odvisnost od koncentracije ozona pa je bilo težko določiti, saj so bile razlike med koncentracijami ozona v posameznih mestih majhne (Dockery idr., 1993). Ko so analizirali smrtnost zaradi posameznih bolezni, je bila jasno prepoznavna odvisnost med obremenjenostjo ozračja s trdnimi delci in smrtnostjo zaradi srčno-žilnih in pljučnih bolezni. Izrazita je bila povezava med smrtnostjo zaradi pljučnega raka in trdnimi delci, ki je seveda pri raziskavah kratkoročnega vpliva ozračja ni možno zaznati. Kar se tiče smrtnosti zaradi nemalignih respiratornih obolenj, pa je bilo njihovo število relativno majhno in je bilo težko dokazati značilne povezave. Za ostale vzroke smrtnosti pa so bile povezave zelo šibke oziroma niso bile zaznavne (Dockery idr., 1993).

Pope idr. (2004) so v raziskavi uporabili bazo podatkov ACS (American Cancer Society) iz programa CPS-II (Cancer Prevention Study), študije smrtnosti, ki je vključevala okrog 1,2 milijona odraslih oseb iz vseh delov ZDA (Pope idr., 2002). Ugotovili so, da je dolgotrajna izpostavljenost zraku, obremenjenemu s PM 2,5 delci, povezana s povečano smrtnostjo zaradi srčno-žilnih bolezni, medtem ko so korelacije med PM 2,5 delci in smrtnostjo zaradi respiratornih obolenj precej manj izrazite. Upoštevali so kadilski status in tudi ločeno obravnavali skupine nekadilcev, bivših kadilcev in aktualnih kadilcev. Pokazalo se je, da je kajenje bistveno večji dejavnik tveganja tako za srčno-žilno smrtnost kot respiratorno smrtnost od obremenjenega zraka. Vendar pa je tudi jasno razviden vpliv obremenjenega zraka na povečano smrtnost zaradi PM 2,5 delcev. Tako so ugotovili, da povečanje koncentracije PM 2,5 delcev v zraku za $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ predstavlja 8- do 18-% zvišanje tveganja smrtnosti za srčno-žilnimi obolenji. Najbolj zaznaven je vpliv na smrtnost zaradi ishemične bolezni srca, vendar je opazen tudi vpliv na smrtnost zaradi aritmij, srčnih odpovedi in nenadnih srčnih smrti. So pa po drugi strani opazili precej šibke

povezave med koncentracijo PM 2,5 delcev in smrtnostjo zaradi dihalnih obolenj, kjer je izrazita le povečana smrtnost zaradi pljučnice in influence v skupini nekadilcev (Pope idr., 2004).

Pri obravnavi učinkov dolgoročne izpostavljenosti trdnim delcem na razvoj ateroskleroze je potrebno omeniti raziskave Künzlija idr. (2011). Predstavili so sistematičen pregled raziskav s tega področja. Predvsem poudarjajo pomembnost izbora ustrezne metode za oceno stopnje razvoja ateroskleroznega obolenja. V ta namen se najpogosteje uporablja merjenje debeline intime (notranja plast žilne stene) in medie (srednja plast žilne stene) karotidnih arterij (CIMT – carotid intima-media thickness), ki jo tudi Künzli idr. ocenjujejo kot najprimernejšo metodo. Wilker idr. (2013) so ugotovili pozitivno korelacijo med vsebnostjo trdnih delcev in debelino intime in medie v glavni karotidni arteriji na vzorcu populacije starejših moških v Bostonu. Povečane debeline intime in medie v karotidni arteriji pa so neposredno povezane z zvišanim tveganjem za nastanek srčnega infarkta ali možganske kapi (O'Leary idr., 1999).

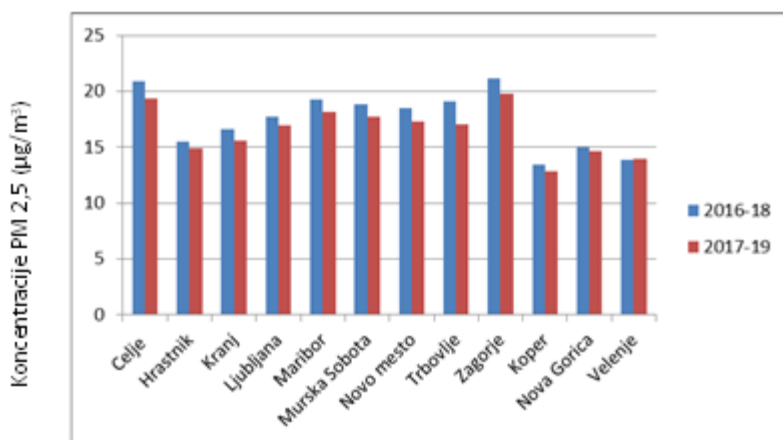
Moller idr. (2016) so raziskovali vpliv izpostavljenosti trdnim delcem, izpušnim plinom iz dizelskih motorjev in različnih nanomaterialov na razvoj ateroskleroze in na vazomotorne funkcije (funkcije krčenja in raztezanja žil) pri živalih. Delci in nanomateriali so pokazali podoben učinek na razvoj ateroskleroze, povečano krčenje in slabšo relaksacijo žil. Učinek dizelskih izpušnih plinov pa je bil nekoliko manj izrazit.

8 Stanje v Sloveniji

Glede na dejstvo, da obremenjenost zraka s trdnimi delci v hladni polovici leta predstavlja enega izmed najbolj izpostavljenih okoljskih problemov v Sloveniji, se seveda poraja vprašanje, kakšne so posledice izpostavljenosti obremenjenemu zraku na zdravje prebivalstva in smrtnost. Kot najpomembnejšo raziskavo s tega področja je potrebno omeniti študijo Nacionalnega inštituta za javno zdravje (NIJZ) z izdelano oceno vpliva onesnaženosti zraka z delci PM 2,5 na smrtnost v krajih s prekomerno onesnaženim zrakom. Najnovejši podatki raziskave so bili na razpolago za obdobje 2017–2019 (Uršič in sod., 2021), v raziskavo pa je bilo vključenih devet slovenskih krajev s prekomerno onesnaženim zrakom (Celje, Hrastnik, Kranj, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo mesto, Trbovlje, Zagorje ob Savi) ter za

primerjavo še trije kraji, v katerih ne prihaja do prekomerne obremenitve zraka s trdnimi delci – Koper, Nova Gorica in Velenje (Uršič in sod., 2021).

Povprečne letne vrednosti koncentracij trdnih delcev PM 2,5 za obdobji 2016–18 in 2017–19 za vse kraje, vključene v raziskavo, so prikazane na sliki 7. Koncentracije delcev PM 2,5 so izračunane iz dnevnih povprečnih vrednosti za delce PM 10 z vključenim korekcijskim faktorjem 0,7. Podatki o koncentracijah PM delcev so pridobljeni iz meritev Državne mreže za kakovost zraka (DMKZ), ki ima merilne postaje v vseh obravnavanih krajih (Uršič in sod., 2021).



Slika 7: Povprečne letne vrednosti delcev PM 2,5 v različnih slovenskih krajih
Vir: Uršič idr. (2021)

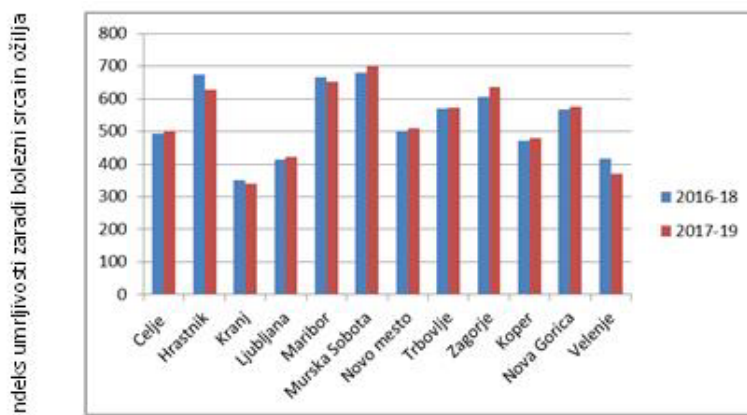
Za vse v raziskavo vključene kraje oziroma občine so za obravnavani obdobji zbrali podatke o umrljivosti brez zunanjih vzrokov (naravnih smrtih) in posebej umrljivosti za srčno-žilnimi boleznimi za vse osebe, stare nad 30 let, ter jih razdelili v starostne skupine po 5 let (30–34, 35–39 ... 80–84, nad 85). Število smrtnih primerov so nato korelirali s številom prebivalcev ter preračunali indeks umrljivosti na 100.000 prebivalcev, in sicer za celotno umrljivost in tudi posebej umrljivost za srčno-žilnimi boleznimi (Uršič idr., 2021).

Ker je pričujoči prispevek posvečen predvsem prikazu vplivov trdnih delcev na bolezni srca in ožilja, je zato nadaljnji prikaz omejen samo na pregled umrljivosti zaradi srčno-žilnih bolezni. Prikazani so rezultati le za celotno populacijo nad 30 let in ne posebej za posamezne starostne skupine.

Letni indeks umrljivosti zaradi bolezni srca in ožilja (I_{CVM}) je izračunan tako, da je število srčno-žilnih smrti za posamezno triletno obdobje (n_{CVM}) preračunano na letno povprečje, potem deljeno s številom prebivalcev občine, starih nad trideset let (n_{30+}), ter nato preračunano na 100.000 prebivalcev, kot prikazuje enačba (1):

$$I_{CVM} = \frac{n_{CVM} \cdot 100000}{3 \cdot n_{30+}} \quad (1)$$

Letni indeksi umrljivosti zaradi bolezni srca in ožilja za obdobji 2016–2018 in 2017–2019 so prikazani na sliki 8 (Uršič idr., 2021). S slike 8 je razvidno, da so med posameznimi kraji precejšnje razlike. Indeksi letne srčno-žilne umrljivosti so najvišji v Murski Soboti, Mariboru, Hrastniku in Zagorju, najnižji pa Kranju, Ljubljani, Velenju in Kopru.

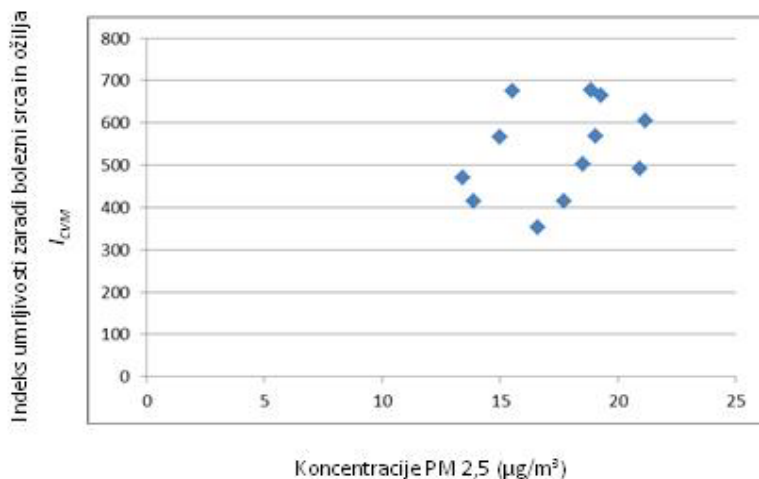


Slika 8: Letni indeks umrljivosti zaradi bolezni srca in ožilja v različnih slovenskih krajih

Vir: Uršič idr. (2021)

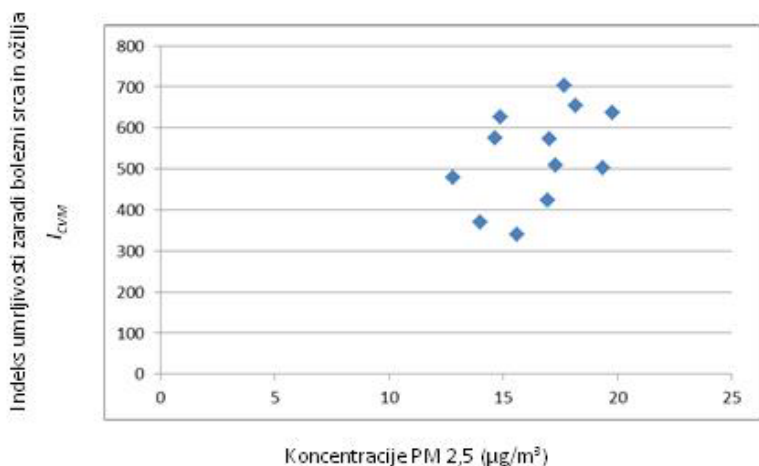
Glede na ugotovitve številnih tujih raziskav o povezavah med obremenjenostjo zraka zaradi povišane koncentracije trdnih delcev in smrtnostjo zaradi srčno-žilnih bolezni je seveda zanimivo preveriti morebitne korelacije tudi za Slovenijo. Na slikah

9 in 10 je prikazana odvisnost letnega indeksa srčno-žilne umrljivosti od povprečne koncentracije delcev PM 2,5 za 12 slovenskih občin za obdobje 2016–18 in 2017–19.



Slika 9: Letni indeks umrljivosti zaradi boleznih srca in ožilja v različnih slovenskih krajih v odvisnosti od povprečne koncentracije delcev PM 2,5 za obdobje 2016–18

Vir podatkov: Uršič idr. (2021)

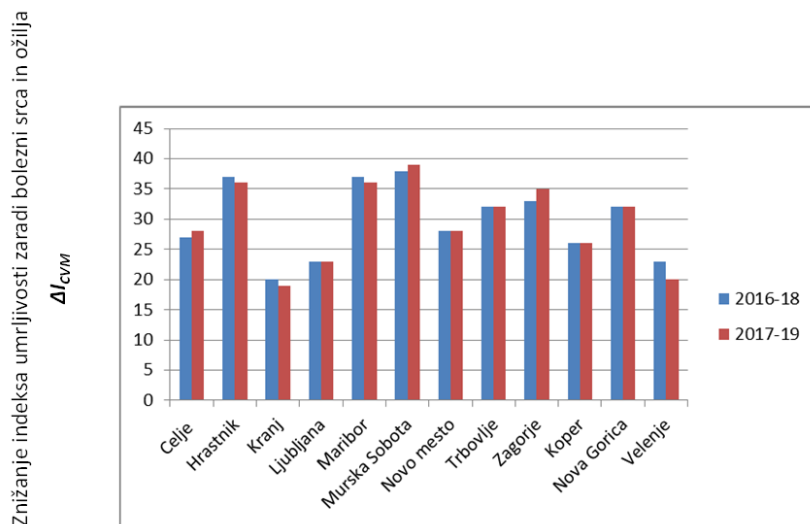


Slika 10: Letni indeks umrljivosti zaradi boleznih srca in ožilja v različnih slovenskih krajih v odvisnosti od povprečne koncentracije delcev PM 2,5 za obdobje 2017–19

Vir podatkov: Uršič idr. (2021)

Avtorji raziskave ugotavljajo, da bi tako celotno smrtnost kot tudi parcialno smrtnost zaradi srčno-žilnih bolezni lahko zmanjšali, če bi izboljšali kakovost ozračja – v konkretnem primeru znižali koncentracije delcev PM 2,5. Opravili so modelne račune znižanja smrtnosti za dva scenarija. Po prvem scenariju bi letno povprečno koncentracijo delcev PM 2,5 glede na obdobje 2017–19 znižali za $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, po drugem pa bi koncentracijo delcev v vseh krajih znižali na vrednost $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Uršič idr., 2021).

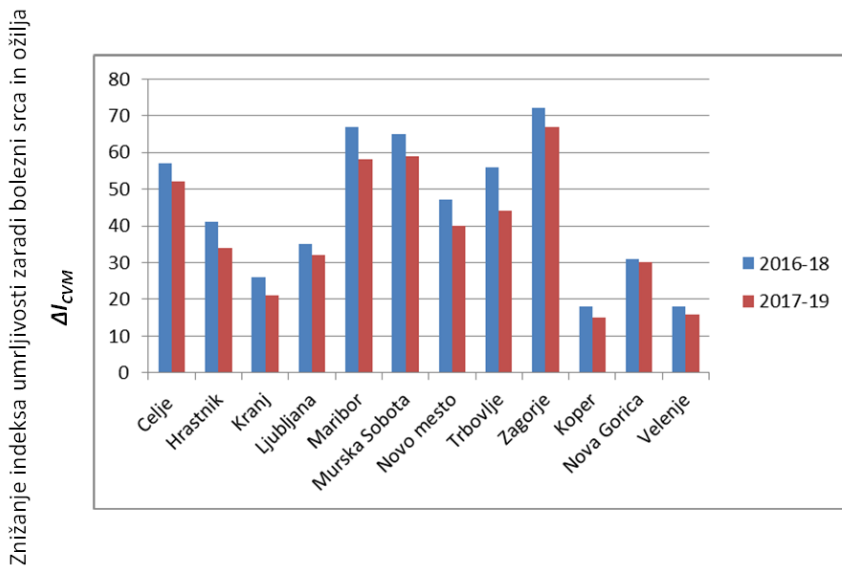
Po prvem scenariju (znižanje koncentracij delcev PM 2,5 za $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bi bili učinki zmanjšanja umrljivosti zaradi srčno-žilnih obolenj najbolj vidni v Murski Soboti, Mariboru, Hrastniku, Zagorju, Trbovljah in Novi Gorici, manj pa bi bili učinki vidni v mestih s sicer nižjo srčno-žilno umrljivostjo (Novo mesto, Celje, Koper, Velenje, Ljubljana in Kranj). Modelni izračun pokaže, da bi v vseh krajih skupaj lahko preprečili 137 prezgodnjih smrti (Uršič idr., 2021). Znižanje indeksa umrljivosti zaradi srčno-žilnih bolezni ob zmanjšanju koncentracije PM 2,5 delcev za $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ za posamezne občine je prikazano na sliki 11.



Slika 11: Znižanje indeksa umrljivosti zaradi bolezni srca in ožilja za posamezne občine ob znižanju povprečnih letnih koncentracij delcev PM 2,5 za $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Vir: Uršič idr. (2021)

V primeru drugega scenarija, da bi se v vseh mestih koncentracija PM 2,5 delcev znižala na isto vrednost $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bi bili vplivi na indeks umrljivosti zaradi srčno-žilnih bolezni nekoliko drugačni in bi se najbolj poznali v mestih z višjo povprečno koncentracijo PM 2,5 delcev, manj pa v mestih z nižjo koncentracijo. Tako bi se indeks srčno-žilne umrljivosti najbolj znižal v Zagorju, nato v Murški Soboti, Mariboru in Celju, najmanj pa v Kopru in Velenju (Uršič idr. 2021). Znižanje indeksa umrljivosti zaradi srčno-žilnih bolezni ob predpostavki, da bi se v vseh občinah koncentracija delcev PM 2,5 znižala na $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, je prikazana na sliki 12.



Slika 12: Znižanje indeksa umrljivosti zaradi bolezni srca in ožilja za posamezne občine ob znižanju povprečnih letnih koncentracij delcev PM 2,5 na $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Vir: Uršič idr. (2021)

9 Zaključek

Trdni delci predstavljajo eno izmed najbolj problematičnih vrst onesnažil tako po svetu kot v Sloveniji. Njihove koncentracije pogosto presegajo predpisane mejne vrednosti, kar se v Sloveniji dogaja večinoma v zimskem obdobju. Povišane koncentracije trdnih delcev povzročajo vrsto škodljivih vplivov na zdravje. Pri delcih PM 2,5 je vrsta raziskav potrdila predvsem negativne učinke na srce in ožilje. Ob kratkotrajni izpostavljenosti visokim koncentracijam trdnih delcev lahko pri osebah,

ki imajo povišane dejavnike tveganja (npr. koronarno bolezen, napredovalo aterosklerozo, zvišan krvni tlak ipd.), pride do srčno-žilnih zapletov, ki lahko privedejo do hospitalizacije ali v najhujših primerih tudi do smrti. Pri dolgotrajni izpostavljenosti pa trdni delci povzročajo vnetne procese in pospešujejo napredovanje ateroskleroze. Z dosedanjimi raziskavami so znanstveniki uspeli že tudi v precejšnji meri pojasniti biološke mehanizme, preko katerih trdni delci poškodujejo srce in ožilje.

Pri trdnih delcih PM 2,5 so za zdravje problematični predvsem delci antropogenega izvora. Tako je z ustreznimi ukrepi možno učinkovito obvladati emisije in s tem znižati koncentracije PM delcev v zraku. Podatki za Slovenijo tako v precejšnji meri kažejo, da so se vrednosti PM delcev v ozračju znižale. K temu je gotovo prispevalo znižanje emisij trdnih delcev iz industrijskih virov kot tudi manjše emisije iz prometa. Težko je sicer predvideti, če bo precej forsirano uvajanje električnih avtomobilov samo po sebi učinkovito prispevalo še k nadaljnjemu znižanju emisij trdnih delcev. Dejstvo pa je, da so tudi avtomobili z dizelskimi in bencinskimi motorji zaradi čedalje strožjih emisijskih standardov opremljeni z vedno bolj učinkovitimi filtrirnimi sistemi in neprimerno manj obremenjujejo ozračje, kot so ga včasih. Pri znižanju emisij iz kurilnih naprav pa bi lahko določene rezultate dosegli, če bi lahko večino zastarelih kurilnih naprav zamenjali z uvajanjem toplotnih črpalk, predvsem če bi te izkoriščale elektriko iz obnovljivih ali trajnih virov.

Literatura

- AMZS (2016). Zamašeni filtri trdnih delcev. AMZS – Motorevija, 4.5. 2016. Pridobljeno 14.2. 2022 na <https://www.amzs.si/motorevija/mobilnost/nasveti/2016-05-04-zamaseni-filtri-trdnih-delcev>
- ARSO (2020). Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje – januar - december 2021.
- Awad, O., Ma, X., Kamil, M., Ali, O.M., Zhang, Z. in Shuai, S. (2020). Particulate emissions from gasoline direct injection engines: A review how current emission regulations are being met by automobile manufacturers. *Sci Total Environ*, Vol. 20; 718: 137302. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137302.
- Brook, R.D., Franklin, B., Cascio, W., Hong, Y., Howard, G., Lipsett, M., Luepker, R., Mittleman, M., Samet, J., Smith, S.C. Jr, Tager, I. (2004). Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association. Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association. *Circulation*, Vol. 109, str.2655–2671. doi.org/10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8
- Brook, R.D., Rajagopalan, S., Pope, C.A., Brook, J.R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A.V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R.V., Mittleman, M.A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S.C., Whitsel, L., Kaufman, J.D. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease – An

- Update to the Scientific Statement from the American Heart Association. *Circulation*, Vol. 121, str. 2331-2378). doi: 10.1161/CIR.0b013e3181d8e1
- Cheng, Y., Lee, S., Gu, Z., Ho, K., Zhang, Y., Huang, Y., Chow, J.C., Watson, J.G., Cao, J., Zhang, R. (2015). PM_{2,5} and PM_{10-2,5} chemical composition and source apportionment near a Hong Kong roadway. *Particulology*, Vol. 18, pp. 96-104.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jablung, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope, C. A. III, Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., van Dingenen, R., van Donkelaar, A., Vos, T., Murray, C.J.L., Forouzanfar, M.H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet*, Vol. 389, str. 1907–1918, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6), 201
- Cui, Y., Sun, Q. in Liu, Z. (2016). Ambient particulate matter and cardiovascular diseases: a focus on progenitor and stem cells. *J. Cell. Mol. Med.*, Vol. 20 (5), str. 782-793. doi: 10.1111/jcmm.12822
- Curry Brown, A. (2013). Health Effects of Particulates and Black Carbon, Transport and Clean Air Seminar, EPA, December 2013
- Custard, B. (2021). Diesel Particulate Filters: what is a DPF and which cars with one? Carbuyer: Pridobljeno 14.2. 2022 na <https://www.carbuyer.co.uk/tips-and-advice/153014/diesel-particulate-filters-dpf-what-you-need-to-know>
- Del Real, Á., Santurtún, A. in Zarrabeitia, M.T. (2021). Epigenetic related changes on air quality. *Environ Res*, Vol. 197, 111155, doi: 10.1016/j.envres.2021.111155
- DieselNet (2022). Emission Standards – Cars and Light Trucks. European Union. DieselNet. Pridobljeno 13.2 2022 na <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. in Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.*, Vol. 329 (24), str. 1753-1759. doi: 10.1056/NEJM199312093292401
- EPA (2018). Report on the Environment - Particulate Matter Emissions. Pridobljeno 25.1. 2022 na https://cfpub.epa.gov/roe/indicator_pdf
- EPA (2021). Particulate Matter (PM) Basics. EPA – United States Environmental Protection Agency. Pridobljeno 21.12. 2021 na <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- GBD (2016). GBD 2015 DALYs and HALE Collaborators. Global, regional, and national disability-adjusted life-years (DALYs) for 315 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE), 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet*, Vol. 388, str. 1603–58. doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31460-X
- Gold, D.R., Litonjua, A., Schwartz, J., Lovett, E., Larson, A., Nearing, B., Allen, G., Verrier, M., Cherry, R., Verrier, R. (2000). Ambient pollution and heart rate variability. *Circulation*, Vol. 101(11), str. 1267-1273. doi: 10.1161/01.CIR.101.11.1267
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., La Tertre, A., Monopoli, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H.R., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J., Schindler, C. In Schwartz, J. (2001). Confounding and effect modification in the short-term effect of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA 2 project. *Epidemiology*, Vol. 12(5), str. 521-531. doi: 10.1097/00001648-200109000-00011.
- Koleša, T. (2016). Onesnaženost zraka z delci PM₁₀ in PM_{2,5}. ARSO Okolje – Kazalci okolja. Pridobljeno 1.2. 2022 na <http://kazalci.arso.gov.si/sl/content/onesnazenost-zraka-z-delci-pm10-pm25-2>
- Künzli, N., Perez, L., von Klot, S., Baldassarre, D., Bauer, M., Basagana, X., Breton, C., Dratva, J., Elosua, R., de Faire, U., Fuks, K., de Groot, E., Marrugat, J., Penell, J., Seissler, J., Peters, A. in Hoffmann, B. (2011). Investigating air pollution and atherosclerosis in humans: Concepts and

- outlook. *Progress in Cardiovascular Diseases*, Vol. 53, str. 334-343. doi:10.1016/j.pcad.201012.006
- Lazarini, F. in Brenčič, J. (1984). *Anorganska kemija*, DZS, Ljubljana.
- Liao, D., Creason, J., Shy, C., Williams, R., Watts, R. in Zweidinger, R. (1999). Daily variation of particulate air pollution and poor cardiac autonomic control in the elderly. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 107 (7), str. 521-525. doi.org/10.1289/ehp.99107521
- Magari, S.R., Hauser, R., Schwartz, J., Williams, P.L., Smith, T.J. in Christiani, D.C. (2001). Association of Heart Rate Variability With Occupational and Environmental Exposure to Particulate Air Pollution. *Circulation*, Vol. 104 (9), str. 986-991. doi.org/10.1161/hc3401.095038
- Majewski, W.A. (2021). *Gasoline Particulate Filters. DieselNet Technology Guide*. Pridobljeno 14.2.2022 na https://dieselnet.com/tech/gasoline_particulate_filters.php
- Meo, S.A., Memon, A.N., Sheikh, S.A., Al Rouq, F., Mahmood Usmani, A., Hassan, A. in Arian, S.A. (2015). Effect of environmental air pollution on type 2 diabetes mellitus. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. Vol. 19(1), str. 123-128.
- Moller, P., Christophersen, D.V., Jacobsen, N.R., Skovmand, A., Damiao Gouvieia, A.C., Guerra Andersen, M.C., Keramanizadeh, A., Jensen, D.M., Høgh Danielsen, P., Roursgard, M., Jantzen, K. in Loft, S. (2016). Atherosclerosis and vasomotor dysfunction in arteries of animals after exposure to combustion-derived particulate matter or nanomaterials. *Crit Rev Toxicol*, Vol. 46(5), str. 437-476. doi: 10.3109/10408444.2016.1149451.
- Muller, J.E., Abela, G.S., Nesto, R.W. in Tofler, G.H. (1994). Triggers, acute risk factors and vulnerable plaques: the lexicon of a new frontier. *J. Am. Coll. Cardiol*. Vol. 23(3), str. 809-813. doi: 10.1016/0735-1097(94)90772-2.
- NIJZ (2014). *Srčno-žilne bolezni*. Nacionalni inštitut za javno zdravje. Pridobljeno 21.2.2022 na <https://www.nijz.si/sl/srcno-zilne-bolezni>
- O'Leary, D.H., Polak, J.F., Kronmal, R.A., Manolio, T.A., Burke, G.L. in Wolfson, S.K. Jr. (1999). Carotid artery intima and media thickness as a risk factor for myocardial infarction and stroke in older adults. *Cardiovascular Health Study Collaborative Research Group. N Engl J Med*, Vol. 340 (1), str.: 14-22. doi: 10.1056/NEJM199901073400103
- Ostro, B., Feng, W.-Y., Broadwin, R., Green, S. in Lipsett, M. (2007) The Effects of Components of Fine Particulate Air Pollution on Mortality in California: Results from CALFINE. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 115 (1), str. 13-19.
- Pekkanen, J., Brunner, E., Anderson, H., Tiittanen, P. In Atkinson, R. (2000). Daily concentration of air pollution and plasma fibrinogen in London. *Occup. Environ. Med*, Vol. 57 (12), str. 818-822. doi: 10.1136/oem.57.12.818
- Peters, A., Döring, A., Wichmann, H.E. in Koenig, W. (1997). Increased plasma viscosity during an air pollution episode: a link to mortality? *Lancet*, Vol. 349 (9065), str. 1582-1587. doi: 10.1016/S0140-6736(97)01211-7
- Peters, A., Liu, E., Verrier, R.L., Schwartz, J., Gold, D.R., Mittleman, M., Baliff, J., Oh, J.A., Alle, G., Monahan, K. in Dockery, D.W. (2000). Air pollution and incidence of cardiac arrhythmia. *Epidemiology*, Vol. 11(1), str. 11-17. doi: 10.1097/00001648-200001000-00005.
- Peters, A., Frölich, M., Dörning, A., Immervoll, T., Wichmann, H.E., Hutchinson, W.L., Pepys, M.B. in König, W. (2001). Particulate air pollution is associated with an acute phase response in men; results from the MONICA-Augsburg study. *Eur Heart J*, Vol 22(14), str. 1198-1204. doi: 10.1053/ehj.2000.2483.
- Peters, A., von Klot, S., Heier, M., Trentinaglia, I., Hörmann, A., Wichmann, H.E. in Löwel, H. (2004). Exposure to Traffic and the Onset of Myocardial Infarction. *N. Engl. J. Med.*, Vol. 351 (17), str. 1721-1730. doi: 10.1056/NEJMoa040203
- Polonini, L.F., Petrocelli, D., Parmigiani, S.P. in Lezzi, A.M. (2019). Experimental study of PM emissions from wood pellet stoves with an innovative burning pot. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1224 012018. doi:10.1088/1742-6596/1224/1/012018
- Pope, C.A III., Verrier, R.L., Lovett, E.G., Larson, A.C., Raizenne, M.A., Kanner, R.E., Schwartz, J., Villegas, G.M., Gold, D.R. in Dockery, D.W. (1999). Heart rate variability associated with

- particulate air pollution. *American Heart Journal*, Vol. 138 (5), str. 890-899. doi.org/10.1016/S0002-8703(99)70014-1.
- Pope, C.A III., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D. in Godleski, J.J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution. *Circulation*, Vol. 109, str. 71-77. doi: 10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F
- Pope C.A. III, Burnett R.T., Thun M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K. in Thurston, G.D. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, Vol. 287 (9), str. 1132–1141. doi: 10.1001/jama.287.9.1132
- Schwartz, J. (2001). Air Pollution and Blood Markers of Cardiovascular Risk. *Environ Health Perspect*, Vol. 109
- Seaton, A., Soutar, A., Crawford, V., Elton, R., McNerlan, S.,Cherrie, J., Watt, M., Agius, R. In Stout, R. Particulate air pollution and the blood. *Thorax*, Vol. 54, str. 1027-1032.
- Timmers, V.R.J.H. in Achten, P.A.J. (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*, Vol. 147, str. 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>
- Tofler, G.H. in Muller, J.E. (2006). Triggering of Acute Cardiovascular Disease and Potential Preventive Strategies. *Circulation*, Vol. 114 (17), str. 1863-1872. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.105.596189>
- Uršič, A., Uršič, S. in Otorepec, P. (2021). Ocena vpliva onesnaženosti zraka z delci PM 2,5 na umrljivost v krajih s prekomerno onesnaženim zrakom. Opazovalno obdobje za oceno: 2017-2019. Nacionalni inštitut za javno zdravje (NIJZ), februar 2021. Pridobljeno 1. 2. 2021 na https://www.nijz.si/sites/www.nijz.si/files/uploaded/porocilo_pm_2017-2019.pdf
- Vüüdanoja, J., Sillanpää, M., Laakia, J., Kerminen, V.-M., Hilamo, R., Aarnio, P. in Koskentalo, T. (2002). Organic and black carbon in PM 2,5 and PM 10: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, str. 3183-3193.
- WCM InfoGozd (2020). Lesna goriva. WCM InfoGozd. Gozdarski inštitut Slovenije. Pridobljeno 25.1. 2022 na <https://wcm.gozdis.si/sl/infogozd/prirocnik-za-lastnike-gozdov/lesna-goriva/>
- Wilker, E.H., Mittleman, M.A., Coull, B.A., Gryparis, A., Bots, M.L., Schwartz, J. in Sparrow, D. (2013). Long term exposure to black carbon and carotid intima-media thickness:The normative aging study. *Environ. Health Perspectives*, Vol. 121 (9), str. 1061-1067. doi: 10.1289/ehp.1104845
- Yusuf, S., Hawken, S., Ôunpuu, S., Dans, T., Avezum, A. In Lanan, F. (2004). Effect of potentially modifiable risk factors associated with myocardial infarction in 52 countries (the INTERHEART study): control-case study. *Lancet*, Vol. 364, Issue 9438, str. 937-952.
- Zanobetti, A., Schwartz, J., Samoli, E., Gryparis, A., Touloumi, G., Paacock, J., Anderson, R.H., La Tertre, A., Bobros, J., Celko, M., Goren, A., Forsberg, B., Michelozzi, P., Rabczenko, D., Perez Hoyos, S., Wichmann, H.E. in Katsouyanni, K. (2003). The temporal pattern of respiratory and heart disease mortality in response to air pollution. *Environ. Healt Perspect*. Vol. 111 (9), str. 1188-1193. doi: 10.1289/ehp.5712
- Zhang, Y., Obrist, D., Zielinska, B. in Gertler, A. (2013). Particulate emissions from different types of biomass burning. *Atmospheric Environment*, Vol. 72, str. 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.026>
- Zhang, Y., West, J.J., Mathur, R., Xing, J., Hogrefe, C., Roselle, C.J.; Bash, J.O., Pleim, J.E., Gan, C.-M. in Wong, D.C. (2018). Long-term trends in the ambient PM2,5- and O3 related mortality burdens in the United States under emission reductions from 1990 to 2010. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 18, str. 15003-15016. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15003-2018>
- Zhao, M., Hoek, G., Strak, M., Grobbee, D.E., Graham. I., Klipstein-Grobush, K. in Vaartjes, I. (2020). A global analysis of associations between fine particle air pollution and cardiovascular risk factors: Feasibility study on data linkage. *Global Heart* Vol. 15 (1): 53. doi: <https://doi.org/10.5334/gh.877>

