

ŠOLSKI CENTER NOVO MESTO
Srednja elektro šola in tehniška gimnazija



Prašni delci v našem okolju

Raziskovalno področje: Ekologija z varstvom okolja

Raziskovalna naloga

Avtorji: Jan Kastelec

Jakob Auersperger

Lara Kalin

Mentorja: Goran Pešić, univ. dipl. inž.

dr. Kostja Makarovič, univ. dipl. kem.

Novo mesto, 2023

KAZALO VSEBINE

1	ZAHVALA.....	1
2	POVZETEK	2
3	ABSTRACT	3
4	UVOD	4
5	TEORETIČNI DEL.....	5
5.1	ONESNAŽENOST ZRAKA.....	5
5.2	PRAŠNI DELCI.....	5
5.3	VELIKOST PRAŠNIH DELCEV	6
5.4	IZVOR PRAŠNIH DELCEV	7
5.5	PROCESI NASTANKA DELCEV	9
5.5.1	NUKLEACIJA	9
5.5.2	KOAGULACIJA	9
5.5.3	AKUMULACIJA	9
5.6	MORFOLOŠKE LASTNOSTI PRAŠNIH DELCEV	10
5.7	KEMIČNA SESTAVA PRAŠNIH DELCEV.....	11
5.7.1	NAJBOLJ ZASTOPANE KOMPONENTE	12
5.8	PROIZVODNJA IN UPORABA PRAŠNIH DELCEV V INDUSTRIJI.....	13
5.8.1	EKSPLOZIJA	16
5.9	VPLIV PRAŠNIH DELCEV NA ZDRAVJE	17
5.9.1	DETERMINANTE DOVZETNOSTI.....	19
5.10	VPLIV NA OKOLJE.....	20
6	EKSPERIMENTALNI DEL	21
6.1	NAMEN NALOGE.....	21
6.2	HIPOTEZE	21
6.3	METODA DELA	21
6.3.1	ODVZEM VZORCEV	21
6.3.2	NAPAREVANJE OGLJIKA.....	22
6.3.3	ELEKTRONSKO MIKROSKOPIRANJE IN MIKROANALIZA Z ENERGIJSKO SPEKTROSKOPIJO RENTGENSKIH ŽARKOV.....	23
6.3.4	OPTIČNO MIKROSKOPIRANJE	25
6.3.5	ANALIZA VZORCEV.....	27
6.4	REZULTATI Z INTERPRETACIJO.....	27
6.4.1	SPALNO OKOLJE.....	28
6.4.2	KUHINJE	32

6.4.3	ŠOLSKI PROSTORI.....	35
6.4.4	DELAVNICE.....	42
6.5	DISKUSIJA.....	46
7	ZAKLJUČEK.....	47
8	BIBLIOGRAFIJA.....	48

KAZALO TABEL

Tabela 1:	Kemična sestava prahu iz Jakobove sobe.....	28
Tabela 2:	Kemična sestava prahu iz Larine sobe.....	30
Tabela 3:	Kemična sestava prahu iz Janove sobe.....	31
Tabela 4:	Kemična sestava prahu iz Jakobove kuhinje.....	32
Tabela 5:	Kemična sestava prahu iz Larine kuhinje.....	33
Tabela 6:	Kemična sestava prahu iz Janove kuhinje.....	34
Tabela 7:	Kemična sestava prahu iz jedilnice.....	35
Tabela 8:	Kemična sestava prahu iz šolskega hodnika.....	36
Tabela 9:	Kemična sestava prahu iz kemijskega laboratorija.....	37
Tabela 10:	Kemična sestava prahu iz učilnice za kemijo.....	39
Tabela 11:	Kemična sestava prahu iz Scidroma.....	40
Tabela 12:	Kemična sestava prahu iz lesne delavnice.....	42
Tabela 13:	Kemična sestava prahu iz mehanične delavnice.....	43
Tabela 14:	Kemična sestava prahu zunaj šole.....	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Velikost PM delcev	6
Slika 2: Vir: Emisije naravnih prašnih delcev po svetu	7
Slika 3: Emisije antropogenih prašnih delcev po svetu. V raziskavi niso bile vključene vse države	7
Slika 4: Izpusti delcev PM ₁₀ po sektorjih v Sloveniji v letu 2020	8
Slika 5: Elementi iz različnih virov prašnih delcev	11
Slika 6: Princip delovanja mlina z valji	13
Slika 7: Princip delovanja udarnega mlina	14
Slika 8: Princip delovanja mlina z medijem	14
Slika 9: Shema pogojev za eksplozijo prašnih delcev	16
Slika 10: Mehanizem vstopa prašnih delcev v telo	18
Slika 11: Vpliv koncentracije delcev na vidljivost	20
Slika 12: Matrica z vzorci pred napajenjem ogljika	22
Slika 13: Matrica z vzorci po napajenju ogljika	22
Slika 14: Elektrodi na pokrovu naprave za napajanje ogljika	22
Slika 15: Naprava za napajanje ogljika	22
Slika 16: Elektronski mikroskop in računalniki, s katerimi smo mikroskopirali in analizirali vzorce.	23
Slika 17: Vstavitve vzorca v elektronski mikroskop	23
Slika 18: Zgradba elektronskega mikroskopa	25
Slika 19: Zgradba optičnega mikroskopa	26
Slika 20: Prah iz Jakobove sobe pod OM	28
Slika 21: Lokacija odvzema prahu iz Jakobove sobe	28
Slika 22: Prah iz Jakobove sobe pod EM (1000×)	28
Slika 23: Prah iz Jakobove sobe pod EM (250×)	28
Slika 24: Lokacija odvzema prahu iz Larine sobe	30
Slika 25: Prah iz Larine sobe pod OM.	30
Slika 26: Prah iz Larine sobe pod EM (250×)	30
Slika 27: Prah iz Larine sobe pod EM (1000×)	30
Slika 28: Lokacija odvzema prahu iz Janove sobe	31
Slika 29: Prah iz Janove sobe pod OM	31
Slika 30: Prah iz Janove sobe pod EM (250×)	31
Slika 31: Prah iz Janove sobe pod EM (1000×).	31
Slika 32: Lokacija odvzema prahu iz Jakobove kuhinje	32
Slika 33: Prah iz Jakobove kuhinje pod OM	32
Slika 34: Prah iz Jakobove kuhinje pod EM (250×)	32
Slika 35: Prah iz Jakobove kuhinje pod EM (1000×).	32
Slika 36: Lokacija odvzema prahu iz Larine kuhinje	33
Slika 37: Prah iz Larine kuhinje pod OM	33
Slika 38: Prah iz Larine kuhinje pod EM (250×)	33
Slika 39: Prah iz Larine kuhinje pod EM (1000×).	33
Slika 40: Lokacija odvzema prahu iz Janove kuhinje	34
Slika 41: Prah iz Janove kuhinje pod OM	34
Slika 42: Prah iz Janove kuhinje pod EM (250×)	34
Slika 43: Prah iz Janove kuhinje pod EM (1000×).	34
Slika 44: Lokacija odvzema prahu iz jedilnice	35

Slika 45: Prah iz jedilnice pod OM.	35
Slika 46: Prah iz jedilnice pod EM (250×).....	35
Slika 47: Prah iz jedilnice pod EM (1000×).....	35
Slika 48: Lokacija odvzema prahu iz šolskega hodnika.....	36
Slika 49: Prah iz šolskega hodnika pod OM.....	36
Slika 50: Prah iz šolskega hodnika pod EM (250×).....	36
Slika 51: Prah iz šolskega hodnika pod EM (1000×).....	36
Slika 52: Lokacija odvzema prahu iz kemijskega laboratorija.....	37
Slika 53: Prah iz kemijskega laboratorija pod OM.	37
Slika 54: Prah iz kemijskega laboratorija pod EM (250×).....	37
Slika 55: Prah iz kemijskega laboratorija pod EM (1000×).....	37
Slika 56: Lokacija odvzema prahu iz učilnice za kemijo.....	39
Slika 57: Prah iz kemijske učilnice pod OM.....	39
Slika 58: Prah iz kemijske učilnice pod EM (250×).....	39
Slika 59: Prah iz učilnice za kemijo pod EM (1000×).	39
Slika 60: Lokacija odvzema prahu iz Scidroma.....	40
Slika 61: Prah iz Scidroma pod OM.....	40
Slika 62: Prah iz Scidroma pod EM (250×).....	40
Slika 63: Prah iz Scidroma pod EM (1000×).....	40
Slika 64: Lokacija odvzema prahu iz lesne delavnice.....	42
Slika 65: Prah iz lesne delavnice pod OM.....	42
Slika 66: Prah iz lesne delavnice pod EM (1000×).....	42
Slika 67: Prah iz lesne delavnice pod EM (250×).....	42
Slika 68: Lokacija odvzema prahu iz mehanične delavnice.....	43
Slika 69: Prah iz mehanične delavnice pod OM.....	43
Slika 70: Prah iz mehanične delavnice pod EM (250×).....	43
Slika 71: Prah iz mehične delavnice pod EM (1000×).....	43
Slika 72: Lokacija odvzema prahu zunaj šole.....	44
Slika 73: Prah zunaj šole pod OM.....	44
Slika 74: Prah zunaj šole pod EM (250×).....	44
Slika 75: Prah zunaj šole pod EM (1000×).....	44

1 ZAHVALA

Največja zahvala gre mentorjema dr. Kostji Makaroviču in profesorju Goranu Pešiću, ki sta nam raziskovanje približala na tak način, da smo ga še bolj vzljubili. Hvala za usmerjanje, pomoč in spodbudo ter dragoceni čas, ki ste nam ga namenili.

Zahvalili bi se tudi profesorici Valentini Mavrič Klenovšek, ki nam je pomagala izvesti mikroskopiranje z optičnim mikroskopom.

Zahvaljujemo se tudi Odseku za elektronsko keramiko K5, Inštitut Jožef Štefan, ki nam je omogočil kvalitetno izvedbo elektronskega mikroskopiranja.

Velika zahvala velja tudi Šolskemu centru Novo mesto, da so nam omogočili izvajanje raziskovalnega dela, saj brez šolskih laboratorijev in optičnega mikroskopa ne bi mogli izvesti eksperimentalnega dela naloge.

Zahvaljujemo se tudi profesorici Tini Cvijanović, ki je raziskovalno nalogo lektorirala.

Posebna zahvala velja našim staršem, ki nas spodbujajo in podpirajo že od začetka naše raziskovalne poti.

2 POVZETEK

V naši raziskovalni nalogi smo raziskovali prašne delce in njihove lastnosti. Prašni delci so delci v trdnem ali tekočem agregatnem stanju naravnega ali umetnega izvora. Glede na vir nastanka ločimo primarne in sekundarne delce, po velikosti pa jih ločimo glede na njihov aerodinamični premer. Njihova majhna velikost omogoča, da se hitro razširjajo po zraku ter negativno vplivajo na okolje in zdravje ljudi. Z absorpcijo in odbijanjem sončne svetlobe vplivajo na ohlajanje in segrevanje ozračja, s tem tudi na podnebne spremembe. V organizem ne vstopajo le z vdihavanjem, temveč tudi z zaužitjem, saj se nahajajo v prehranjevalnih verigah. Manjši, kot so delci, lažje prodrejo globlje v telo in težje se iz telesa odstranijo. Vplivajo ne le na dihala, temveč tudi na ostale organske sisteme. Kako in v kolikšni meri pa je odvisno od posameznika.

V naši raziskavi smo z mikroskopiranjem lokalnih vzorcev prahu iz zunanjih kot tudi iz notranjih prostorov raziskovali obliko, velikost in kemično sestavo delcev. Uporabili smo metode optičnega in elektronskega mikroskopiranja ter mikroanalize. S tem smo primerjali slike vzorcev obeh mikroskopov. S pomočjo mikroanalitske metode pa smo lahko določenim delcem določili sestavo in s tem pojasnili izvor.

KLJUČNE BESEDE: Prašni delci, mikroskop, okolje, kemična sestava.

3 ABSTRACT

In our research project, we investigated particulate matter and their properties. Particulate matter consists of particles of natural or artificial origin in a solid or liquid state. They can be classified into primary and secondary particles based on their source of origin and into different size categories based on their aerodynamic diameter. Their small size enables them to spread quickly through the air and negatively impact the environment and human health. By absorbing and reflecting sunlight, they also affect the cooling and heating of the atmosphere and thus climate change. Particulate matter can enter the body not only through inhalation, but also through ingestion, as they are present in food chains. Smaller particles can penetrate deeper into the body and are harder to remove from the body. They affect not only the respiratory system but also other organic systems, depending on the individual and the level of exposure.

In our study, we examined the shape, size and chemical composition of particles in local dust samples from both outdoor and indoor environments using microscopy techniques such as optical and electron microscopy, as well as microanalysis. By comparing images from both microscopes and using microanalytical methods, we were able to determine the composition of certain particles and explain their origin.

KEYWORDS: Dust particles, microscope, environment, chemical composition.

4 UVOD

Onesnaženost zraka je današnja realnost, s tem problemom se bomo soočali tudi v prihodnosti. Obkroža nas vsepovsod: doma, na delovnem mestu, na sprehodu ... Vsak dan se srečujemo s številnimi škodljivimi onesnaževalci, ki pri dolgotrajni izpostavljenosti negativno vplivajo na naše zdravje in počutje.

Med največje onesnaževalce zraka spadajo prašni delci. Ločimo jih po velikosti, obliki, kemični sestavi, izvoru in nastanku. Pomembno je izpostaviti, da je kar 80 % prašnih delcev naravnega izvora, največje koncentracije prašnih delcev pa so na območju Kitajske in Indije, ki sta tudi največji proizvajalki umetnih prašnih delcev. (Shaddick & drugi, 2020)

Kljub njihovim negativnim vplivom na človeka in okolje pa imajo pomembno vlogo v industriji, saj so osnovna surovina za številne gospodarske panoge.

Namen teoretičnega dela naše raziskovalne naloge je bil podrobneje raziskati prašne delce, njihov vpliv na okolje in človeka ter uporabnost v industriji. Praktični del pa smo izvedli z namenom, da bi ugotovili, iz česa je sestavljen prah v našem vsakdanjem življenjskem okolju in kakšen je njegov izvor.

RAZISKOVALNA VPRAŠANJA:

1. Ali se prašni delci v zunanjem okolju razlikujejo v primerjavi z notranjimi prostori?
2. Ali je sestava prašnih delcev odvisna od namena prostora, kjer je bil vzorec vzet?
3. Kateri elementi so v prašnih delcih najpogostejši?

5 TEORETIČNI DEL

5.1 ONESNAŽENOST ZRAKA

Onesnaženost zraka pomeni prisotnost nezaželenih snovi v zraku v množinah, ki so dovolj velike, da škodljivo vplivajo na zdravje ljudi in živali, vegetacijo in globalno okolje. (Jazbec, 2011) Onesnažen zrak je poleg podnebnih sprememb najpomembnejši dejavnik tveganja za bolezni. Kakovost zunanjega zraka predstavlja pomembno determinanto zdravja, ker smo mu izpostavljeni vsi in njegovega vpliva z zdravim življenjskim slogom ne moremo preprečiti. (Cegnar, Kofol Seliger, & drugi, 2019)

Poleg onesnaženosti zunanjega zraka ne smemo zanemariti niti onesnaženost notranjih prostorov, ki se je v zadnjih desetletjih zaradi vse večje uporabe in zadrževanja v notranjih prostorih znatno povečala. Prostori v zgradbah niso hermetično (nepredušno) zaprti, izmenjava zraka je stalna, vstopajoči zrak in njegove sestavine onesnažijo notranjost prostorov. (Cegnar, Kofol Seliger, & drugi, 2019)

Onesnaževalci zraka izvirajo iz naravnih in antropogenih (umetnih) virov. Med naravne izvore zračnega onesnaževanja štejemo pojave, kot so megla, ozon, emisije hlapnih organskih spojin iz rastlin, vulkanski izbruhi, dvigovanje puščavskega peska, gozdni požari, formiranje in prenašanje delcev morske soli, cvetnega prahu ter plesni. Antropogeno onesnaževanje pa je povezano s človeškim delovanjem in spreminjanjem geologije ter samega ekosistema, ki ga obkroža. (Marčenko, 2020)

Glavna onesnaževala zraka predstavljajo delci PM (oblika prašnih delcev), ogljikov monoksid, ozon, dušikov dioksid in žveplov dioksid, v Sloveniji pa so v zadnjih dvajsetih letih najbolj odmevni delci PM in ozon. Najvišje ravni onesnaženosti zraka s PM delci v Sloveniji so bile analizirane v prometno bolj obremenjenih mestnih središčih in v slabo prevetrenih kotlinah, kjer so pomemben vzrok onesnaženja tudi izpusti iz kurilnih naprav ter industrijskih virov. (Cegnar, Kofol Seliger, & drugi, 2019)

5.2 PRAŠNI DELCI

Prašni delci oziroma atmosferski aerosolni delci, trdni prašni delci ali lebdeči delci so delci v trdnem ali tekočem agregatnem stanju zmešani v zraku oziroma plinu. Prašni delec običajno ni sestavljen iz enega onesnaževala, temveč vsebuje mešanico onesnaževal različnih velikosti, oblik in kemijske sestave. Razlikujejo se tudi po izvoru ter nastanku. Lahko so neposredni produkt onesnaževanja iz antropogenega in naravnega vira ali pa se formirajo v atmosferi s pomočjo fizikalnih in kemijskih procesov, kot so koagulacija, kondenzacija in izparevanje. Delci so sčasoma odstranjeni iz atmosfere, bodisi s pomočjo vlage bodisi z odlaganjem na zemeljsko površje.

Prah je trdni delec, ki je produkt mehanskega drobljenja in lomljenja izvornih materialov.

Dim je heterogena zmes trdnih delcev, ki so nastali z izgorevalnimi procesi, iz plinov in kondenzirane vodne pare.

Smog oziroma fotokemični smog opisuje aerosole, ki so nastali v atmosferi s pomočjo sevanja sončne svetlobe na dušikove okside in ogljikovodike. (Marčenko, 2020)

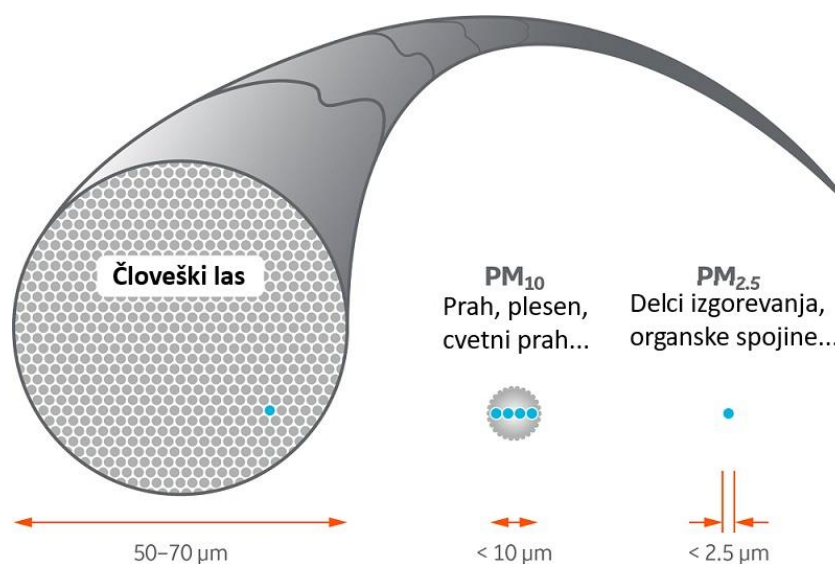
5.3 VELIKOST PRAŠNIH DELCEV

Velikost delcev opisujemo z aerodinamičnim premerom (AD), ki je določen kot premer okroglega delca z gostoto 1 g/cm^3 in pomeni, da se v zraku obnaša kot vodna kapljica definiranega premera. Delci v popolnem brezvetrju enake oblike in velikosti pri istih pogojih (temperatura, tlak, relativna vlažnost), toda različne gostote, imajo tako različen aerodinamičen premer.

Glede na velikost aerodinamičnega premera jih delimo na:

- ultrafine delce (UFP-angleško: ultra fine particles) z $\text{AD} < 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, ki zaradi svoje majhnosti veljajo za najnevarnejše med delci,
- fine delce z $\text{AD} 0,1\text{-}2,5 \text{ }\mu\text{m}$,
- grobe delce z $\text{AD} 2,5\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$ in
- celotno suspendirane delce (TSP - angleško: total suspended particles), ki predstavljajo večino v zraku lebdečih delcev z $\text{AD} 500\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$.

Še na bolj standarden in mednarodni način jih delimo na PM_{10} ($\text{AD} < 10 \text{ }\mu\text{m}$), $\text{PM}_{2,5}$ ($\text{AD} < 2,5 \text{ }\mu\text{m}$) in PM_1 delce ($\text{AD} < 1 \text{ }\mu\text{m}$) (particulate matter). (Cytiva, 2023)

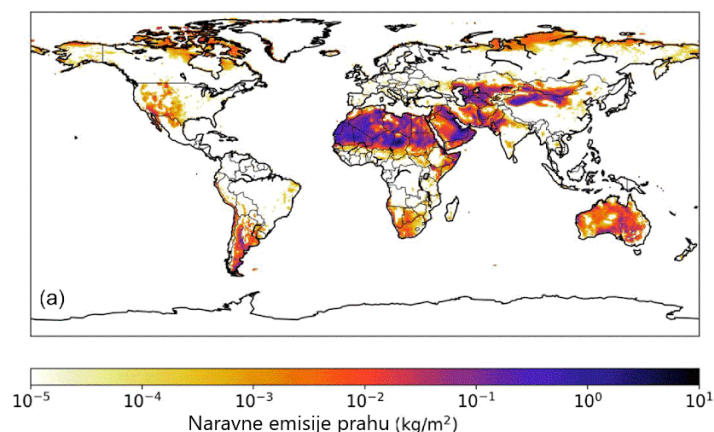


Slika 1: Velikost PM delcev. Vir: (Cytiva, 2023).

5.4 IZVOR PRAŠNIH DELCEV

Glede na izvor prašne delce delimo na naravne in antropogene. Kljub današnjemu prepričanju, da smo ljudje največji onesnaževalci, je skupina raziskovalcev z analizo prišla do zaključka, da prah le v 19 % izvira iz človekovega onesnaževanja, v 81 % pa izvira iz naravnih virov.

Največji naravni onesnaževalci s prahom so velike puščave (slika 2), kot npr. puščava Sahara, puščava Taklamakan, puščave na Arabskem polotoku in na zahodnem delu Avstralije. (Meinander & drugi, 2022)



Slika 2: Vir: Emisije naravnih prašnih delcev po svetu. (Meinander & drugi, 2022).

Največ onesnaženja s prašnimi delci je v državah, v katerih večji del gospodarstva predstavlja industrija, torej Kitajska, Indija, Severna Amerika in Evropa (slika 3).

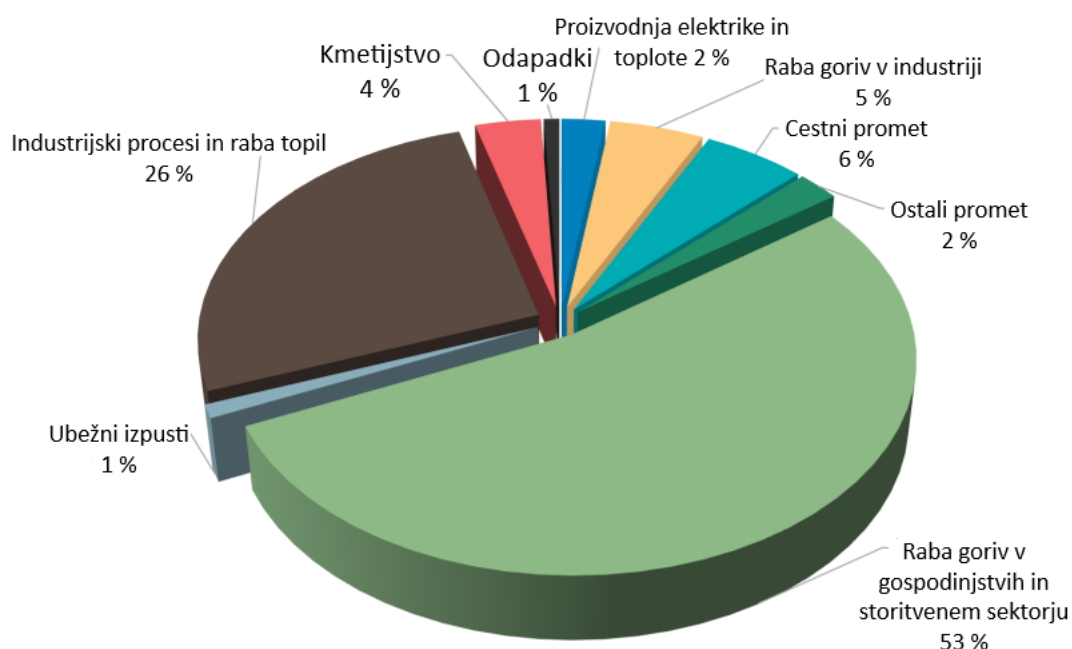


Slika 3: Emisije antropogenih prašnih delcev po svetu. V raziskavi niso bile vključene vse države.
Vir: (The World Air Quality Index project, 2022).

Večina prašnih delcev naravnega izvora se nahaja na območjih s suhim podnebjem in reliefom, primernim za nastanek prahu (suha tla, pesek, prhka zemlja...), kjer večje vetrne mase vzdignejo prašne delce in jih raznesejo po svetu. Zanimiv pojav je visoka koncentracija solnih kristalov v prahu obmorskih mest/krajev, ki nastanejo zaradi razslojevanja delov slane vode, ki jih nato veter prinese na obalo ali celo globlje v celino. Naravni izvor prašnih delcev je lahko tudi erozija kamenin, naravno povzročeni požari v naravi, cvetni prah, vulkanski prah, plesni itd.

Kljub temu da je doprinos človeka k onesnaženosti s prašnimi delci samo 19-odstoten, predstavljajo tisti del, ki je najpogostejše škodljiv za zdravje ljudi, živali in rastlinstva, in tisti, ki ga lahko z odgovornim ravnanjem zmanjšamo. V raziskavi, kjer so znanstveniki merili izvore prahu na 419 merilnih mestih v 51 državah, so ugotovili, da so izvori prašnih delcev in njihovi deleži, ki prispevajo k onesnaženosti zraka, slednji:

- Promet (obrada zavor, pnevmatik, vozišč): 22 %
- Ogrevanje s kurjenjem v gospodinjstvih (drva, peleti, kurilno olje, plin za kuhanje...): 22 %
- Industrijske dejavnosti (proizvodnja električne in toplotne energije s kurjenjem nafte, premoga ter ostalih fosilnih goriv; proizvodni obrati kemične, farmacevtske, metalurške in ostalih vrst industrije): 15 %
- Ostali viri človeškega izvora (kmetijske dejavnosti, gradnja objektov, obdelovanje in shranjevanje odpadkov ipd.): 22 %
- Viri naravnega izvora: 18 % (Marčenko, 2020)



Slika 4: Izpusti delcev PM_{10} po sektorjih v Sloveniji v letu 2020. Vir: (Bec & drugi, 2022).

5.5 PROCESI NASTANKA DELCEV

Vir nastanka prašnih delcev je lahko primaren (primarni delci) ali sekundaren (sekundarni delci).

- Primarni delci so posledica direktne emisije iz antropogenih ali naravnih virov onesnaževanja, sestavljeni iz organskih in anorganskih komponent.
- Sekundarni delci naravnega ali antropogenega izvora nastanejo v ozračju iz predhodnih plinov (najpogosteje iz žveplovih, dušikovih oksidov, hlapnih organskih spojin...) kot posledica kemičnih reakcij (predvsem oksidacije) in fizikalnih procesov, ki vodijo do nastanka težkohlapih snovi. Slednje kondenzirajo in postanejo delci. (Sedej, 2016)

Opisali bomo nekatere procese nastanka delcev.

5.5.1 NUKLEACIJA

Zapleten proces, v katerem nastajajo sekundarni delci, se imenuje nukleacija. Gre za začetek formiranja delcev, v katerem težko hlapljive molekule kondenzirajo v tekočo ali trdno fazo. Poznana sta dva tipa nukleacije: heterogena in homogena.

Večina sekundarnih delcev v atmosferi nastane s heterogeno nukleacijo. Novonastale snovi kondenzirajo na obstoječe delce in s tem povzročajo njihovo rast. Kondenzacija je najizrazitejša na majhnih in srednje velikih delcih.

V procesu homogene nukleacije molekule z zelo nizkim parnim tlakom (težko hlapne) že ob odsotnosti obilice obstoječih delcev medsebojno kondenzirajo in s tem tvorijo nove delce. Najbolj znani proces nukleacije se pojavi, ko pri atmosferski oksidaciji SO_2 nastane žveplova kislina H_2SO_4 . Ta lahko zaradi svoje higroskopnosti reagira z vodno paro, da nastanejo nove kapljice raztopine sulfata.

Nukleacijsko obliko tvorijo delci s premerom, manjšim od 50 nm, ki služijo kot osnova za nastanek kapljic oziroma oblakov. Posledično so lahko odstranjeni iz atmosfere s padavinami, a kljub temu ostanejo v zraku od 7 do 30 dni. (Great Britain Air Quality Expert Group, 2005)

5.5.2 KOAGULACIJA

Koagulacija je proces, pri katerem delci trčijo in se združijo v večje delce. Pogoj za to je zadostna koncentracija delcev. Če v zraku ni pojava novega onesnaženja ali novih tvorb delcev z nukleacijo, upada koncentracija delcev, povečuje pa se njihova velikost. (Tomasi & Lupi, 2016)

5.5.3 AKUMULACIJA

Rast delcev vodi v nastanek akumulacijske oblike delcev, ki so veliki od 50 nm do 1000 nm (1 μm). Zaradi svoje prevelike velikosti niso podvrženi hitremu Brownovemu gibanju in usedanju, zaradi premajhne koncentracije delcev in posledično počasne koagulacije pa ne dosežejo velikosti grobih delcev, večjih od 1 μm . Delci ostanejo suspendirani v zraku 1-2 tedna, s padavinami se ne odstranjujejo učinkovito. (Great Britain Air Quality Expert Group, 2005)

5.6 MORFOLOŠKE LASTNOSTI PRAŠNIH DELCEV

Morfološke lastnosti oziroma oblika delcev vpliva na obnašanje delcev v zraku in dihalnih poteh. Poznamo štiri pomembnejše tipe oblik delcev:

- SFERIČNA OBLIKA

Prašni delec sferične oblike ima obliko krogle in je videti povsem enako, ne glede na to, iz katerega kota ga gledate. Zato se bo delec v bistvu odzval enako, ne glede na to, kako nanj deluje sila. Ko pa postane delec manj okrogel, geometrija delca ponuja več prostora za sile, ki nanj vplivajo iz določenih kotov in manj iz drugih. Krogla ima največji volumen oziroma maso na enoto površine. In večja, kot je razpoložljiva površina, večja sila bo delovala na delec, kar lahko povzroči, da se delec premika v zračnem toku, npr. vrtenje, nihanje itd. Tovrstni delci se največkrat uporabljajo v industriji kot polistiren, grafit, titan in aluminij. (Hobson, 2021)

- IZOMETRIČNA (NEPRAVILNA) OBLIKA

Pri tej obliki delcev nobena dimenzija ni prevladujoča, razmerje med dolžino in širino je okoli 1:1. Delci zavzamejo nepravilne nesferične oblike ponavadi v papirni industriji, izgorevanju premoga in biomase. Zaradi njihove nepravilne oblike so dinamične sile tekočin in plina, ki delujejo na te delce, dokaj neznane. (Castang & drugi, 2022)

- OBLIKA PLOŠČIC

Ta oblika predstavlja delce, ki imajo ogromno površine na enoto mase, kar pomeni, da se težje akumulirajo, dinamična sila tokov pa ima velik vpliv na njihovo premikanje. Najdemo jih v kamnolomih in rudnikih. (Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2018)

- OBLIKA VLAKEN

Ta oblika delcev ima dolžino vsaj trikrat večjo od polmera. Takšna vlakna so največkrat v prostorih tekstilne industrije zaradi bombažnih vlaken, v rudnikih zaradi prisotnosti azbestnih kristalov ter v izolaciji hiš kot steklena vlakna. (Castang & drugi, 2022)

5.7 KEMIČNA SESTAVA PRAŠNIH DELCEV

Kemična sestava delca je lahko homogena, kar pomeni, da je prevladujoča sestava delca iz enega kemijskega elementa. Večina delcev pa je heterogene kemične sestave, ki so zaradi procesov kondenzacije in koagulacije sestavljeni iz več različnih elementov.

Raznolika kemična sestava prašnih delcev je povezana z njihovo velikostjo. Znano je, da so fini delci večinoma kisli in vsebujejo pretežno sulfate, dušikove spojine, ogljikovodike, elementarni ogljik, strupene kovine, vodo, v sledovih pa tudi težke kovine (As, Cd, Cs, Sr, Zn, Se...). Grobe delce pa sestavljajo večinoma elementi zemljine skorje, kot so silicij, železo, kalcij in aluminij ter njihovi oksidi, soli ter drobci organskega izvora. Kemična sestava je poleg velikosti delcev tudi najpomembnejši faktor, ki določa toksičnost delcev in vpliv na naše zdravje. (Dimitrios & drugi, 2014)

VIR ONESNAŽENJA	ELEMENTI V DELCIH
PROMET Motorna vozila Obraba motorja Katalizatorji Obraba gum Dvigovanje obcestnega prah	Br, Pb, Mn, Cl, Zn, V, Ni, Se, Sb, As Fe, Al Redke kovine Zn Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Zn
INDUSTRIJSKI OBRATI Naftne termoelektrarne Zgorevanje premoga Rafinerije Talilnice neferomagnetnih kovin Železarne Industrijski obrati proizvodnje mangana Rafinerije bakra	V, Ni Se, As, Cr, Co, Cu, Al, S, P, Ga V As, In, Ni, Cu, Zn Pb Mn Cu
MANJŠI IZGOREVALNI PROCESI Sežigalnice odpadkov Izgorevanje lesa	Zn, Sb, Cu, Cd, Hg, K, Pb Ca, Na, K, Fe, Br, Cl, Cu, Zn
OBDELAVA MINERALOV	Mg, Al, K, Sc, Fe, Mn
PRŠENJE MORSKE VODE	Na, Cl, S, K

Slika 5: Elementi iz različnih virov prašnih delcev. Vir: (Dimitrios & drugi, 2014).

5.7.1 NAJBOLJ ZASTOPANE KOMPONENTE

Glavne komponente, ki običajno obsegajo vsaj nekaj odstotkov mase delcev, najpogosteje vključujejo naslednje snovi:

- **Sulfat** – nastaja predvsem kot sekundarna komponenta (v sekundarnih delcih) z oksidacijo SO_2 , lahko pa tudi kot primarna komponenta (v primarnih delcih), ki izvira iz morske soli in mineralnih snovi
- **Nitrat** – običajno prisoten kot NH_4NO_3 , ki nastane pri nevtralizaciji hlapov HNO_3 z NH_3 ; ali kot natrijev nitrat (NaNO_3), ki nastane med NaCl in HNO_3
- **Amonijak** – običajno prisoten v obliki amonijevega sulfata $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ ali NH_4NO_3
- **Natrij in klor** – v obliki morske soli
- **Elementarni ogljik** – posledica zgorevanja fosilnih goriv in biomase pri visokih temperaturah
- **Ogljik, vezan v organskih spojinah** – bodisi kot primarna komponenta, ki izhaja iz prometa in industrije, bodisi kot sekundarna komponenta, ki izhaja iz oksidacije hlapov organskih spojin
- **Mineralne snovi** – izhajajo iz trdnih materialov (zemljine, kamenine), bogate z elementi zemljine skorje
- **Voda** – vodotopne komponente delcev, kot so $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 in NaCl nase vežejo vodo iz atmosfere pri visoki vlažnosti in se iz kristalčkov pretvorijo v tekočo raztopino. (Great Britain Air Quality Expert Group, 2005)

5.8 PROIZVODNJA IN UPORABA PRAŠNIH DELCEV V INDUSTRIJI

Kljub škodljivim vplivom za okolje ter za človeka je uporaba prašnih delcev ključnega pomena za številne industrijske procese. Proizvodnja prašnih delcev za industrijske namene poteka po več različnih postopkih, velikokrat pa je pogojena tudi z osnovno surovino, iz katere želimo ustvariti prašne delce. Fizikalne lastnosti surovine (trdota, temperatura tališča) in kemijske lastnosti surovine (jedkost, toksičnost, reaktivnost v različnih atmosferah) določajo izbiro procesne metode, ki jo uporabijo za proizvodnjo prašnih delcev.

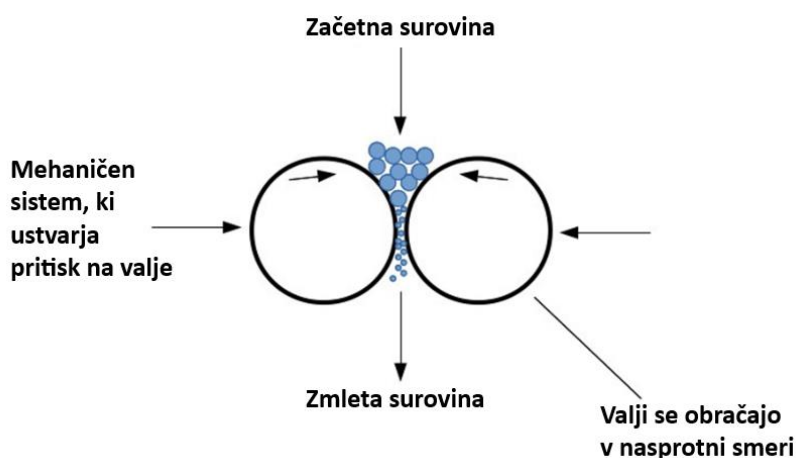
Najpogostejša in tudi najstarejša metoda proizvodnje prašnih delcev je zagotovo mletje, saj so to metodo uporabljali že v prazgodovini za mletje žita in proizvodnjo moka. V teoriji poznamo 3 različne principe mletja snovi, ki jih uresničimo z različnimi napravami in procesi:

1. PRINCIP: Uporaba dveh trdnih površin – trdna snov, stisnjena med dve rotirajoči ali stacionarni površini, razpade na manjše dele zaradi trenja ali sile med površinama.
2. PRINCIP: Uporaba ene same trdne površine – trdna snov je s silo udarjena po površini in zato razpade na manjše delce.
3. PRINCIP: Trdna snov se razreže – za lomljenje delcev se uporabljajo strižne sile ali tlačni valovi.

Iz teh treh načinov spreminjanja trdne snovi v prašne delce je bilo razvitih več tipov naprav, ki služijo isti funkciji, a z drugačnim postopkom. Po končanem postopku mletja sledi še razvrščanje delcev glede na njihovo velikost. (Rhodes, 1990)

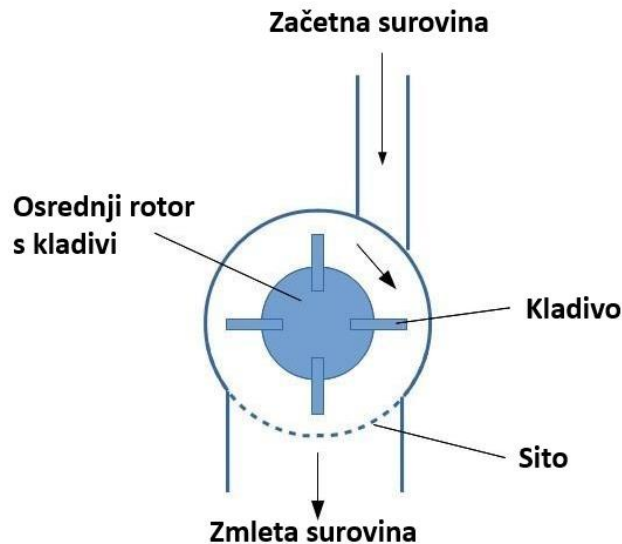
Vrste mlinov so:

- **MLIN Z VALJI** (slika 6): opremljen je z dvema valjema, ki se vrtita v nasprotni smeri glede na drug drugega. Ko trdna snov vstopi oziroma je povlečena med valja, je izpostavljena velikemu pritisku in strižnim silam. Največjo učinkovitost pridobimo, če povežemo več mlinov zapored in s tem po stopnjah manjšamo velikost delcev.



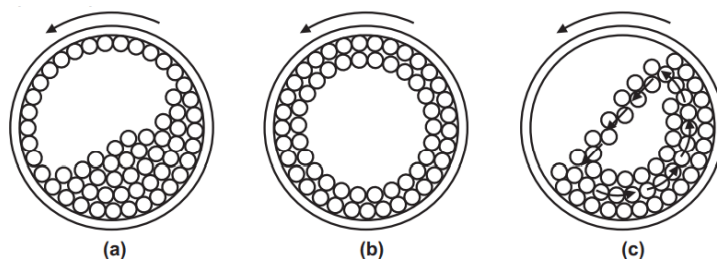
Slika 6: Princip delovanja mlina z valji. Vir: (Rhodes, 1990).

- **UDARNI MLIN** (slika 7): Ta tip mlina deluje po drugem principu. Naprava je sestavljena iz osrednjega rotorja, na katerem je več kladiv (najpogosteje velike, težke plošče), ki se vrtijo s hitrostjo od 40 do 70 m/s. Ko v tak mlin dovedemo trdno snov, kladiva trčijo vanjo in jo razbijejo na manjše delce, ki pa iz mlina odidejo skozi sito.



Slika 7: Princip delovanja udarnega mlina. Vir: (Rhodes, 1990).

- **MLINI Z MEDIJI ZA ZMANJŠEVANJE VELIKOSTI** (slika 8): pogosto jim rečemo tudi kroglični mlini, saj je medij najpogosteje veliko število kroglic. Trdno snov in medij (kroglice, palice itd.) se vsuje v valjasto posodo, to pa se nato rotira z optimalno hitrostjo, da kroglice prosto padajo. Med padanjem stiskajo trdno snov med sabo in med stranico posode. Poznamo suh in moker način tega mletja. Ta tip mlina je eden izmed največkrat uporabljenih.



Slika 8: Princip delovanja mlina z medijem. Vir: (Pharmacy Gyan, 2023).

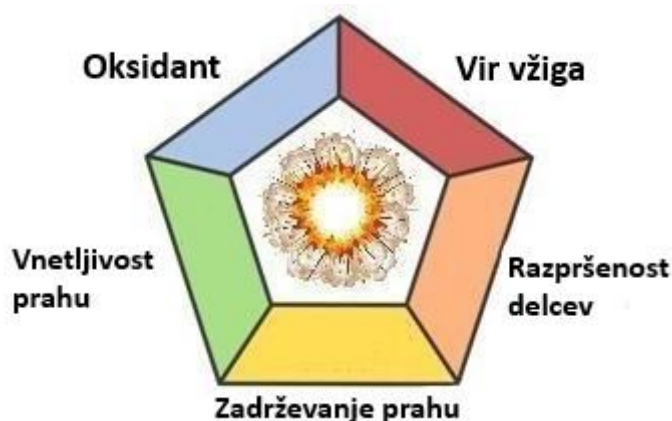
Izmed vseh surovin, ki jih uporabljamo v prašni obliki, so najpogostejše kovine oziroma njihove spojine:

- Aluminij v prahu se uporablja za izdelavo barvnih efektov v ognjemetu in v sončnih celicah za proizvodnjo električne energije.
- Bizmutov prah se lahko uporablja kot zamenjava za svinec za zaščito pred sevanjem in za različne zlitine.
- Granuliran baker se najpogosteje uporablja za proizvodnjo samopodmazovalnih ležajev, zlitin in zaščitnih nanosov.
- Železov prah se uporablja za izdelavo magnetov, zlitin, nanosov in tudi vsakodnevnih predmetov, kot so zavorne ploščice.
- Manganov prah se uporablja za zlitine, ki se uporabljajo za izdelavo zelo trdnega jekla in orodja.
- Nikljev prah v zlitini z železom tvori nerjaveče jeklo in se uporablja za prevodnike v elektronski industriji (keramični kondenzatorji, keramična vezja, ipd).
- Cink v prahu pa uporabljamo za galvanizacijo in izdelavo medenine.
- Prahovi žlahtnih kovin se prav tako uporabljajo za izdelavo prevodnih linij na vezjih v keramičnih vezjih, pa tudi polimernih vezjih, ki se uporabljajo na primer v senzorjih za merjenje krvne glukoze.
- Različne vrste oksidnih in neoksidnih materialov, ki so surovina za različne tehnične keramike (dielektriki, piezoelektriki, varistorji...).

Metalurgija materialov, proizvedenih iz prašnatih surovin, pa je še vedno zelo hitro razvijajoče se področje. (Nakach & drugi, 2004)

5.8.1 EKSPLOZIJA

Pri izdelavi prašnih delcev iz trdne snovi je pomembno, da je poskrbljeno za zaščito pred industrijskimi nesrečami. Za te obrate so najbolj značilne eksplozije oziroma požari. Ti se zgodijo (slika 9), ko je večja količina gorljivih prašnih delcev razpršena v atmosferi, ki vsebuje dovolj kisika, da se ob pravilnem razmerju oziroma razpršenosti prašnih delcev ustvari zelo vnetljiva mešanica. Po samem kemijskem delovanju so te nesreče podobne eksploziji plina, a je eksplozijo prašnih delcev veliko težje doseči. Poleg goriva (prašnih delcev) in oksidanta (kisik v zraku) je za eksplozijo potreben tudi vir vžiga, kar lahko predstavlja električna iskra, odprt plamen, elektrostatika, vroče površine ipd., med njimi pa prevladuje električna iskra, povzročena zaradi elektrostatike.



Slika 9: Shema pogojev za eksplozijo prašnih delcev. Vir: (Kuracina & drugi, 2015).

Na moč eksplozije vpliva veliko faktorjev: gorljivost prašnih delcev, njihova velikost in oblika, pravilna razpršenost in razmerje z oksidativno atmosfero, moč vira vžiga in količina razpršenega prahu. Pomemben je tudi pojav sekundarne eksplozije, ki jo z dvigom oblaka prahu povzroči prva oziroma primarna eksplozija. Ta je veliko močnejša in največkrat povzroči večino škode.

Ker take nesreče povzročijo ogromno gospodarsko in zdravstveno škodo, je v interesu industrije, da se njihova pogostost čimbolj zmanjša. Pasivni načini preprečevanja nesreč so eliminacija vira vžiga, primerno prezračevanje ter vzdrževanje inertne atmosfere ali atmosfere z manjšo vsebnostjo kisika v predelih, ki so v stiku s prašnimi delci. V primeru eksplozije pa obstaja tudi nekaj aktivnih načinov zmanjševanja škode. Načrtno konstruiranje šibkih točk je najpogostejša in najcenejša izmed teh metod. (Fayed & drugi, 1997)

5.9 VPLIV PRAŠNIH DELCEV NA ZDRAVJE

Onesnažen zrak predstavlja tveganje za zdravje, ki se mu vsaj v urbanem okolju praktično ni možno izogniti. V Evropi je okoli 90 odstotkov mestnega prebivalstva izpostavljenega prekomernim vrednostim prašnih delcev, dušikovih oksidov, ozona in benzena v zunanjem zraku. Epidemiološke raziskave dokazujejo, da lahko onesnažen zrak pomembno vpliva na zdravje ljudi in da v Evropi vsako leto od 40.000 do 130.000 ljudi umre za posledicami izpostavljenosti onesnaženemu zraku, ki ga povzroča promet. V Franciji, Švici in Avstriji so ugotovili, da 6 % vseh smrti letno lahko pripišejo izpostavljenosti onesnaženemu zraku, kar je dvakrat več, kot je žrtev prometnih nesreč. Ocene o številu umrlih in obolelih za posledicami izpostavljenosti onesnaženemu zraku so podcenjene, saj temeljijo na rezultatih študij, v katerih so preučevali le kratkotrajne učinke onesnaženja. Če upoštevamo dolgotrajno izpostavljenost nižjim koncentracijam onesnaževal, so te številke dejansko še večje. (Uršič & drugi, 2014)

Najdemo jih tudi v prehranjevalni verigi, prek katere se vpliv na zdravje ljudi in živali še poveča. Tako smo prašnim delcem in nasploh onesnaževalcem zraka izpostavljeni tudi preko vode in hrane. (Nacionalni laboratorij za okolje, zdravje in hrano; Nacionalni inštitut za javno zdravje; Agencija Republike Slovenije za okolje, 2019)

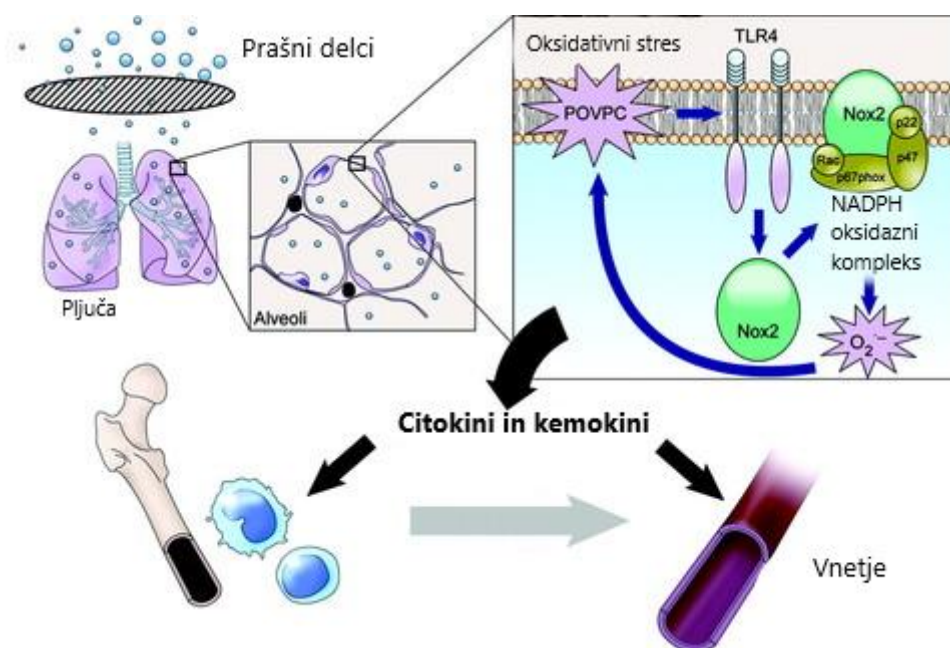
Z vidika onesnaženosti zraka imajo najbolj negativen vpliv na zdravje ljudi PM delci. Celo ravni pod sedanjimi zakonodajnimi mejnimi vrednostmi predstavljajo zdravstveno tveganje. Poročila Svetovne zdravstvene organizacije kažejo na to, da ne obstaja meja, pod katero ni pričakovati vpliva na zdravje. (Bec & drugi, 2022)

Za delce PM₁₀ sta predpisani dnevna in letna mejna vrednost. Dnevna mejna vrednost, ki znaša 50 µg/m³, ne sme biti presežena več kot 35-krat v koledarskem letu. Letna mejna vrednost je 40 µg/m³ za delce PM₁₀ in 25 µg/m³ za delce PM_{2,5}, na njihovo vrednost pa vplivajo tudi vremenske razmere. Koncentracije delcev PM₁₀ so višje pozimi, ko se za onesnaženost zraka manj ugodnim vremenskimi razmeram, kot sta temperaturni obrat in slaba prevetrenost, poleg stalno prisotnih, priključijo še kurišča na lesno biomaso kot dodatni viri onesnaževanja zraka. Z zmanjšanjem tovrstne onesnaženosti bi lahko pomembno zmanjšali umrljivost, povezano z onesnaženostjo zraka. (Uršič & drugi, 2014)

PM delci so zdravju škodljivi zaradi zmožnosti globokega prodiranja v naše telo. Delci do velikosti 35 µm še lahko lebdiijo v zraku, zato jih pri dihanju tudi vdihavamo. Manjši, kot so delci, lažje prodrejo globlje v telo. Glede na to, kako globoko v dihalne poti prodrejo posamezni delci, ločimo inhalabilne delce (s premerom med 2,5 in 10 µm) in respirabilne delce (s premerom pod 2,5 µm). (Uršič & drugi, 2014)

Prašni delci, premera nad 10 µm, se običajno ustavijo v vlažnem okolju nosne votline in žrela, inhalabilni delci potujejo v pljuča (bronhije), respirabilni pa preidejo celo v pljučne mešičke in v krvni obtok, kar povzroča okvare respiratornega, kardiovaskularnega, imunskega in živčnega sistema. (Jug & Jug, 2021)

Do vnetij ali poškodb tkiva prihaja tako zaradi kemijskih in tudi fizikalnih interakcij med delci in tkivom. Na mestu vstopa v telo delci povzročajo nastanek oksidativnega stresa, ki vodi v vnetje (slika 10). Ta povzroča poslabšanje obstoječih bolezni dihal in ob dolgotrajnem delovanju kronično vnetno reakcijo, ki povzroči zmanjšanje pljučne funkcije. Preko sproščenih mediatorjev vnetja delci povzročajo povečanje koncentracije koagulacijskih faktorjev, nastanek krvnih strdkov, kar lahko vodi v nastanek možganskega in srčnega infarkta. Na srce delujejo tako, da povzročajo motnje ritma, večajo odzivnost srca na kateholamine, vplivajo na repolarizacijo srčne mišice in večajo srčno ishemijo, kar pomeni, da srčna mišica ne dobiva dovolj krvi, da bi lahko delovala. Delci delujejo tudi na žilni sistem, preko mehanizma oksidativnega stresa povzročajo in pospešujejo nastanek ateroskleroze. Zdi se, da je osnovni mehanizem delovanja nastanek oksidativnega stresa. (Uršič & drugi, 2014)



Slika 10: Mehanizem vstopa prašnih delcev v telo. Vir: (Conklin, 2011).

Iz epidemioloških študij je razvidno, da je učinek trdnih delcev na zdravje odvisen od koncentracije in časa izpostavljenosti.

Dolgotrajna stalna izpostavljenost ima neprimerno večji vpliv na zdravje kot občasna kratkotrajna izpostavljenost večjim koncentracijam delcev. Epidemiološke študije kažejo, da dolgotrajna izpostavljenost trdnim delcem večja umrljivost za boleznimi dihal, srca in ožilja ter pljučnim rakom, povzroča in pospešuje pa tudi razvoj ateroskleroze. Učinek delcev PM₁₀ na srčno žilne bolezni je močnejši kot na bolezni dihal.

Za pojav negativnih učinkov na zdravje so poleg velikosti prašnih delcev pomembne tudi njihove fizikalno-kemijske lastnosti. Površina zelo finih prašnih delcev (<0,1 μm) je bistveno večja od površine enako težkih, vendar večjih prašnih delcev, kar olajša raztapljanje in absorpcijo snovi, ki so vezane nanje. Ker jih alveolarni makrofagi slabše odstranjujejo, ostanejo zelo fini prašni delci dlje časa v področju pljučnih mešičkov in povzročajo draženje. (Biblan, 2014)

To se še posebej dogaja pozimi, ko je temperatura v pljučih precej višja kot v zunanjem zraku. Zaradi toplejšega okolja se snovi, vezane na delce, med katerimi so tudi zelo nevarna onesnaževala, sprostijo in poškodujejo pljučno tkivo. (U.S. Environmental Protection Agency, 2003)

Snovi trdnih delcev PM₁₀ in PM_{2,5}, ki povečajo toksičnost, so:

- kovine (železo, baker, svinec, kadmij, nikelj, arzen, živo srebro), ki poškodujejo dedni material, povzročijo vnetje,
- organska topila, ki poškodujejo dedni material; so rakotvorna, predvsem policiklični aromatski ogljikovodiki. (Conklin, 2011)

Pri onesnaževalih v plinasti obliki pogojuje globino prodiranja vzdolž dihalne poti topnost v vodi. Plini, ki se bolje raztapljajo v vodi, reagirajo s plastjo sluzi višje v dihalni poti, slabše vodotopni plini pa lahko prodrejo vse do pljučnih mešičkov. Žveplov dioksid tako prodre najdlje do bronhiolov, medtem ko dušikov dioksid in ozon prodirata do pljučnih mešičkov. (Biblan, 2014)

5.9.1 DETERMINANTE DOVZETNOSTI

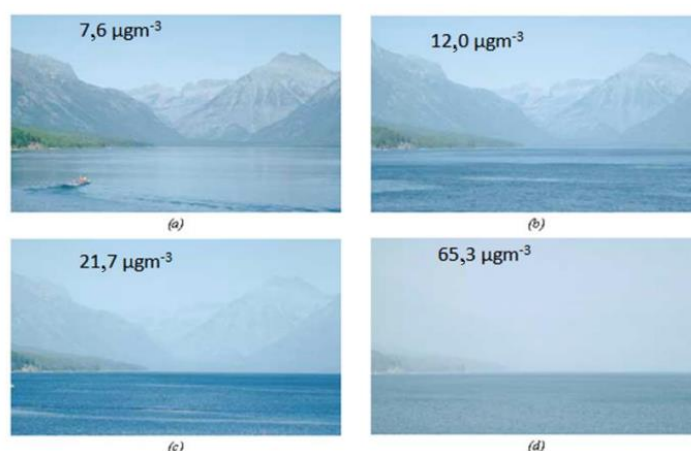
Občutljivost na onesnažen zrak se razlikuje pri vsakem posamezniku in je odvisna od številnih faktorjev. Med najranljivejše skupine med zdravimi ljudmi spadajo otroci, starejši in nosečnice. Tveganje za obolevnost povečajo že predobstoječe bolezni, kot so kronične pljučne in srčne bolezni (kot npr. KOPB-kronična obstruktivna pljučna bolezen, pljučnica, ishemična bolezen srca ...), astma, sladkorna bolezen. Študije so dokazale, da na smrtnost in obolevnost vpliva tudi nižji družbenoekonomski status oziroma nižja izobrazba, saj to vpliva na lokacijo življenjskega okolja (npr. zapuščena mestna središča). (Sacks & drugi, 2011) Pomembno vlogo ima tudi prehrana človeka. Medtem ko prenašanje in debelost zvišujeta tveganje za diabetes, lahko vnos antioksidantov v telo zmanjša tveganje za večjo obolevnost zaradi PM delcev. (Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, 2006)

5.10 VPLIV NA OKOLJE

Aerosoli imajo pomembno vlogo pri energijski bilanci Zemlje. Povečana količina aerosolov v atmosferi ima nasproten učinek kot toplogredni plini, saj povzroča ohlajanje. (Cegnar, Kofol Seliger, & drugi, 2019)

Poleg negativnega vpliva na zdravje ima onesnaženost z delci vpliv tudi na podnebje in ekosisteme, kar omogoča njihova sposobnost prepotovati dolge razdalje s pomočjo vetra, preden se usedejo na tla ali v vodo ter zadrževanje teh delcev v mestnih središčih, dolinah, kotlinah zaradi oblike reliefa, kjer lahko ostanejo tudi več tednov. (Quality of Urban Air Review Group., 1996)

Delci v ozračju zmanjšujejo vidljivost (slika 11), povzročajo škodo na objektih, vplivajo na padavinski režim in spreminjajo odbojnost zemeljske površine za svetlobo. Prašni delci namreč razpršijo ali absorbirajo sončno svetlobo in tako vplivajo na ohlajanje ali segrevanje ozračja. Posledično pripomorejo k podnebnim spremembam oziroma globalnemu segrevanju, kar vpliva na dvig temperature ozračja, posledično na taljenje ledenikov, dvigovanje morske gladine, velike suše, izumrtje živalskih in rastlinskih vrst ... Povišane ravni delcev se pri nas tipično pojavljajo v zimskih mesecih, ko se v prizemnih plasteh pogosto pojavi temperaturni obrat. V teh plasteh se pojavi šibko vertikalno mešanje zraka, kar povzroči, da se onesnaževala dlje časa zadržujejo v bližini tal. Obenem so v zimskih mesecih najbolj aktivna mala kurišča, ki imajo največji prispevek k izpustom delcev PM₁₀. Poleg tega delci, ki vsebujejo dušikove in žveplove spojine (produkt zgorevanja fosilnih goriv) povzročajo zakisanost voda (kisli dež). (Bec & drugi, 2022).



Slika 11: Vpliv koncentracije delcev na vidljivost. Vir: (Miuc, 2017).

Poleg tega vplivajo še na:

- Spreminjanje sestave tal (ravnovesja hranil) v obalnih vodah in velikih porečjih
- Izčrpavanje hranilnih snovi
- Uničevanje občutljivih gozdov in kmetijskih pridelkov
- Zmanjševanje biodiverzitete v ekosistemi
- Nastajanje kislega dežja (U.S. Environmental Protection Agency, 2022)

6 EKSPERIMENTALNI DEL

6.1 NAMEN NALOGE

Z izvedbo eksperimentalnega dela raziskovalne naloge smo želeli raziskati sestavo prahu v našem življenjskem okolju in kakšen je njegov izvor. Zanimala nas je razlika med delci v notranjem in zunanjem okolju, saj v modernem načinu življenja preživimo velik del svojega časa v notranjih prostorih. Raziskati smo želeli, ali je namen prostora povezan s sestavo prahu in kateri delci so najpogostejši.

6.2 HIPOTEZE

1. Najpogostejši anorganski prašni delci vsebujejo pretežno kalcij.
2. Prašni delci so najpogostejše organskega izvora.
3. V primerjavi z zunanjim okoljem je v notranjih prostorih večja koncentracija organskih delcev, v zunanjih okoljih pa je raznolikost delcev večja.
4. Sestava prahu je odvisna od namena prostora.

6.3 METODA DELA

V eksperimentalnem delu raziskovalne naloge smo uporabili slednje metode:

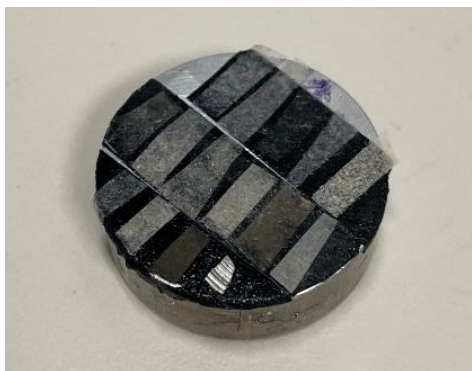
- metode odvzema vzorcev prahu
- napajanje ogljika
- mikroskopiranje ter mikroanaliza z energijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov na elektronskem mikroskopu, izvedeno na Inštitutu Jožefa Štefana, Center za elektronsko mikroskopijo in mikroanalizo
- mikroskopiranje na optičnem mikroskopu, izvedeno v kemijskem laboratoriju na Srednji elektro šoli in tehniški gimnaziji, Šolski center Novo mesto
- analiza vzorcev

6.3.1 ODVZEM VZORCEV

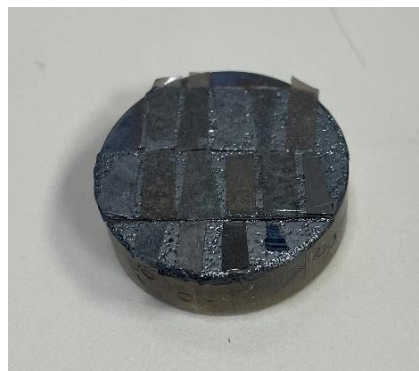
Vzorci prahu so bili vzeti iz štirinajstih različnih zunanjih in notranjih prostorov, ki smo jih razdelili na pet kategorij – spalno okolje, kuhinje, šolski prostori, delavnice in zunanje okolje. S tapkanjem samolepilnih trakov po izbrani površini smo v vsakem prostoru odvzeli dva vzorca. Samolepilni trakovi so omogočili zadosten oprijem prahu, brezbarvnost le-teh pa kvalitetno sliko pod optičnim mikroskopom. Pri tem smo pazili, da vzorce nismo kontaminirali s prstnimi odtisi. Za zaščito pred zunanjimi vplivi smo jih shranili v plastične posodice.

6.3.2 NAPAREVANJE OGLJIKA

Samolepilne trakove smo s pomočjo pincete in noža razrezali na približno enake dimenzije in jih namestili na matrico (slika 12). Pri delu smo uporabljali zaščitne rokavice. Matrico s 14 vzorci smo dali v napravo za napajanje ogljika (slika 14). Naprava je vakuumsko komora, v kateri se nahajata dve elektrodi, preko katerih je napeta vrstica iz čistega ogljika. Po vstavitvi matrice v napravo smo atmosfero zamenjali z argonom in ustvarili vakuum. Nato smo skozi elektrode spustili električni tok, zaradi česar se je prevodna ogljikova vrstica segrela in uparila. Inertna atmosfera je preprečila oksidacijo ogljikovih par, ki so nato sublimirale in na vzorcu ustvarile nekaj nanometrov debelo plast ogljika (slika 13). Njen namen je zagotavljanje električne prevodnosti vzorca. Ta omogoča, da se naboj, ki ga prinašajo obstreljevalni elektroni, odvede iz vzorca. S tem se preprečijo razstrelitve na vzorcu.



Slika 12: Matrica z vzorci pred napajanjem ogljika.



Slika 13: Matrica z vzorci po napajanju ogljika.



Slika 14: Elektrodi na pokrovu naprave za napajanje ogljika.



Slika 15: Naprava za napajanje ogljika.

6.3.3 ELEKTRONSKO MIKROSKOPIRANJE IN MIKROANALIZA Z ENERGIJSKO SPEKTROSKOPIJO RENTGENSKIH ŽARKOV

Po naprejevanju ogljika smo matrico z vzorci vstavili v elektronski mikroskop (sliki 15 in 16) ter pričeli z meritvami.



Slika 16: Elektronski mikroskop in računalniki, s katerimi smo mikroskopirali in analizirali vzorce.



Slika 17: Vstavitev vzorca v elektronski mikroskop.

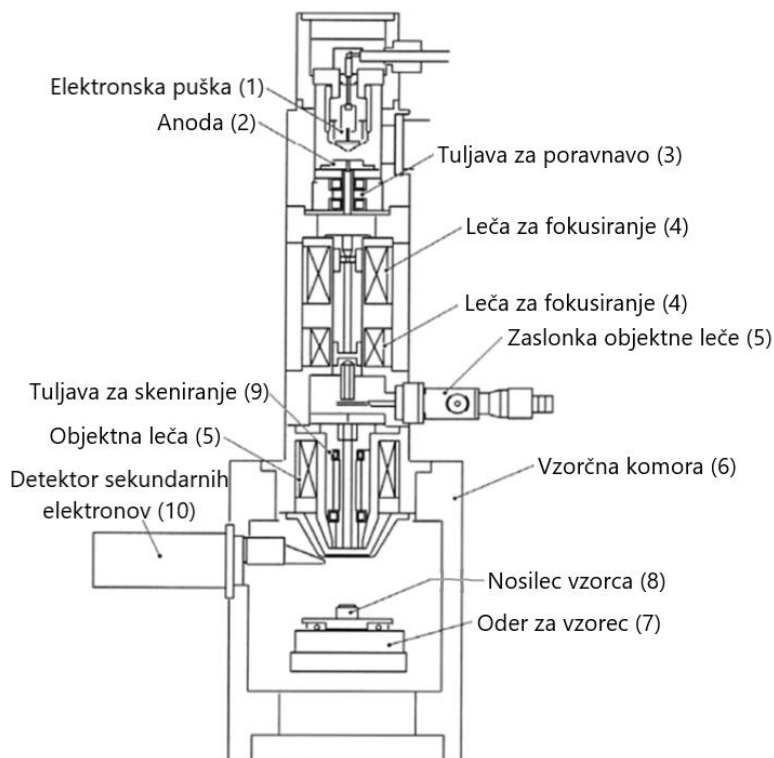
6.3.3.1 OPIS ELEKTRONSKEGA MIKROSKOPA

Elektronski mikroskop oziroma vrstični elektronski mikroskop je poleg optičnega mikroskopa pripomoček, ki ga v znanosti uporabljamo za opazovanje vzorcev, ki so premajhni, da bi jih lahko videli s prostim očesom. Prednost elektronskega pred optičnim mikroskopom je predvsem ta, da lahko vidimo delce, ki so manjši od valovne dolžine svetlobe. Poleg tega pa elektronski mikroskop omogoča veliko večjo globinsko ostrino. Razlog za tako veliko razliko v zmogljivosti je povsem drugačen način delovanja. Medtem ko optični mikroskop povečavo doseže z več lečami, v elektronskem mikroskopu vzorec obstreljujemo z elektroni in zaznavamo smer in jakost njihovih odbojev, kar pa nato pretvorimo v sliko.

Sestavni deli:

1. **Nastanek elektronskega curka:** Vrstični elektronski mikroskopi potrebujejo za delovanje vir elektronov. Tega imenujemo **elektronska puška (1)**, ki proizvaja stabilen elektronski curek z visokim tokom, majhnim premerom curka, nastavljivo energijo in majhno izgubo energije. Za proizvodnjo električnega curka se je skozi zgodovino uporabljalo več različnih vrst pušk, prvi sistemi pa so uporabljali puške, narejene iz volframa, moderni sistemi pa uporabljajo puške na princip delovanja »field emission«. Delujejo na napetosti od 0,1 do 30 kV. Tok elektronov usmerja **anoda (2)**, medtem ko elektronska puška predstavlja katodo. Elektronski curek nato potuje skozi **tuljavo za poravnavo (3)**, ki ga poravna in pošlje proti elektronskim lečam.
2. **Elektronske leče:** Elektronske curke se lahko fokusira z uporabo magnetnih in elektrostatičnih polj, a je magnetno polje zaradi svojih lastnosti primernejše za uporabo v elektronskem mikroskopu. Tako v **lečah za fokusiranje curka (4)** uporabimo magnetno polje, njegovo jakost pa kontroliramo s tokom, ki ga spuščamo skozi elektromagnete. Curek, ki pride preko te leče, je mnogo tanjši in tudi paralelen. Za določanje povečave pa uporabljamo **objektno lečo (5)**, ki je po principu delovanja tudi elektromagnet. S spreminjanjem jakosti magnetnega polja spreminjamo tudi njen razpršilni učinek, tako da lahko s curkom pokrijemo večji ali pa manjši del vzorca. Manjši, kot je del vzorca, obsevanega s curkom, bolj je slika povečana in obratno. Tako z relativno preprostim sistemom dobimo sposobnost spreminjanja povečave. Da preprečimo razprševanje curka na molekulah zraka, je **vzorčna komora (6)**, kjer se nahajata **oder za vzorec (7)** in sam **nosilec vzorca (8)** pod zelo visokim vakuumom (od 100 μ Pa do 10 μ Pa), ki ga zagotovimo z različnimi tipi vakuumskih črpalk.
3. **Izdelava slike:** Ko elektronski curek zadane vzorec, nastane več delcev, ki pa imajo v elektronskem mikroskopu svoj poseben pomen. Odbiti elektroni so elektroni iz curka, ki so se od vzorca preprosto odbili, torej se jim je smer potovanja obrnila za približno 180°. Sekundarni elektroni so tisti elektroni, ki so se prvotno nahajali v vzorcu, a so jih elektroni iz curka izbili. Za še dodatno površinsko prekrivanje vzorca se uporablja **tuljava za skeniranje (9)**, ki elektrone še dodatno odbije po vzorcu v smeri osi x in y, da senzorji lažje narišejo sliko. **Detektor sekundarnih elektronov (10)** je naprava, ki ima vlogo senzorja, saj se večina podatkov v EM pridobi iz sekundarnih elektronov, ki imajo manjšo energijo kot odbiti elektroni. To predstavlja dodaten izziv, saj mora biti senzor dovolj občutljiv, da zazna tokove v jakosti nekaj pA. (Zhou & drugi, 2007)

Za analizo kemične sestave vzorcev pa smo uporabili mikroanalizo z energijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov. Ob interakciji elektronskega curka in elektronov, ki so se že nahajali v atomih vzorca, ti izsevajo rentgenski žarek. Energija sevanja je specifična za vsak material. Ko senzorji v mikroskopu zaznajo energijo sevanja, jo programska oprema primerja s standardi, ki so zapisani v bazi podatkov in izpiše vrsto materiala in njegovo prisotnost v vzorcu v odstotkih. Ker sami ne ustvarjamo standarda, s katerim bi primerjali energijo sevanja vzorca, se taka vrsta analize imenuje semikvantitativna analiza. (Goldstein & drugi, 2003)



Slika 18: Zgradba elektronskega mikroskopa. Vir: (Zhou & drugi, 2007).

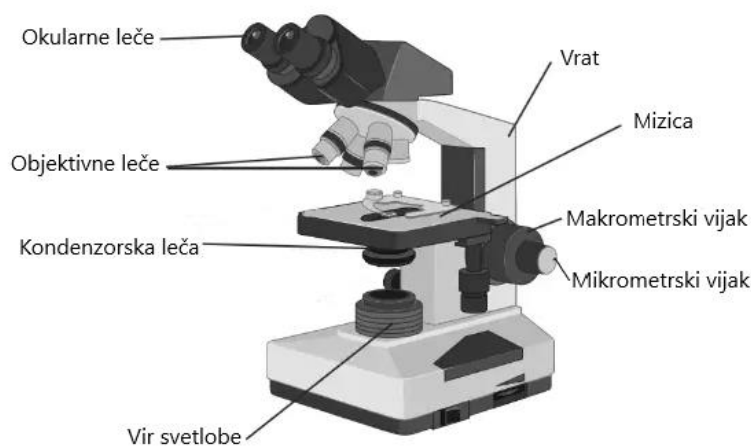
6.3.4 OPTIČNO MIKROSKOPIRANJE

V šolskem laboratoriju smo si z optičnim mikroskopom še dodatno ogledali izbrane vzorce. Na objektno stekelce smo z uporabo pincete položili vzorec in ga prekrili s krovnim stekelcem. Mikroskop je imel vgrajeno kamero, s katero smo posneli vzorce in si sliko podrobneje ogledali na računalniku.

6.3.4.1 OPIS OPTIČNEGA MIKROSKOPA

Optični mikroskop je osnovno orodje v biologiji in drugih znanostih, ki nam omogoča opazovanje in študij mikroskopskega sveta. Deluje tako, da uporablja niz leč za povečanje slike predmeta, kar nam omogoča, da predmet vidimo v večji podrobnosti, kot bi ga lahko s prostim očesom.

Osnovni deli optičnega mikroskopa vključujejo vir svetlobe ter kondenzorsko, objektivno in okularno lečo. Vir svetlobe zagotavlja običajno led svetilka, ki se nahaja pod vzorcem. Svetlobo kondenzorska leča osredotoča na vzorec. Objektivna leča se uporablja za povečavo vzorca. Okularna leča pa sliko še dodatno poveča in jo preoblikuje v sliko, ki je jasno vidna prostemu očesu.



Slika 19: Zgradba optičnega mikroskopa. Vir: (Baniya, 2022).

Vzorec, ki ga hočemo opazovati, moramo prej pripraviti v preparat. Vzorec mora biti dovolj tanek in mora prepuščati svetlobo. Preparat pripravimo tako, da željeni vzorec položimo na objektivno stekelce, nanj pa položimo še krovno stekelce. Preparat vstavimo na mizico v nosilec preparatov. Pozicijo preparata lahko spreminjamo v x, y in z osi. Za z os oziroma oddaljenost preparata od objektivne leče uporabljamo makrometrski vijak za grobo nastavitev ter mikrometrski vijak za bolj fino nastavitev. Vir svetlobe zagotavlja svetilka na dnu mikroskopa, ki ji lahko s potenciometrom spreminjamo intenziteto svetilnosti. Svetloba pride na preparat skozi kondenzorsko lečo. Z zaslonko, ki se nahaja pod kondenzorsko lečo, pa še dodatno spreminjamo intenziteto in fokus svetlobe na preparat tako, da je vzorec enakomerno osvetljen. Svetloba nato potuje skozi preparat in objektivno lečo, ki poveča vzorec za določen faktor, odvisno od uporabljene leče. Objektivne leče se nahajajo na revolverju, ki omogoča hitro spremembo povečave. Svetloba nadaljuje pot še skozi okularno lečo, ki pa sliko še dodatno poveča in zagotovi jasen pogled preparata opazovalcu. Povečava mikroskopa se izračuna tako, da se pomnoži povečava objektivne leče s povečavo okularne leče.

Ena od ključnih lastnosti optičnega mikroskopa je njegova sposobnost razločevanja finih podrobnosti v vzorcu, kar je določeno z njegovo ločljivostjo. Ta je poleg povečave leč omejena še z valovno dolžino svetlobe, ki se uporablja za osvetlitev vzorca, pri čemer krajše valovne dolžine omogočajo večjo ločljivost. Poleg vidne svetlobe nekateri mikroskopi uporabljajo tudi druge oblike sevanja, kot so ultravijolično ali infrardeče sevanje ter celo elektronske žarke za študij vzorcev pri še višjih povečavah. Takšni tipi mikroskopov pa so pogosto bolj zapleteni in dražji kot optični mikroskopi. (R. Masters, 2008)

6.3.5 ANALIZA VZORCEV

Pri analizi vzorcev smo primerjali slike, pridobljene z elektronskim in optičnim mikroskopom, ter kemično sestavo vzorcev, pridobljeno z mikroanalizo z energijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov. S pomočjo mentorjev smo predvideli izvor prašnih delcev.

6.4 REZULTATI Z INTERPRETACIJO

Za analizo slik, posnetih z elektronskim mikroskopom s pomočjo povratno sipanih elektronov, smo upoštevali nekaj zakonitosti:

- svetlejša barva predstavlja anorgansko snov, ki je elektronsko gostejša od organske snovi
- delci temnejših barv predstavljajo elektronsko redkejšo – organsko snov
- pomanjkljivost metode napraševanja ogljika za zagotavljanje prevodnosti vzorca je, da ogljika prvotno prisotnega v vzorcu ne moremo kvantificirati, je pa ogljik prav tako na meji zaznava te metode
- ne moremo zaznati tudi elementov z manjšim vrstnim številom od ogljika (vodik...)
- mikroanaliza je bolj usmerjena na oceno sestave posameznih delov vzorca in kljub večji površini vzorca in večkratnemu vzorčenju na različnih mestih obstaja možnost, da z rezultati nismo reprezentativno opisali celotnega vzorca

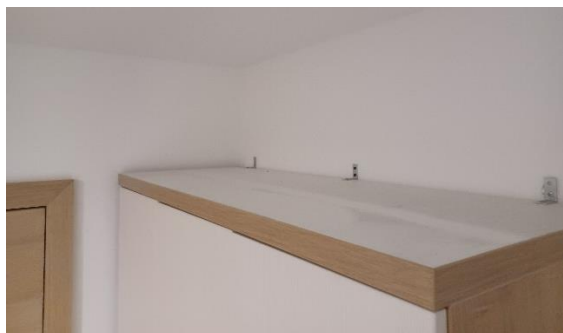
V nadaljevanju bomo uporabljali kratice:

- EM – vrstični elektronski mikroskop
- OM – optični mikroskop

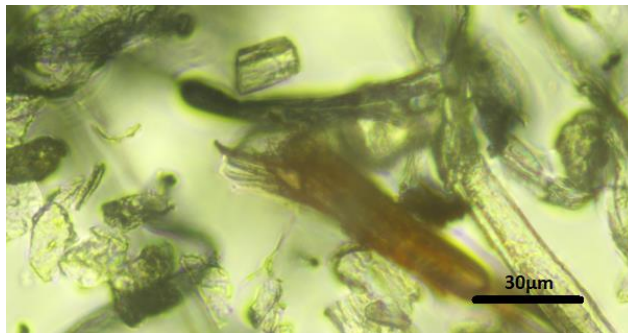
6.4.1 SPALNO OKOLJE

Vzorci iz spalnega okolja so bili vzeti iz naših sob.

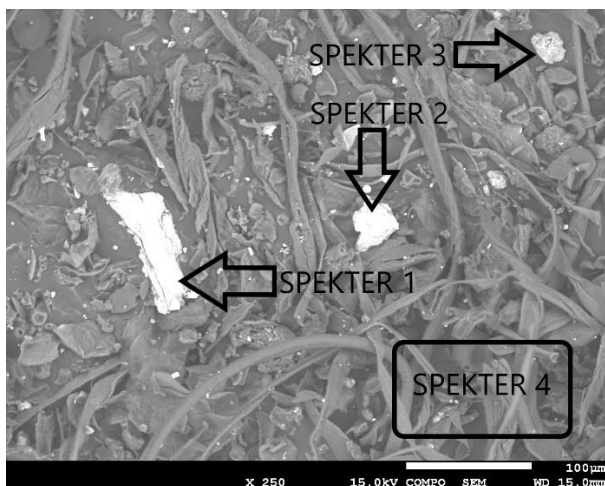
6.4.1.1 JAKOBOVA SOBA



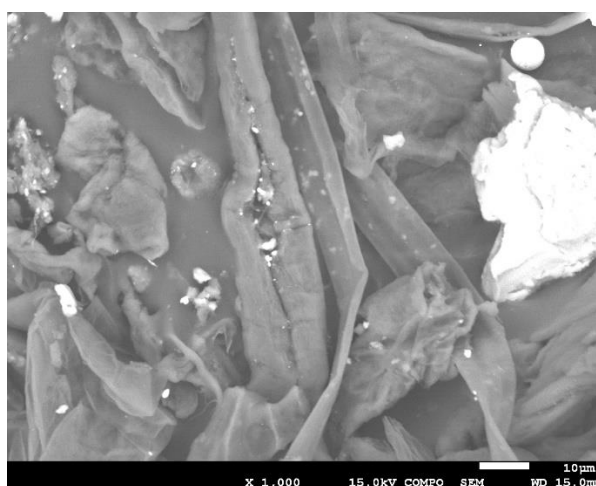
Slika 20: Prah iz Jakobove sobe pod OM.



Slika 21: Lokacija odvzema prahu iz Jakobove sobe.



Slika 22: Prah iz Jakobove sobe pod EM (1000x).



Slika 23: Prah iz Jakobove sobe pod EM (250x).

Tabela 1: Kemična sestava prahu iz Jakobove sobe.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)									
	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Re
1	2,28		97,72							
2	28,52		61,64						8,47	1,37
3	58,7	12,58	1,06	1,66				26		
4	91,67				2,88		2,74	2,72		
Celoten spekter	71,92		15,91	1,87	2,16	2,34	2,47	3,32		

V Jakobovi sobi je večina delcev organskega izvora ter vlaknaste oblike, kar potrdi tudi slika iz OM. Vidijo se tudi delci sferične in amorfnе oblike. Poleg tega najdemo tudi zanimive anorganske delce.

Spekter 1 predstavlja večji kos aluminija s stranico 0,1 mm, kar je vidno s prostim očesom. Izvor delca je lahko aluminijasta folija.

Podoben mu je tudi spekter 2, ki pa vsebuje še sledove renija, za katerega menimo, da je napaka ovrednotenja spektra. Renij je namreč zelo redek element in je programska oprema sestavila spekter renija iz ozadja ter ostankov drugih že popisanih vrhov v spektru.

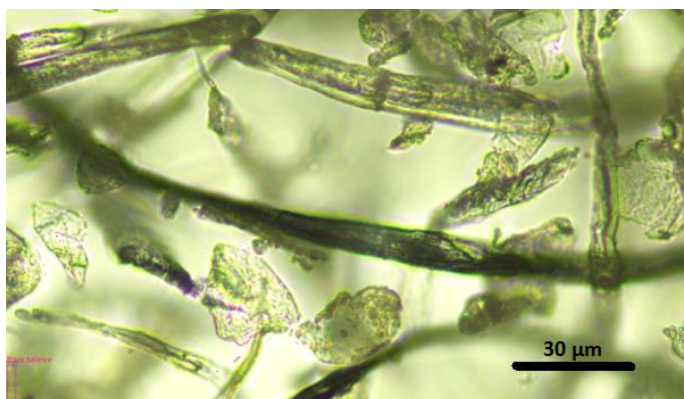
Spekter 3 je sestavljen predvsem iz kalcija in kisika, zato predvidevamo, da je odkrušen del ometa ali le zrno peska.

Spekter 4 poleg kisika vsebuje še sledove elementov žvepla, kalija in kalcija, sestavlja pa ga predvsem organska snov.

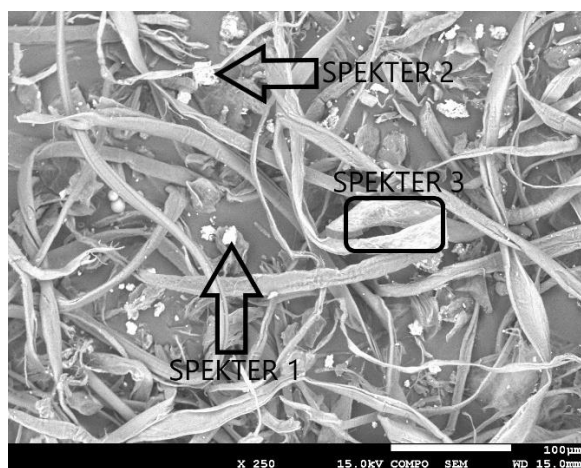
6.4.1.2 LARINA SOBA



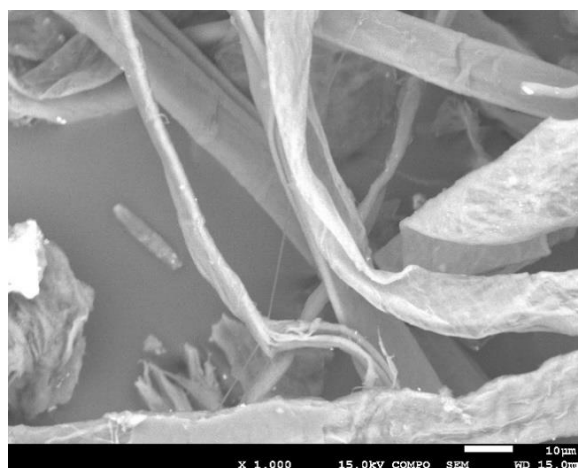
Slika 24: Lokacija odvzema prahu iz Larine sobe.



Slika 25: Prah iz Larine sobe pod OM.



Slika 26: Prah iz Larine sobe pod EM (250×).



Slika 27: Prah iz Larine sobe pod EM (1000×)

Tabela 2: Kemična sestava prahu iz Larine sobe.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)								
	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1	25,37	0,55	7,46	2,59	0,58		0,56	56,3	6,58
2	44,55	1,35		49,04				5,07	
3	85,4		1,14	4,06	2,68	1,94	1,67	3,12	
Celoten spekter	89,49		1,3	3,21	2,12			3,87	

Larina soba vsebuje večinoma organske delce vlaknastih oblik, kar potrjuje tudi slika z OM in analiza celotnega spektra. Na sliki s 1000-kratno povečavo so vidna tanka vlakna s premerom okoli 0,5 µm.

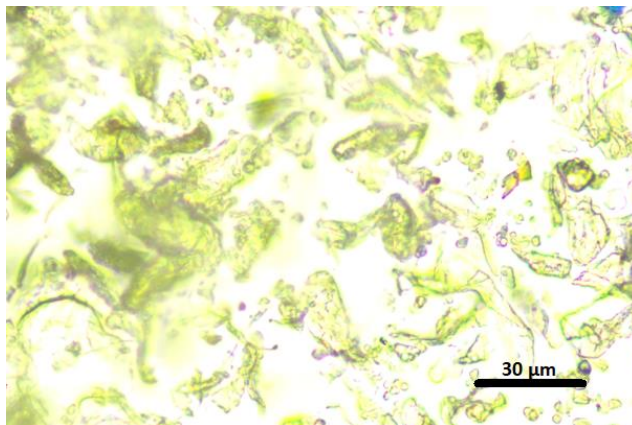
Spekter 1 in 2 sta sestavljena iz kisika, kalcija, aluminija in silicija, ki so glavni gradniki ometa in cementa.

Območje spektra 3 pa predvidoma predstavlja organsko vlakno z nanašenimi anorganskimi delci, katerih sestava je razvidna v tabeli 2.

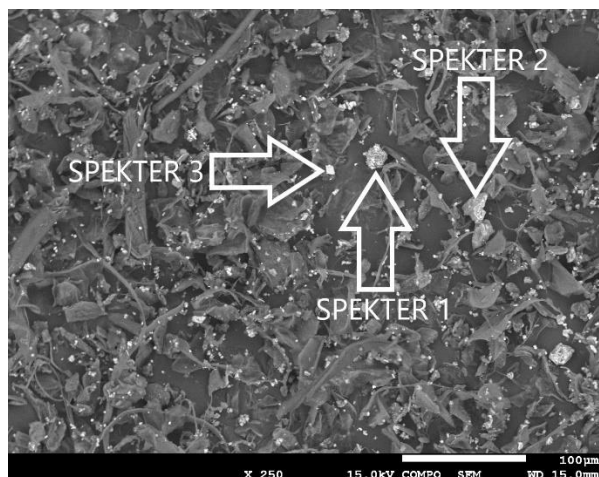
6.4.1.3 JANOVA SOBA



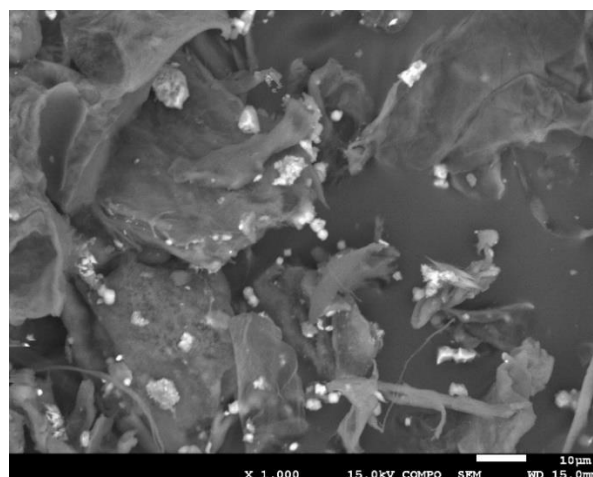
Slika 28: Lokacija odvzema prahu iz Janove sobe.



Slika 29: Prah iz Janove sobe pod OM.



Slika 30: Prah iz Janove sobe pod EM (250×).



Slika 31: Prah iz Janove sobe pod EM (1000×).

Tabela 3: Kemična sestava prahu iz Janove sobe.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)									
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1	64,12		0,76	0,88	23,42	5,26		0,36	5,2	
2	55,91	0,57	0,5	9,23	27,26			3,08	0,82	2,62
3	61,82	2,4		5,18	25,37	0,69		3,41	1,13	
Celoten spekter	72,74	1,71	1,41	3,26	6,89	2,92	1,9	2,27	6,9	

Janova soba vsebuje večinoma delce organskega izvora. Anorganskih delcev je veliko manj, poleg tega so tudi manjšega premera. Delci so predvsem amorfne oblike, najde pa se tudi veliko vlaken. Slika OM prikazuje samo amorfne oblike.

Kemična sestava spektrov 1, 2 in 3 je skoraj identična. Delci so sestavljeni predvsem iz atomov kisika in silicija, zato sklepamo, da gre za zrna peska.

6.4.2 KUHINJE

Naslednji vzorci so bili odvzeti iz naših kuhinj.

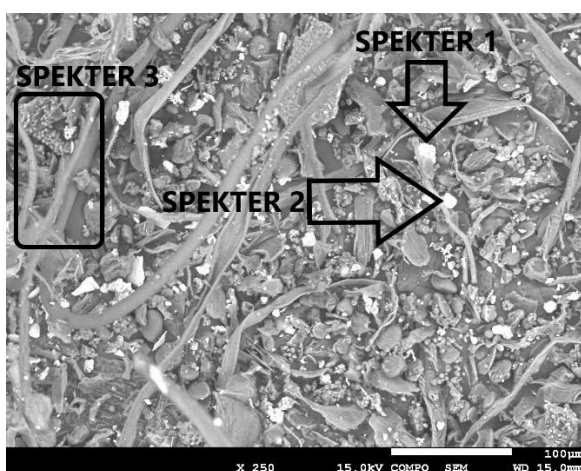
6.4.2.1 JAKOBOVA KUHINJA



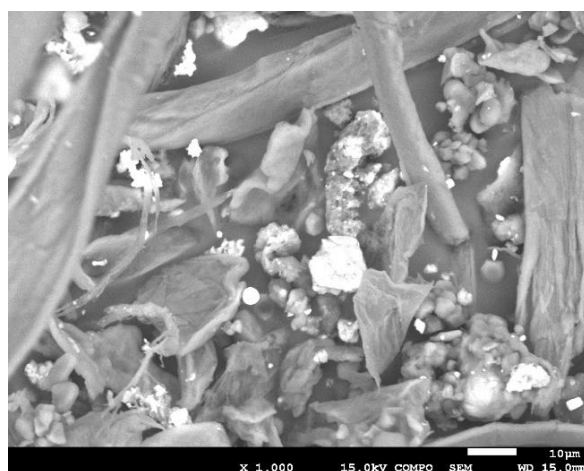
Slika 32: Lokacija odvzema prahu iz Jakobove kuhinje.



Slika 33: Prah iz Jakobove kuhinje pod OM.



Slika 34: Prah iz Jakobove kuhinje pod EM (250×).



Slika 35: Prah iz Jakobove kuhinje pod EM (1000×).

Tabela 4: Kemična sestava prahu iz Jakobove kuhinje.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)									
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1	8,5		0,62	13,78	47,81	3,9		13,78	2,01	9,6
2	41,06	0,67	0,89	18,27	29,1			9,03		0,98
3	86,95			2,75	3,71	2,61			3,99	
Celoten spekter	79,17		1,43	2,97	6,25	2,02	1,76	1,63	4,77	

V Jakobovi kuhinji prevladujejo delci organskega izvora, vlaknaste in amorfne oblike, kar opazimo tudi na OM. V primerjavi z Jakobovo sobo prevladujejo delci z manjšim premerom.

Spekter 1 je sestavljen predvsem iz silicija in aluminija, kar spominja na kemično sestavo cementa, prisotnega v ometu. Cement je sestavljen predvsem iz spojin kalcija, silicija, aluminija in kisika.

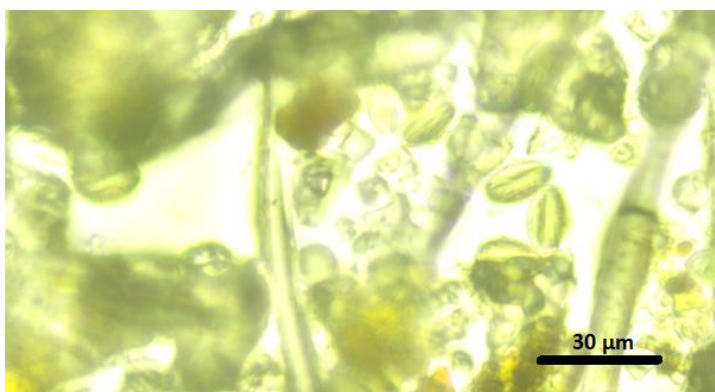
Spekter 2 je po sestavi podoben spektru 1.

Spekter 3 pa je organska snov.

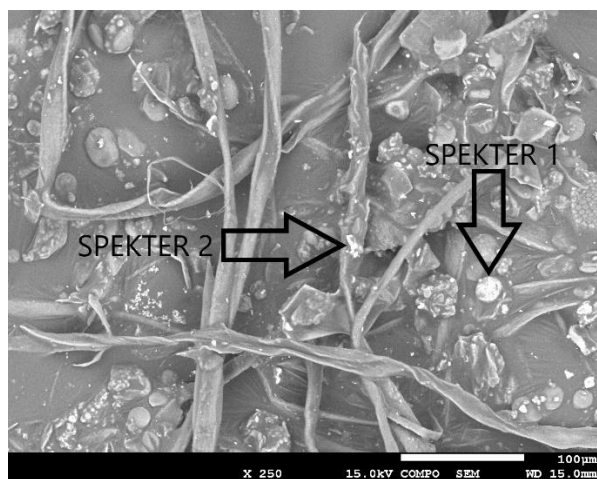
6.4.2.2 LARINA KUHINJA



Slika 36: Lokacija odvzema prahu iz Larine kuhinje.



Slika 37: Prah iz Larine kuhinje pod OM.



Slika 38: Prah iz Larine kuhinje pod EM (250×).



Slika 39: Prah iz Larine kuhinje pod EM (1000×).

Tabela 5: Kemična sestava prahu iz Larine kuhinje.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)								
	O	Na	Mg	Si	P	S	Cl	K	Ca
1	41,46	1,3	5,16		22,59	0,73	1,79	1,2	25,77
2	67,7								32,3
Celoten spekter	84,15	3,27		2,21			4,93	2,39	3,06

V Larini kuhinji se nahajajo delci ploščatih in nepravilnih vlaknastih oblik, mikroskopska slika pa pokaže še ostale zanimive oblike delcev (kavna zrna).

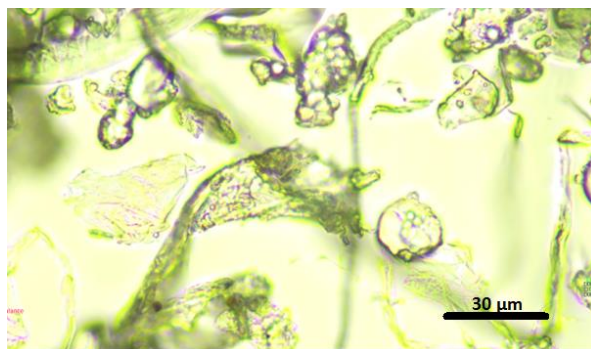
Spekter 1 sestavlja fosfor, kisik in kalcij, ki so pogosti elementi v gnojilih. Te uporabljamo za gnojenje lončnic, ki so se nahajale v bližini mesta odvzema.

Spekter 2 vsebuje kisik in kalcij, ki sta pomembna gradnika ometa (kalcijev karbonat) in peščenih materialov.

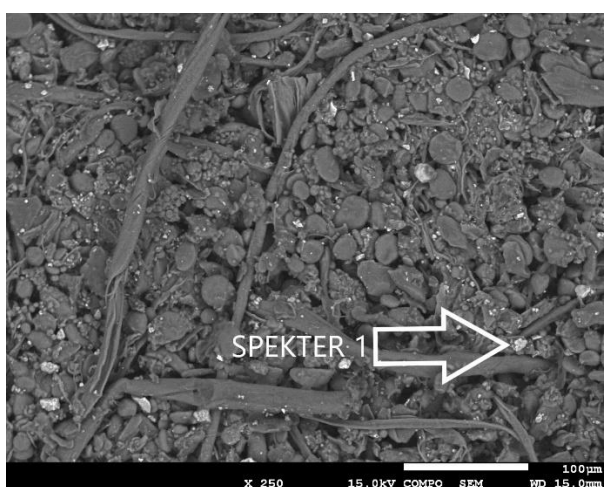
6.4.2.3 JANOVA KUHINJA



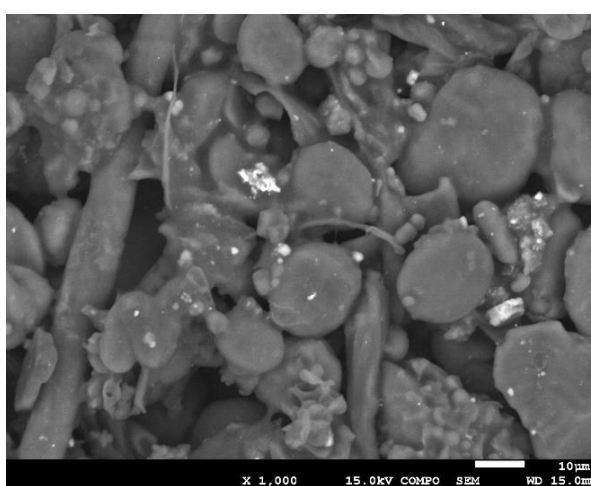
Slika 40: Lokacija odvzema prahu iz Janove kuhinje.



Slika 41: Prah iz Janove kuhinje pod OM.



Slika 42: Prah iz Janove kuhinje pod EM (250x).



Slika 43: Prah iz Janove kuhinje pod EM (1000x).

Tabela 6: Kemična sestava prahu iz Janove kuhinje.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)						
	O	Na	Al	Si	Cl	Ca	Mo
1	53,94		0,74	45		0,32	
Celoten spekter	81,78	1,71	1,81	3,61	2,17	3,49	5,44

Janova kuhinja vsebuje delce, ki so predvsem organskega izvora, amorfni in vlaknasti obliki. Anorganskih prašnih delcev je na sliki EM izredno malo. Slika z OM prikazuje prej opisano sestavo.

Spekter 1 vsebuje atome silicija in kisika, zato sklepamo, da gre za zrna peska.

V analizi celotnega spektra izstopa samo vsebnost molibdena. Ta element se v urbanem okolju uporablja v žarnicah kot nosilec žarilne nitke in v krom-molibdenovih jeklih.

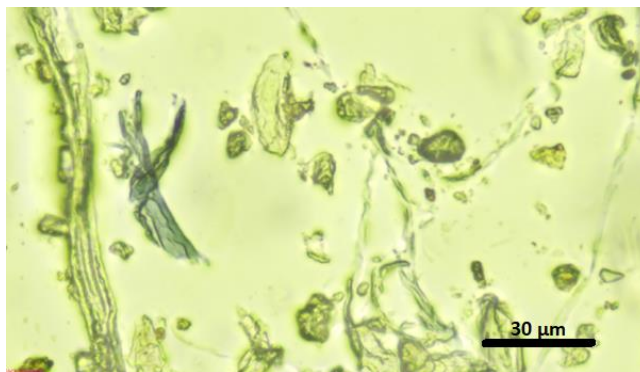
6.4.3 ŠOLSKI PROSTORI

Vzorci so bili odvzeti na naši šoli – v jedilnici, hodniku, učilnici in laboratoriju za kemijo in v Scidromu.

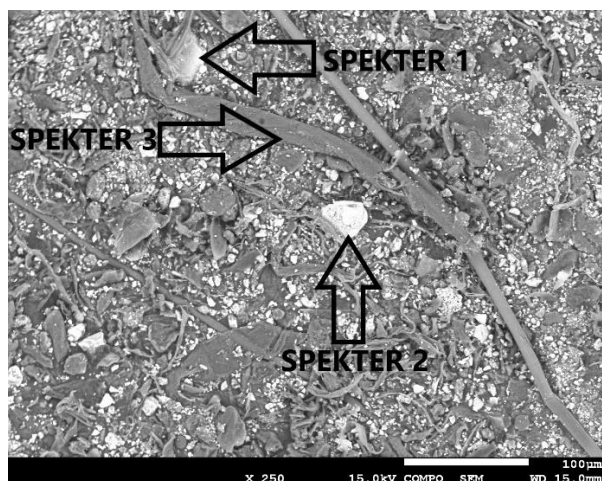
6.4.3.1 JEDILNICA



Slika 44: Lokacija odvzema prahu iz jedilnice.



Slika 45: Prah iz jedilnice pod OM.



Slika 46: Prah iz jedilnice pod EM (250x).



Slika 47: Prah iz jedilnice pod EM (1000x).

Tabela 7: Kemična sestava prahu iz jedilnice.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)										
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	49,16	0,51	0,52	17,77	22,62			8,14		0,41	0,87
2	27,12		1	18,42	28,27			16,24			8,95
3	81,16	2,93	2,43		3,1		7,4		2,97		
Celoten spekter	65,88	1,74	2,47	3,76	10,06	2,02	1,07	0,93	9,91		2,18

Prašni delci iz jedilnice so manjše velikosti in jih je zato tudi razmeroma več. Večina jih je amorfne oblike, pojavijo se tudi posamezna vlakna. Slika iz OM prikazuje enake oblike delcev. Sklepamo, da je daljše vlakno pravilne valjaste oblike las ali nit iz oblačila.

Spekter 1 in 2 predstavljata omet. Zanimiva je sled titana v prvem spektru, kar bi lahko povezali z uporabo titanovega dioksida, kot pigmenta, primešanega barvi za beljenje sten. Spekter 2 je prikazan tudi na 1000-kratni povečavi.

Spekter 3 sestavlja predvsem organska snov.

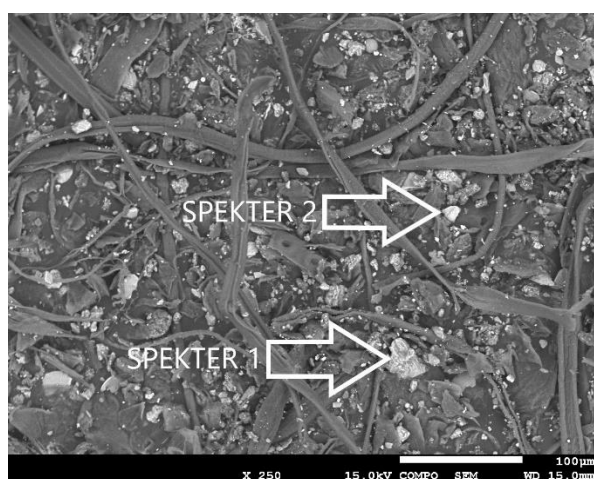
6.4.3.2 ŠOLSKI HODNIK



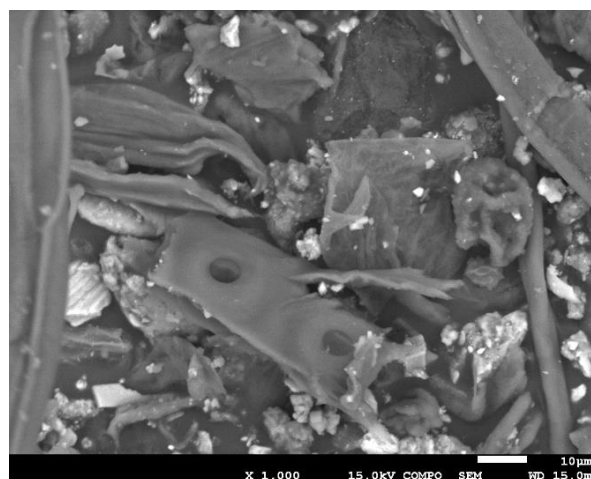
Slika 48: Lokacija odvzema prahu iz šolskega hodnika.



Slika 49: Prah iz šolskega hodnika pod OM.



Slika 50: Prah iz šolskega hodnika pod EM (250x).



Slika 51: Prah iz šolskega hodnika pod EM (1000x).

Tabela 8: Kemična sestava prahu iz šolskega hodnika.

	Kemična sestava (ut.%)										
Spekter	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
1	57,44		9,33	6,22	7,83	0,39	0,38	1,51	2,07	13,35	1,46
2	16,23		9,28	6,29	16,22						51,99
Celoten spekter	69,71	2,31	1,69	1,94	7,35		2,01	5,77	1,11	8,12	

Na šolskem hodniku so predvsem delci organskega izvora, vlaknaste in amorfne oblike. Vlaknasto obliko opazimo tudi na sliki OM.

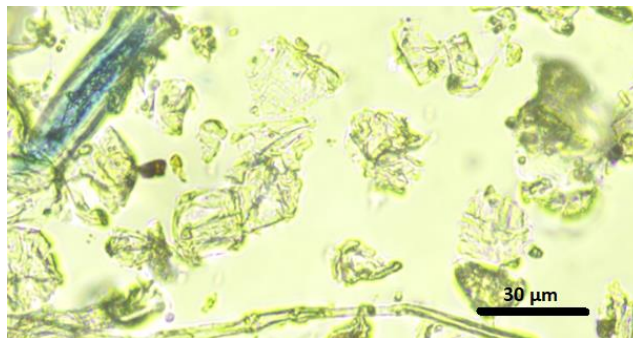
Spekter 1 ima zelo raznoliko elementarno sestavo, sestavljen je namreč iz 10 različnih elementov. Od teh prevladujejo kisik, kalcij, silicij in magnezij, kar je značilno za kemijsko sestavo cementa.

Spekter 2 vsebuje spojino elementov železa, silicija in kisika. Predvidevamo, da gre za železov silikat, material, ki se predvsem uporablja v gradbeništvu (trenutno na šoli potekajo gradbena dela).

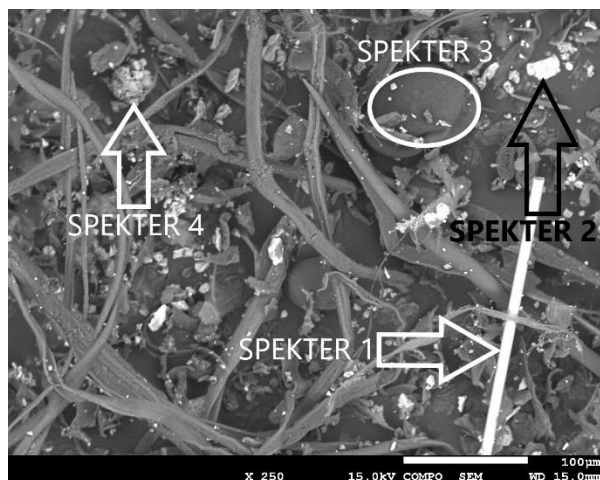
6.4.3.3 KEMIJSKI LABORATORIJ



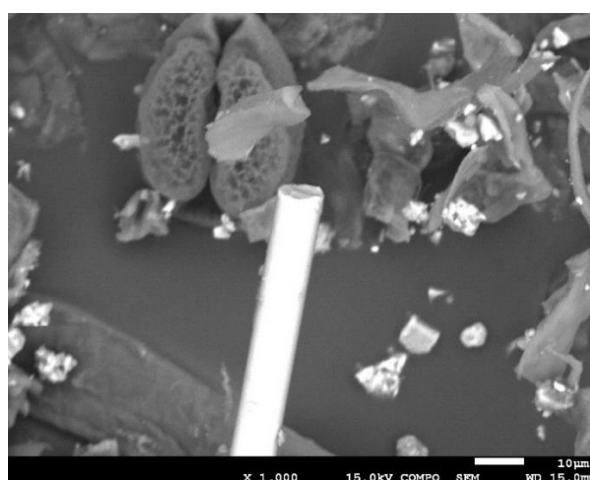
Slika 52: Lokacija odvzema prahu iz kemijskega laboratorija.



Slika 53: Prah iz kemijskega laboratorija pod OM.



Slika 54: Prah iz kemijskega laboratorija pod EM (250×).



Slika 55: Prah iz kemijskega laboratorija pod EM (1000×).

Tabela 9: Kemična sestava prahu iz kemijskega laboratorija.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)										
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
1	41,19	0,4	0,36	7,37	29,21				0,6	20,87	
2	16,17	0,71		21,96	35,2				17,22	4,53	4,21
3	81,41					4,64	2,65	1,38	9,92		
4	62,57		0,38							37,05	
Celoten spekter	73,85	1,82		1,52	5,53		1,89	3,92	1,54	9,93	

Kemijski laboratorij vsebuje prašne delce organskega izvora, vlaknastih in amorfnih oblik. Slika OM pa prikazuje predvsem delce amorfnih oblik.

Spekter 1 je eden izmed zanimivejših vrst delcev, ki smo jih opazili. Sestavljen je iz spojin kalcija, silicija, aluminija in kisika, kar ni tako nenavadno. Zanimiva pa je oblika delca, saj ima obliko valja. Njegovo obliko in elementarno sestavo lahko povežemo in predvidevamo, da gre za delec steklene volne ali mineralnega vlakna. Steklена volna se uporablja za toplotno izolacijo, mineralna vlakna pa so sestavni del stropnih panelov/plošč.

Na sliki OM opazimo moder delec vlaknaste oblike, ki se pojavi tudi na sliki EM (spekter 1). Sklepamo, da gre za isto vrsto delca. Predvidevamo, da je vzrok za modro barvo posledica lomljenja svetlobe, ki je značilna za tovrstne delce.

Spekter 2 je sestavljen iz spojine aluminija, silicija, kisika in velikega dela kalija. Ta spojina se uporablja kot substrat za pigmente za barvanje sten, ki lahko vsebujejo železove okside. Tako tudi pojasnimo majhno vsebnost železa v vzorcu.

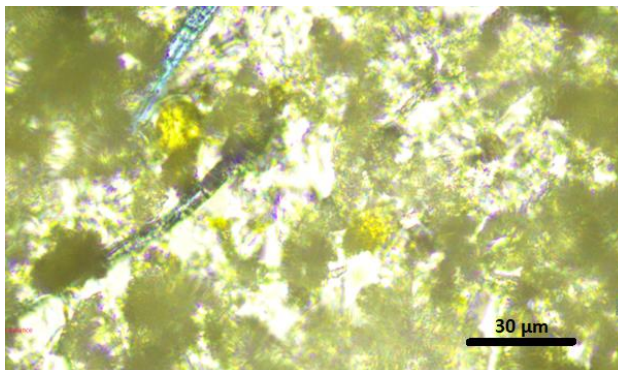
Spekter 3 je organskega izvora in je elipsoidne oblike.

Spekter 4 je sestavljen iz spojine kalcija in kisika, zato predvidevamo, da gre za omet.

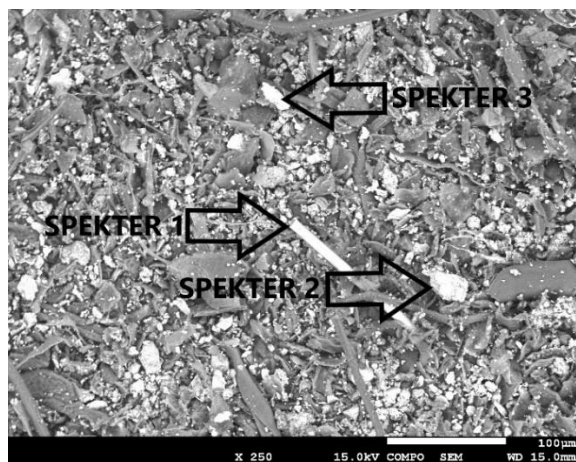
6.4.3.4 UČILNICA ZA KEMIJO



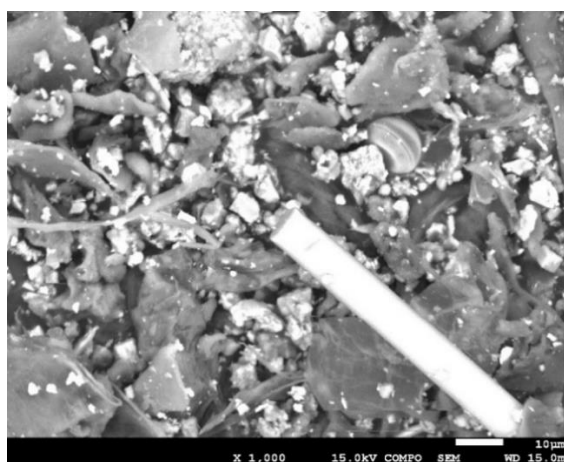
Slika 56: Lokacija odvzema prahu iz učilnice za kemijo.



Slika 57: Prah iz kemijske učilnice pod OM.



Slika 58: Prah iz kemijske učilnice pod EM (250×).



Slika 59: Prah iz učilnice za kemijo pod EM (1000×).

Tabela 10: Kemična sestava prahu iz učilnice za kemijo.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)										
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	48,9			7,31	27,05				16,27	0,48	
2	71,38		0,44				0,27		27,91		
3	31,08				10,77	9,79	35,22		13,14		
Celoten spekter	59,66	3,06	1,64	2,47	7,02	2,56	4,21	1,43	15,85		2,1

Prah iz učilnice za kemijo sestavlja predvsem organska snov amorfnih oblik, prisotna pa so tudi vlakna. Slika OM vsebuje le dve vlakni modre barve, ki smo jih opazili že na sliki OM iz kemijskega laboratorija in jih povezujemo z mineralnimi vlakni.

Spekter 1 v večini vsebuje elemente kisik, aluminij, kalcij in silicij, kar poleg vlaknaste nakazuje na mineralno vlakno ali vlakno steklene volne.

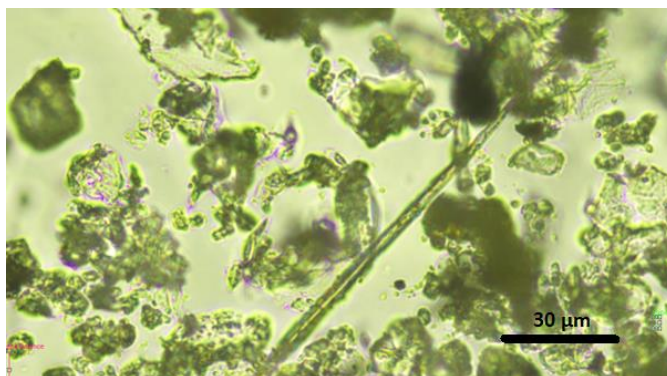
Spekter 2 sestavlja predvsem spojina kalcija in kisika. Sklepamo, da gre za delec kalcijevega hidrogenkarbonata ali kalcijevega karbonata, ki sta sestavna gradnika peska.

Spekter 3 je spojina klora, kisika, kalcija, žvepla in silicija. Ker ta kemična sestava ne ustreza nobenemu pogostemu delcu, sklepamo, da gre za ostanke kemičnih eksperimentov, ki jih dijaki izvajajo med poukom.

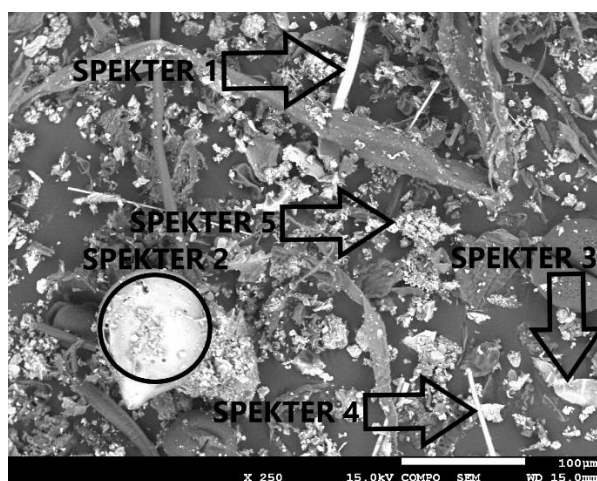
6.4.3.5 SCIDROM



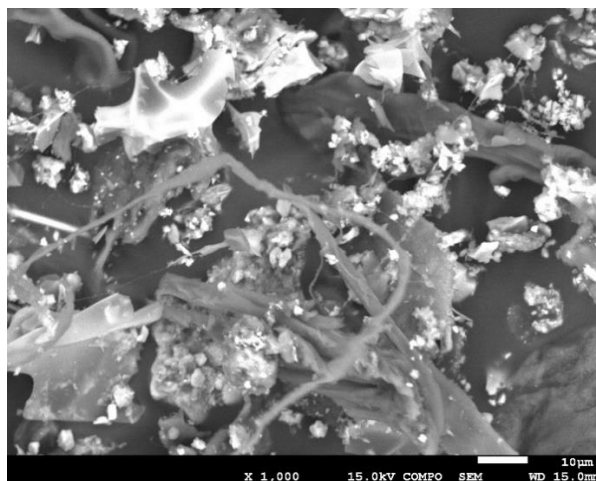
Slika 60: Lokacija odvzema prahu iz Scidroma.



Slika 61: Prah iz Scidroma pod OM.



Slika 62: Prah iz Scidroma pod EM (250×).



Slika 63: Prah iz Scidroma pod EM (1000×).

Tabela 11: Kemična sestava prahu iz Scidroma.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)										
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	18,25		1,71	6,23	20,03	0,68			51,85	1,24	
2	55,82	1,64	0,87	7,87	25,91			2,61	1,42		3,86
3	51,08	1,89		6,23	33,06			5,83	1,91		
4	31,27	1,4	4,31	7,36	20,42			2,02	22,45	1,29	9,49
5	17,42			13,07	32,41			14,72	22,38		
Celoten spekter	64,65	1,58		5,2	14,14	1,18	0,86	1,85	10,55		

Scidrom je šolski elektrotehniški laboratorij. Prevladujejo organski delci vlaknastih oblik, vendar so v velikem številu zastopani tudi anorganski delci amorfnih oblik. Na sliki OM pa je večina delcev amorfnih oblik, izvora jim kljub poznavanju dejavnosti v Scidromu ne moremo pripisati.

Spekter 1 vsebuje spojine silicija, kisika, aluminija in kalcija, iz česar sklepamo, da gre za mineralno vlakno.

Podoben mu je spekter 4, s trikrat manjšim premerom. Na sliki EM pa opazimo še več podobnih vlaken z različnimi premeri.

Spekter 2 ima obliko kapljice, a njegova kemična sestava nakazuje, da je le delec ometa ali cementa. Je največji delec na sliki, s premerom 0,1 mm, kar je vidno s prostim očesom.

Spekter 3 ima nepravilno oglato obliko. Po kemični sestavi je podoben kemični sestavi ometa.

Spekter 5 vsebuje spojine kalija, kalcija, silicija, aluminija in kisika, zato predvidevamo, da gre za ostanke ali odkruške barve za stene.

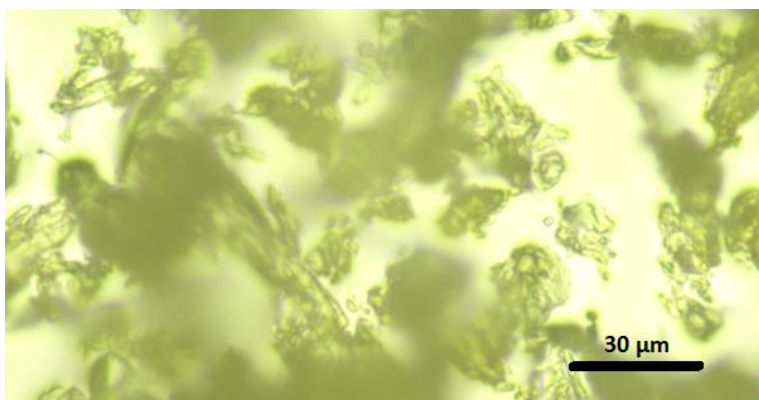
6.4.4 DELAVNICE

Naslednji vzorci so bili v prostorih s specializirano uporabo, v lesni in mehanični delavnici.

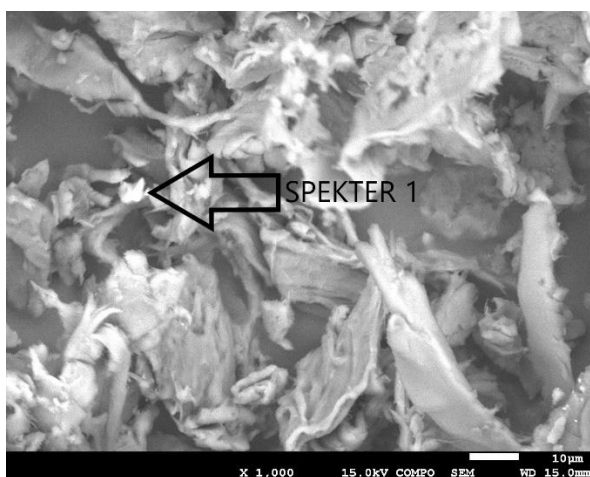
6.4.4.1 LESNA DELAVNICA



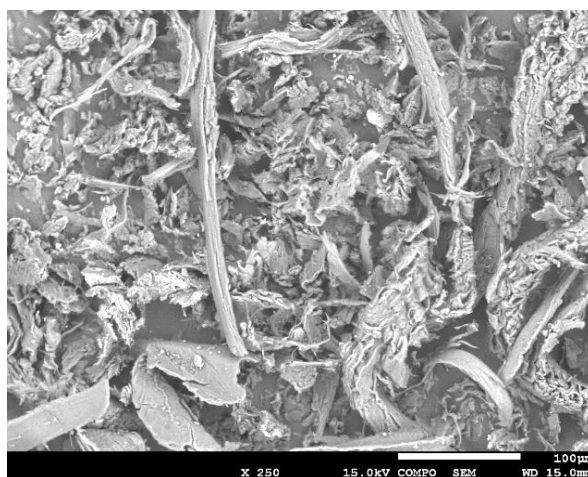
Slika 64: Lokacija odvzema prahu iz lesne delavnice.



Slika 65: Prah iz lesne delavnice pod OM.



Slika 66: Prah iz lesne delavnice pod EM (1000x).



Slika 67: Prah iz lesne delavnice pod EM (250x).

Tabela 12: Kemična sestava prahu iz lesne delavnice.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)	
	O	Ca
1	32	68
Celoten spekter	100	

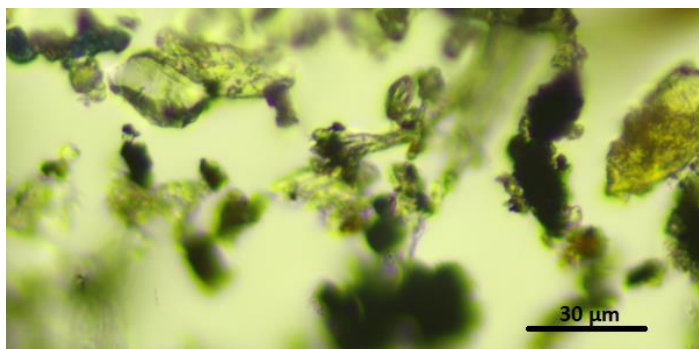
Slike prahu lesne delavnice nazorno prikazujejo amorfne organske delce. Dobro razvidna je oblika lesnih ostružkov, kar je v skladu z našimi pričakovanji. OM prikazuje podobno obliko.

Spekter 1 je sestavljen iz kalcija in kisika, kar nakazuje, da gre za omet.

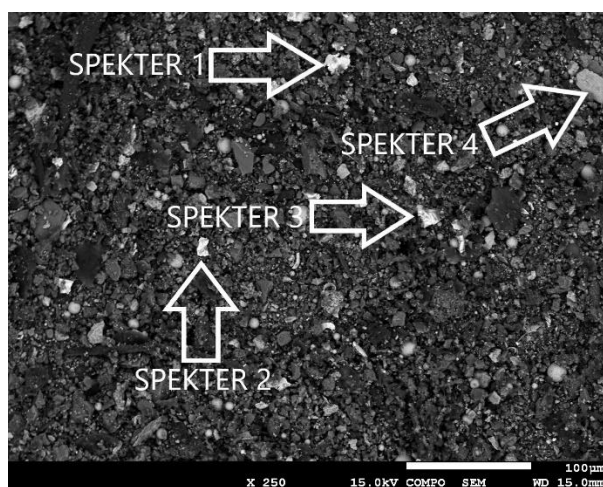
6.4.4.2 MEHANIČNA DELAVNICA



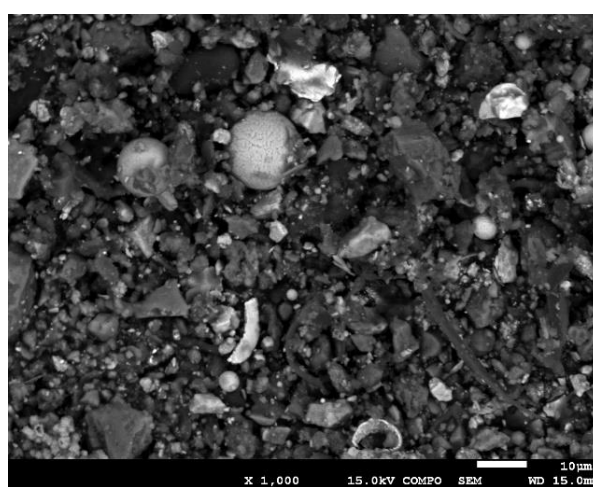
Slika 68: Lokacija odvzema prahu iz mehanične delavnice.



Slika 69: Prah iz mehanične delavnice pod OM.



Slika 70: Prah iz mehanične delavnice pod EM (250x).



Slika 71: Prah iz mehične delavnice pod EM (1000x).

Tabela 13: Kemična sestava prahu iz mehanične delavnice.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)											
	O	F	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Fe
1	2,67					2,86				0,46		94,01
2	2,25	4,15			1,74				1,29		0,82	89,75
3	5,41					0,5				0,48		93,62
4	34,51				0,37			3,06		0,5		61,55
Celoten spekter	45,15		1,12	2,26	4,04	8,56	1,28	1,41	1,11	11,02		24,06

Mehanična delavnica vsebuje tako organske in anorganske delce, amorfne in kristalne oblike. V primerjavi z ostalimi prostori ima veliko vsebnost železovih atomov, kar pripisujemo funkciji prostora. Slika OM prikaže enake ugotovitve kot EM.

Spektri 1, 2 in 3 vsebujejo predvsem železove atome, zato sklepamo, da gre za železne odstružke, ki so posledica dela z orodjem.

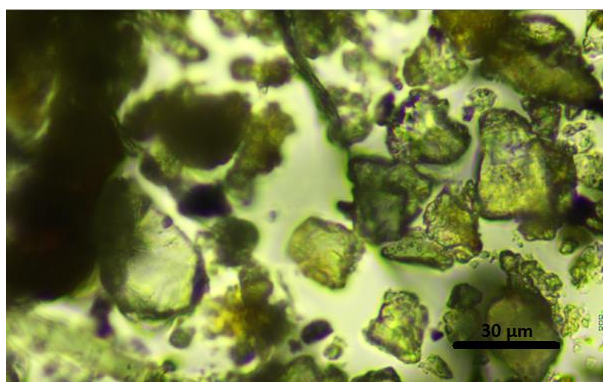
Spekter 2 vsebuje tudi sledi fluora, ki pa je v delavnici prisoten v voskih za avtomobilsko industrijo ali v fluksu za varjenje aluminija.

Spekter 4 pa vsebuje spojine kisika in železa. Predvidevamo, da gre za produkte dela z orodjem (kotna brusilka).

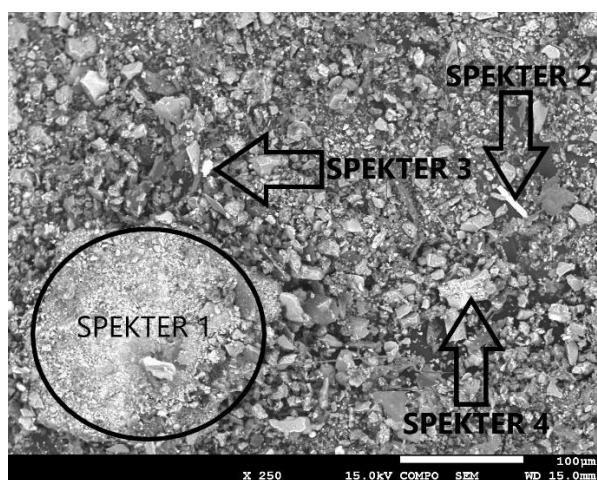
6.4.4.3 ZUNAJ ŠOLE



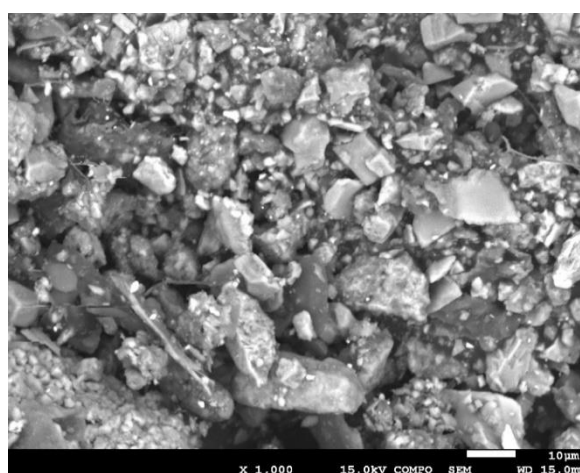
Slika 72: Lokacija odvzema prahu zunaj šole.



Slika 73: Prah zunaj šole pod OM.



Slika 74: Prah zunaj šole pod EM (250x).



Slika 75: Prah zunaj šole pod EM (1000x).

Tabela 14: Kemična sestava prahu zunaj šole.

Spekter	Kemična sestava (ut.%)												
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Zn	Sn
1	59,05		0,47	1,71	2,68				34,85		1,23		
2	3,67			0,73	1,22				0,56	0,86	92,96		
3	15,92		1,23	1,54	2,13	24,58			2,06			52,52	
4	22,61				0,73				76,65				
Celoten spekter	56,75	0,75	2,74	3,96	12,12		0,86	1,68	15,97		3,11		2,06

Vzorec zunaj šole predstavlja povprečno urbano okolje, bližino cest in izpostavljenost vremenskim vplivom. Na sliki EM opazimo odsotnost vlakenskih delcev. Večina delcev predvidevamo, je anorganskega izvora. Prevladujejo delci amorfnih in kristalnih oblik. OP prikazuje enako obliko delcev. Glede na notranje prostore je elementarna sestava vzorca, vzetega zunaj, bolj raznolika.

Spekter 1 je sestavljen primarno iz spojine kalcija in kisika, zato predvidevamo, da gre za aglomerat kristalov kalcijevih hidrogenkarbonatov ali karbonatov, ki so primarni gradniki peska. Podobno sestavo ima spekter 4, ki pa vsebuje še več kalcija. Oblika kristalov se jasno vidi na 1000-kratni povečavi.

Spekter 2 večinoma vsebuje atome železa in kisika. Železo je osnovni gradnik moderne infrastrukture, zato je izvor delca lahko posledica različnih dejavnikov (npr. obraba zavornih diskov na avtomobilih).

Spekter 3 je spojina cinka, žvepla in kisika. Ta kombinacija elementov pa spominja na cinkov sulfid, ki je najpogostejša cinkova ruda, imenovana tudi sfalerit. Ta mineral je na našem področju redek, zato nam je njegov izvor neznan (lahko podnebne spremembe).

6.5 DISKUSIJA

Sestava prahu v kuhinji, hodniku, učilnicah in sobah je praktično identična, saj je prah sestavljen večinoma iz organskih delcev vlaknaste in amorfne oblike, med katerimi se najdejo tudi anorganski delci amorfne oblike. Kemična mikroanaliza v teh prostorih je pokazala podobno sestavo, saj anorgansko snov predstavljajo predvsem okruški ometa ali peščenih zrn. To potrjuje našo prvo hipotezo, da najpogostejši anorganski prašni delci vsebujejo pretežno kalcij.

Organsko snov pa večinoma sestavljajo delci vlaknastih oblik, za katere predvidevamo, da so vlakna iz oblačil, lasje, rastlinska vlakna itd. ter delci amorfne oblike, ki pa so predvidoma odmrle celice, delci mikroplastike ipd. Opazili smo, da so organski delci v notranjih prostorih najpogostejši. S tem potrdimo našo drugo hipotezo, da so prašni delci najpogostejše organskega izvora.

Povsem drugačno sliko pa smo opazili v analizi vzorca iz zunanjega okolja, saj ta ni vsebovala skoraj nič organskih delcev, temveč predvsem delce anorganskega izvora. Raznolikost delcev je bila največja, saj je prah vseboval delce, ki vsebujejo cink, železo in zrna peska. Tako lahko potrdimo tudi tretjo hipotezo, saj je v primerjavi z zunanjim okoljem v notranjih prostorih večja koncentracija organskih delcev, v zunanjem okolju pa je raznolikost delcev večja.

Prostori s specifično uporabo, kot so kemijski laboratoriji/učilnice, mehanične ali lesne delavnice, vsebujejo prašne delce, ki so značilni za te prostore. V kemijski učilnici so bile prisotne sledi kemikalij, uporabljenih v eksperimentih, prah lesne delavnice je vseboval večinoma lesne ostružke, kar se je jasno videlo iz kemijske sestave in oblike delcev. V mehanični delavnici je prah vseboval veliko delcev železa, ki so posledica brušenja in obdelave kovin z orodjem. S tem lahko drugo hipotezo, da je sestava prahu odvisna od namena prostora, potrdimo.

7 ZAKLJUČEK

Po pregledu in analizi slik ter kemične sestave vzorcev smo prišli do več ugotovitev. V urbanem okolju smo definitivno obkroženi s prašnimi delci, ki se razlikujejo po obliki, velikosti in kemični sestavi. Analiza rezultatov je pokazala podobnost sestave prašnih delcev v prostorih, ki nimajo specializirane uporabe. Najbolj smo zadovoljni, da v našem okolju nismo našli zdravju škodljivih snovi.

V primeru ponovne izvedbe raziskovalne naloge bi si na elektronskem mikroskopu ogledali več različnih vzorcev iz zunanjega okolja, saj so ti pokazali največjo raznolikost prašnih delcev. Poleg tega bi raziskali, ali se sestava prahu spreminja skozi letni čas. Zanimala nas bi tudi razlika sestave prahu v različnih slovenskih krajih. Uporabili bi lahko še druge spektroskopske metode, kot so infrardeča spektroskopija, masna spektroskopija, sklopljena z induktivno sklopljeno plazmo. Te metode bi omogočile, da bi razlikovali in analizirali sestavo organskih prašnih delcev. Poskusili bi narediti tudi kvantitativno analizo in se povezati z Agencijo Republike Slovenije za okolje.

8 BIBLIOGRAFIJA

- Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.* (12. avgust 2006). World Health Organization 2005. Pridobljeno iz <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>
- Baniya, S. (2022). Parts of a Microscope with Their Functions. Pridobljeno iz https://microbeonline.com/parts-of-microscope-and-their-functions/?utm_content=cmp-true
- Bec, D., & drugi. (2022). *Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2021*. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje. Pridobljeno iz https://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/kakovost_letna.html
- Biblan, M. (2014). Onesnaževala zraka. *Delo in varnost*, 16-19. Pridobljeno iz <http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-JZ9QA2GF>
- Castang, C., & drugi. (april 2022). Aerodynamic coefficients of irregular non-spherical particles at intermediate Reynolds numbers. *Powder Technology*. Pridobljeno iz <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591022002352>
- Cegnar, T., Kofol Seliger, A., & drugi, i. (junij 2019). Zbornik povzetkov strokovnega srečanja Podnebje, okolje in alergije. Celje. Pridobljeno iz <https://nijz.si/publikacije/podnebje-okolje-in-alergije/>
- Conklin, D. (18. marec 2011). Why Particulate Matter Matters. *Beware the Air!*, 716 – 726. Pridobljeno iz <https://www.ahajournals.org/doi/full/10.1161/CIRCRESAHA.111.241174>
- Cytiva. (2023). Cytiva. Pridobljeno iz <https://www.cytivalifesciences.com/en/us/solutions/lab-filtration/knowledge-center/pm2-5-beyond-respiratory-health>
- Dimitrios, K., & drugi. (2014). *Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies*. Pridobljeno iz <https://op.europa.eu/s/x86c>
- Evropska Agencija za okolje. (23. november 2020). *Evropska Agencija za okolje*. Pridobljeno iz <https://www.eea.europa.eu/sl/themes/air/intro>
- Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo. (2018). Delovno okolje-Aerosoli. Pridobljeno iz https://studentski.net/gradivo/ulj_fkt_tv1_dok_sno_prah_zapiski_01
- Fayed, M., & drugi. (1997). *Handbook of Powder Science & Technology*. Pridobljeno iz https://books.google.si/books?hl=sl&lr=&id=0IHABwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=industrial+powder&ots=9HoJLLDv9F&sig=m_DyGu4LOGycvU0tMNJuQU6HoLQ&redir_esc=y#v=onepage&q=industrial%20powder&f=false
- Goldstein, J., & drugi. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: Third Edition*. Pridobljeno iz https://books.google.si/books?id=ruF9DQxCDLQC&redir_esc=y
- Great Britain Air Quality Expert Group. (2005). *Particulate Matter in the United Kingdom*. Department of the Environment, Food and Rural Affairs. Pridobljeno iz <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/aeqg/ch2.pdf>

- Hobson, T. (29. september 2021). Why Learn the Shape of Your Dust? Pridobljeno iz <https://blog.dustcollectorhq.com/why-learn-the-shape-of-your-dust>
- Jazbec, T. (marec 2011). Razvoj metode in določevanje frakcije PM10 lebdečih trdnih delcev. Maribor. Pridobljeno iz <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=17684&tab=osnovno&b=>
- Jug, U., & Jug, D. (december 2021). LOKALNI ENERGETSKI KONCEPT OBČINE POLZELA. Pridobljeno iz <https://www.polzela.si/lokalni-energetski-koncept/>
- Kuracina, R., & drugi. (junij 2015). Determination Of The Maximum Explosion Pressure And The Maximum Rate Of Pressure Rise During Explosion Of Wood Dust Clouds. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. doi:10.1515/rput-2015-0006
- Marčenko, E. (november 2020). Učinkovitost filtriranja zunanjega zraka v prezračevalnih in klimatizacijskih napravah. Ljubljana. Pridobljeno iz <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122043&lang=slv>
- Meinander, O., & drugi. (14. september 2022). Newly identified climatically and environmentally significant high-latitude dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Pridobljeno iz <https://doi.org/10.5194/acp-22-11889-2022>
- Miuc, A. (2017). Določanje in kemometrijska analiza organskih spojin absorbiranih na prašne delce PM10. Maribor. Pridobljeno iz <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=65573&lang=slv>
- Nacionalni laboratorij za okolje, zdravje in hrano; Nacionalni inštitut za javno zdravje; Agencija Republike Slovenije za okolje. (4. junij 2019). Podnebje, okolje in alergije. Celje: Agencija Republike Slovenije za okolje. Pridobljeno iz <https://nizj.si/publikacije/podnebje-okolje-in-alergije/>
- Nakach, M., & drugi. (10. december 2004). Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders. str. 173-181. Pridobljeno iz <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751604000523?via%3Dihub>
- Pharmacy Gyan. (2023). Ball Mill. Pridobljeno iz <https://pharmacygyan.com/ball-mill/>
- Quality of Urban Air Review Group. (1. maj 1996). Airborne particulate matter in the United Kingdom. Pridobljeno iz https://uk-air.defra.gov.uk/library/reports?report_id=48
- R. Masters, B. (15. september 2008). History of the Optical Microscope in Cell Biology and Medicine. doi: 10.1002/9780470015902.a0003082
- Rhodes, M. (1990). *Principles of powder technology*. Wiley. Pridobljeno iz https://powderprocess.net/Grinding_Milling.html
- Sacks, J., & drugi. (1. april 2011). Particulate Matter–Induced Health Effects: Who Is Susceptible? *Environmental Health Perspectives*. Pridobljeno iz <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1002255>
- Sedej, A. (16. september 2016). Možnost zmanjšanja vnosa emisij delcev v zunanji zrak z nadomestitvijo klasičnega načina gradnje z gradnjo brez izkopa pri gradnji podzemne linijske infrastrukture. Ljubljana. Pridobljeno iz <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=88366&lang=slv>

- Shaddick, G., & drugi. (17. junij 2020). Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj Climate and Atmospheric Science*. Pridobljeno iz <https://www.nature.com/articles/s41612-020-0124-2>
- The World Air Quality Index project. (10. maj 2022). Pridobljeno iz World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index: <https://waqi.info/>
- Tomasi, C., & Lupi, A. (4. november 2016). Primary and Secondary Sources of Atmospheric Aerosol. *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*. Pridobljeno iz https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527336451_c01.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency. (september 2003). Particle Pollution and Your Health. Pridobljeno iz <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001EX6.txt>
- U.S. Environmental Protection Agency. (avgust. 30 2022). Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). Pridobljeno iz <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- Uršič, A., & drugi. (2014). *OCENA VPLIVA ONESNAŽENOSTI ZRAKA Z DELCI (PM) NA UMRLJIVOST V SLOVENSKIH KRAJIH*. Nacionalni inštitut za javno zdravje (NIJZ). Pridobljeno iz <https://5dok.info/document/yj78v2-ocena-vpliva-onesna%C5%BEnosti-umrljivost-slovenskih-kraji-prekomerno-onesna%C5%BEnim.html>
- Zhou, W., & drugi. (2007). Fundamentals of Scanning Electron Microscopy. *Scanning Microscopy for Nanotechnology*. Pridobljeno iz https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-39620-0_1