

Emisije hlapnih in polhlapnih organskih spojin iz gradbenih proizvodov in ocena njihovega vpliva na zdravje

EMISSION OF VOLATILE AND SEMIVOLATILE ORGANIC COMPOUNDS OF BUILDING MATERIALS AND HEALTH IMPACT ASSESSMENT

Andreja Kuček^{1,2}, An Galičič³, Rok Jovišič¹, Majda Pohar¹, Viviana Golja¹

1 Nacionalni inštitut za javno zdravje, Center za zdravstveno ekologijo, Trubarjeva 2, SI-1000 Ljubljana

2 Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Katedra za javno zdravje, Zaloška 4, SI-1000 Ljubljana

3 Nacionalni inštitut za javno zdravje, Center za nalezljive bolezni, Trubarjeva 2, SI-1000 Ljubljana

Kaj je znanega?

Znano je, da se iz gradbenih materialov v notranji zrak sproščajo različne hlapne in polhlapne organske spojine. Zlasti v ogrevalni sezoni leta, ko je zračenje omejeno, lahko te spojine dosežajo koncentracije, ki so zdravju škodljive.

Kaj je novega?

V Sloveniji emisij hlapnih in polhlapnih organskih spojin iz gradbenih proizvodov še ne poznamo dovolj in še nimamo razvitega sistema za njihovo ocenjevanje.

Navajajte kot:

Kuček A., et al. Emisije hlapnih in polhlapnih organskih spojin iz gradbenih proizvodov in ocena njihovega vpliva na zdravje. Javno zdravje 2021; 03.

Prispelo:

29.1.2021

Sprejeto:

17.3.2021

Korespondenca:

viviana.golja@nijz.si

Članek je licenciran pod pogoji Creative Commons Attribution 4.0 International licence. (CC-BY licenca). The article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY license).

Izvleček

Uvod: V epidemioloških raziskavah je dokazana povezanost med izpostavljenostjo hlapnim (VOCs) in polhlapnim (SVOCs) organskim spojinam v stavbah in pogostejšim pojavljanjem ali poslabšanjem bolezni dihal, raka pljuč in malignega mezotelioma. Namen preglednega članka je predstaviti vpliv gradbenih proizvodov na kakovost zraka v zaprtih prostorih, vrednotenje emisij VOCs in SVOCs iz gradbenih proizvodov ter značilnih emisij iz lesa in lesnih materialov.

Metode: Pregled objavljene dosegljive strokovne in znanstvene literature smo opravili v mednarodni podatkovni bazi PubMed in spletni strani Regionalnega urada Svetovne zdravstvene organizacije za Evropo. Iz Uradnega lista Republike Slovenije smo pridobili podatke o priporočilih in zakonskih določilih ter zahtevah na proučevanem področju.

Rezultati in razprava: Iz gradbenih materialov se v notranji zrak sproščajo različne organske snovi, njihova sestava in koncentracija v notranjem zraku je zelo odvisna od vrste materiala, temperature in relativne vlažnosti zraka, prezračevanja in hitrosti gibanja zraka v prostoru ter od aktivnosti ljudi v prostoru. Sproščene snovi pri dolgotrajni izpostavljenosti lahko predstavljajo tveganje za zdravje. Sproščanje snovi iz gradbenih materialov in ocena tveganja za zdravje zaradi izpostavljenosti tem snovem je kompleksen problem zaradi zahtevnega preskušanja, včasih neznanih toksikoloških lastnosti snovi in zaradi številnih negotovosti pri ocenah tveganja.

Zaključek: Za preprečevanje možnih škodljivih učinkov na zdravje zaradi izpostavljenosti organskim spojinam, ki se sproščajo v notranji zrak iz gradbenih materialov ter za zaščito občutljivih populacij, je priporočljivo zmanjšati izpostavljenost na najmanjšo možno mero.

Ključne besede: hlapne in polhlapne organske snovi, emisije, gradbeni proizvodi, vplivi na zdravje.

Abstract

Introduction: Several epidemiological studies have already proved the association between the exposure to volatile (VOCs) and semi-volatile (SVOCs) organic compounds in buildings and increased incidence, exacerbation of respiratory diseases, lung cancer and malignant mesothelioma. The aim of our review was to present the impact of construction products and materials on quality of indoor air, evaluation of VOCs and SVOCs emissions from construction products, and emissions released from wood and wooden materials.

Methods: A literature review was performed in the international PubMed database, and on the WHO Regional Office for Europe website. We obtained data on recommendations, legislation, and legal requirements from The Official Gazette of the Republic of Slovenia.

Results and discussion: Various organic substances are released into indoor air from building materials. The composition and concentration of these substances can vary greatly regarding the type of material, temperature, relative humidity, ventilation and speed of air movement in the room, as well as regarding different human activities in the room. Chronic exposure to these substances may pose a health risk. The health risk assessment due to exposure to substances released from building materials is a complex problem, since the testing procedure is very complex, the toxicological characteristics of the substances are sometimes unknown, and the risk assessments can have many uncertainties in the process.

Conclusion: To prevent possible adverse health effects due to exposure to organic compounds released into the indoor air from building materials and to protect vulnerable populations, minimization of our exposure to these substances is recommended.

Keywords: volatile and semi-volatile organic compounds, emission, building materials, health effects.

UVOD

Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije (SZO) okoljski dejavniki tveganja prispevajo okoli 20 % vseh smrti v Evropi. SZO med pomembne okoljske dejavnike tveganja za negativne zdravstvene pojave uvršča degradirano urbano okolje zaradi onesnaženja zunanega zraka, okoljskega hrupa, pomanjkanja zelenih površin in transportnih poti (1). Izraz »grajeno okolje« opredeljuje elemente fizičnega okolja, ki zagotavljajo opravljanje človekove dejavnosti, in sicer prostor, v katerem ljudje bivajo, delajo in ustvarjajo. Elemente grajenega okolja tvorijo stavbe in njeni sistemi (npr. sistemi za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje), rekreacijske/zelene površine ter transportne poti in promet (2).

Pomemben kazalnik okoljske neenakosti predstavljajo razmere v bivalnem in delovnem okolju v povezavi s stavbo in njenimi sistemi, kot so kakovost zraka v zaprtih prostorih, neustrezna raven hrupa, neustrezna relativna vlažnost prostorov, prisotnost plesni, neustrezno toplotno udobje in neustrezna osvetljenost. Z vidika učinkov na zdravje je pomembno proučiti tudi emisije nevarnih snovi iz zgradbe, tal, gradbenih materialov, notranje opreme in snovi, ki nastanejo zaradi človeške dejavnosti v zaprtih prostorih (2). Po definiciji iz Uredbe (EU) št. 305/2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov »gradbeni proizvod« pomeni vsak proizvod ali sklop proizvodov, ki je proizveden in dan na trg za trajno vgradnjo v gradbene objekte ali njihove dele ter katerega lastnosti spremenijo lastnosti gradbenih objektov glede na osnovne zahteve za gradbene objekte (3).

Uredba določa, da morajo biti gradbeni objekti kot celote in njihovi posamezni deli primerni za predvideno uporabo, pri čemer je potrebno upoštevati zdravje in varnost udeleženih ljudi v celotni življenjski dobi teh objektov. Poleg navedenega Uredba navaja, da morajo gradbeni objekti ob običajnem vzdrževanju izpolnjevati osnovno zahtevo št. 3, tj. »Higiena, zdravje in okolje«. Zahteva določa, da skozi celotno življenjsko dobo stavbe ne smeta biti ogrožena higiena ali zdravje, preprečeno mora biti sproščanje strupenih plinov in emisij nevarnih snovi, hlapnih organskih spojin v zraku v zaprtih prostorih (3).

Zahteve za kakovost notranjega zraka so opredeljene v *Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb* (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ). Zrak v prostoru mora biti svež in prijeten, brez

vonjav in ne sme ogroziti zdravja ljudi v prostoru. Pravilnik tudi določa največje dopustne koncentracije zdravju škodljivih snovi v notranjem zraku stavb (Tabela 1), med njimi tudi hlapnih organskih spojin (4).

Tabela 1: Dopustne koncentracije onesnaževal zraka v zaprtih prostorih (povzeto po *Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb* (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ)).

| Onesnaževalo | Enota | Dopustna vrednost |
|--|-------------------|-------------------|
| Ogljikov dioksid* (CO ₂) | mg/m ³ | 3000 |
| Radon** (Rn) | Bq/m ³ | 400 |
| Amoniak in amini*** (NH ₃) | µg/m ³ | 50 |
| Formaldehid*** (H ₂ CO) | µg/m ³ | 100 |
| Hlapne organske snovi**** (VOC) | µg/m ³ | 600 |
| Ogljikov monoksid (CO) | µg/m ³ | 10 |
| Ozon (O ₃) | µg/m ³ | 100 |
| Masna koncentracija lebdečih trdnih delcev frakcije PM ₁₀ ***** | µg/m ³ | 100 |

Legenda:

- * Koncentracija vključuje CO₂ v zunanjem zraku (700 µg/m³) in emisijo CO₂ človeka.
- ** Povprečna letna koncentracija radona v stanovanjskih objektih. Priporočilo 200 Bq/m³.
- *** Nanaša se na emisijo gradbenega materiala in ne na emisijo človeka ali človekove aktivnosti.
- **** Vsaj 70 % hlapnih organskih snovi mora biti identificiranih, njihove koncentracije ne smejo prekorajiti največjih dopustnih vrednosti (npr. karcinogenov, alergenov itn.). Nanaša se na emisijo gradbenega materiala in ne na emisijo človeka ali človekove aktivnosti.
- ***** Masna koncentracija prostorsko nastalih lebdečih trdnih delcev se meri skladno s SIST EN 12341 neopretrgoma 24 ur pri normalni človekovi aktivnosti v prostoru.

Hlapne organske spojine (angl. volatile organic compounds, VOCs) so snovi, ki imajo visok parni tlak pri sobni temperaturi. To pomeni, da se že pri sobni temperaturi v zraku nahaja veliko število njihovih molekul. V zraku jih zlahka zavohamo (5). Polhlapne organske spojine (angl. semi-volatile organic compounds, SVOCs) pa so manj hlapne kot VOCs, pri sobni temperaturi jih je v zraku manj in jih ne zavohamo. V notranjih prostorih se povežejo z delci prahu (5).

V priporočilih SZO (5), ki obravnavajo izbrana onesnaževala v notranjem zraku, so navedena opozorila na negativne zdravstvene pojave v povezavi z

izpostavljenostjo VOCs, radonu, tobačnemu dimu (pasivno kajenje), onesnaževalom, ki nastajajo pri kuhanju in azbestu. Epidemiološke raziskave, opredeljene v priporočilih SZO (5), so dokazale povezanost med izpostavljenostjo navedenim onesnaževalom v stavbah in pogostejšim pojavljanjem ali poslabšanjem bolezni dihal, predvsem astme, raka pljuč in malignega mezotelioma ter poslabšanjem pljučne funkcije.

Zaradi spremenjenega načina življenja v zadnjem stoletju ljudje v bivalnih in delovnih prostorih preživimo od 80 do 90 % časa (6). Posledično kakovost zraka predstavlja pomembno vlogo pri zdravju, udobju in delovanju ljudi. Termin kakovost zraka (angl. indoor air quality, IAQ) opredeljuje kakovost zraka v stavbah. Ta je odvisna od vrste in koncentracij onesnaževal, kakovosti zunanjega zraka, obsega izmenjave zraka, lastnosti notranjih površin in notranjih virov onesnaževanja (7). Kemijska onesnaževala so del mnogih gradbenih in izolacijskih materialov (vključno z novejšimi materiali, kot so materiali za energetske učinkovite stavbe, križno lepljen les, vlaknene plošče z različnimi dodatki ter napredni materiali, ki se uporabljajo npr. pri shranjevanju predmetov kulturne dediščine). Sproščanje kemijskih onesnaževal v zrak poteka počasi, traja lahko tudi po več mesecev, celo let. S tem se koncentracije hlapnih organskih spojin v prostoru, predvsem pozimi, ko je zračenje omejeno, bolj povečujejo. Lahko dosežejo tudi vrednosti, ki so zdravju škodljive (8).

Namen preglednega članka je predstaviti vpliv gradbenih proizvodov na kakovost zraka v zaprtih prostorih, vrednotenje emisij VOCs in SVOCs iz gradbenih proizvodov ter značilne emisije iz lesa in lesnih materialov. Poseben cilj prispevka je predstaviti oceno vpliva teh snovi na zdravje.

2 Metode

Uporabljena je bila metoda pregleda objavljene dosegljive strokovne in znanstvene literature. Za iskanje izvirnih znanstvenih člankov in preglednih člankov smo uporabili mednarodno podatkovno bazo znanstvene literature s področja biologije in biomedicine PubMed (9). Uporabili smo naslednjo iskalno sintakso: (volatile organic compound*[MeSH Terms] AND build OR building* [MeSH Terms] AND material* [MeSH Terms] AND (health* [MeSH Terms])). Vključitvena merila za izbor člankov v končno analizo so bila: 1) vsebina članka raziskuje gradbene proizvode in njihov vpliv na kakovost zraka v zaprtih prostorih, 2) vrednotenje emisij VOCs iz gradbenih proizvodov ter značilne emisije iz lesa in lesnih materialov, 3) opredeljen je vpliv na zdravje, 4) angleški jezik, 5) članek, dostopen v celotnem besedilu in 6) časovno obdobje objave od 1. 1. 2000 do 31. 12. 2020. Na podlagi iskalnega niza smo opredelili 208 zadetkov. Na podlagi opredeljenih vključitvenih meril smo v končno analizo vključili 29 člankov. Podatke o priporočilih in zakonskih določilih ter zahtevah na področju, ki smo ga proučevali, smo pridobili iz relevantnih spletnih strani, kot so Regionalni urad SZO za Evropo (10) in Uradni list Republike Slovenije (11). Rezultate raziskav in podatke

o priporočilih in zakonskih zahtevah obravnavanega področja smo prikazali opisno.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1. Emisije hlapnih in polhlapnih organskih spojin iz gradbenih materialov

3.1.1 Gradbeni proizvodi in kakovost notranjega zraka

Emisije VOCs in SVOCs iz gradbenih proizvodov pomembno vplivajo na kakovost zraka v zaprtih prostorih, saj so eden od štirih dejavnikov vpliva: 1 - emisije kemijskih onesnaževal iz zunanjega zraka v prostor; 2 - emisije kemijskih onesnaževal iz materialov, uporabljenih v prostoru (gradbeni materiali vključno s konstrukcijskimi elementi in stavbno pohištvo); 3 - emisije biogenih onesnaževal zelenih rastlin (zlasti hlapne organske spojine), gojenih v zaprtem prostoru; 4 - emisije iz dejavnosti uporabnika prostora (12, 13, 14, 15).

Gradbeni proizvodi v prostor sproščajo onesnaževala, kot so VOCs in SVOCs. VOCs sproščajo talne obloge (npr. PVC/vinil ali linolej, laminati, parket), pohištvo iz vezanega lesa, ki vsebujejo lepila, barve in lake ter drugi gradbeni materiali in izdelki, ki vsebujejo topila (16, 17, 18).

Nekatere hlapne organske spojine v notranjem zraku, zlasti tiste z nizko molsko maso, so lahko posledica hitrega razpada spojin, prisotnih v novih gradbenih materialih, ki razpadejo v nekaj tednih oz. mesecih (19). Nekatere druge hlapne organske spojine pa nastanejo s počasnejšim razpadom zaradi različnih procesov, kot sta staranje in razgradnja materialov (hidroliza, sorpcijski procesi, itd.), zaradi razpadanja kemijskih ali fizikalnih vezi med materiali (20).

Hitrost sproščanja kemijskih onesnaževal iz materialov v zrak je odvisna od vrste materiala, temperature zraka, UV sevanja, relativne vlažnosti zraka in prezračevanja ter s tem povezano hitrostjo gibanja zraka v prostoru (21, 22, 23, 24).

Informacijo o tem, ali je vir posameznega onesnaževala v notranjem ali zunanjem zraku, nam pove razmerje vrednosti onesnaževala v notranjem in zunanjem zraku (angl. indoor/outdoor (I/O) ratio). Pegas in sod. (25) so ugotovili, da so viri metanola (I/O ratio = 2,11), acetona (I/O ratio = 1,13), pentana (I/O ratio = 1,02), diklorometana (I/O ratio = 43,3), 2-metilpentana (1,05) in n-heksana (I/O ratio = 1,28) v prostoru. Nasprotno pa je benzen tipično onesnaževalo z zunanjim izvorom, tako v mestnem (I/O ratio = 0,64 – 0,71) kot podeželskem okolju (I/O ratio = 0,71) (26).

Raziskava Madureire in sod. (17) je pokazala, da so tudi vrednosti aldehydov v prostoru večje od vrednosti v zunanjem zraku.

3.1.2 Vrednotenje emisij hlapnih organskih spojin s pristopom EU-LCI (angl. European Union Lowest Concentrations of Interest)

Idejo o vrednotenju emisij hlapnih organskih spojin iz gradbenih materialov in koncept LCI (angl. Lowest

Concentrations of Interest) so začeli razvijati vodilni evropski znanstveniki v okviru osnovne sheme že konec prejšnjega stoletja (27). Koncept LCI je bil sprejet in dodatno razvit v nekaterih evropskih državah, npr. v Nemčiji (nemška shema AgBB »Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten«) in v Franciji (francoski protokol »Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail«, AFFSET, današnji »Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail« oziroma ANSES) za vrednotenje emisij VOCs iz gradbenih proizvodov (28). Skupno raziskovalno središče (angl. European Commission, Joint Research Center, EC-JRC,) pa je leta 2011 ustanovilo delovno skupino za EU-LCI. Njena naloga je pridobiti harmonizirane referenčne vrednosti emisij iz gradbenih proizvodov. Harmonizirane vrednosti EU-LCI so tako kot francoske in nemške vrednosti emisij opredeljene enako, za njihovo določitev pa se uporabljajo različni postopki (27).

EU-LCI vrednosti so koncentracije onesnaževal (navadno izražene v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) v standardizirani preskusni komori, ki ne bodo povzročale negativnih učinkov na zdravje splošne populacije pri dolgotrajni izpostavljenosti in se uporabljajo pri oceni varnosti proizvodov. Določene so z upoštevanjem epidemioloških ali toksikoloških informacij iz (znanstvene) literature, informacij uveljavljenih mednarodnih ali nacionalnih odborov in/ali drugih veljavnih študij in strokovnih presoj. Vrednosti EU-LCI so namenjene oceni emisij posameznih proizvodov in ne pomenijo ocene kakovosti zraka v notranjem prostoru (29).

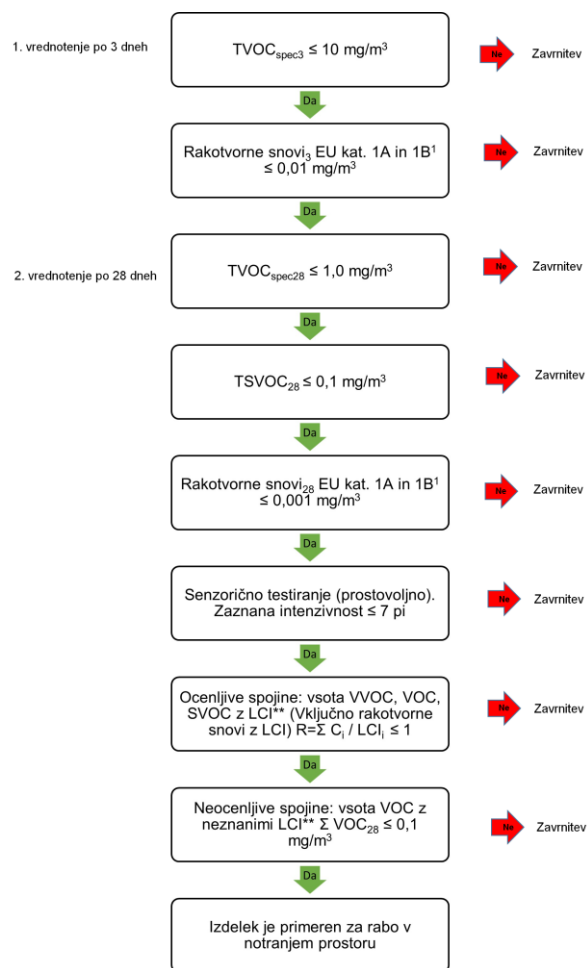
S primerjavo z EU-LCI vrednostmi se ocenjujejo emisije hlapnih organskih spojin iz izdelka, ki je bil 28 dni zaprt v standardizirani preskusni komori pri kontroliranih pogojih, kot jih predpisuje standard EN 16516 (28). Pomembni parametri, ki vplivajo na rezultat, so temperatura, število izmenjav zraka, relativna vlažnost, hitrost zraka v preskusni komori, količina ali površina materiala v komori in način priprave vzorca (28, 29, 30).

Po preskušanju proizvoda v standardizirani preskusni komori po standardu EN 16516 je potrebno emisije vrednotiti. Primer vrednotenja po nemški shemi AgBB (30) je prikazan na Sliki 1. Prvi del vrednotenja se izvede po treh dneh, pri čemer se ocenjujejo celotne hlapne organske spojine (angl. total volatile organic compounds, TVOCs). V primeru, da je izmerjena vrednost TVOCs večja ali enaka $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, se izdelek zavrne. Če je izmerjena vrednost TVOCs manjša kot $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, se vrednotenje nadaljuje. Nato se oceni še koncentracija hlapnih rakotvornih snovi (snovi, razvrščenih v kategoriji EU 1A in 1B po Uredbi o razvrščanju, pakiranju in označevanju snovi, ter zmesi (31)). V primeru, da je njihova izmerjena vrednost večja ali enaka $0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$, se izdelek zavrne, v nasprotnem primeru se preskušanje nadaljuje (30).

Drugi del vrednotenja se izvede po 28 dneh preskušanja. Najprej se ocenjuje TVOCs. V primeru, da je izmerjena vrednost TVOCs večja ali enaka $1,0 \text{ mg}/\text{m}^3$, se izdelek zavrne, v nasprotnem primeru se vrednotenje nadaljuje. Nato se ocenjuje celotne polhlapne organske spojine (angl. total semi-volatile

organic compounds, TVOCs). V primeru, da je izmerjena vrednost večja ali enaka $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$, se izdelek zavrne, v nasprotnem primeru se vrednotenje nadaljuje. Po 28 dneh se ocenjuje tudi koncentracija rakotvornih spojin. Izmerjena vrednost ne sme biti večja ali enaka $0,001 \text{ mg}/\text{m}^3$. Sledi izvedba senzoričnega testiranja, ki ni obvezno. Zaznana intenzivnost vonja ne sme biti ≤ 7 pi (zaznana intenzivnost, angl. perceived intensity, na skali od 0 do 15). Za spojine, ki imajo določeno EU-LCI vrednost, se oceni vsota koncentracij zelo hlapnih organskih spojin (angl. very volatile organic compounds, VVOCs), hlapnih organskih spojin (VOCs) in polhlapnih organskih spojin (SVOCs). Vsota koncentracij se določi tudi za neocenljive hlapne organske spojine (spojine, ki še nimajo določene EU-LCI vrednosti). Teh v zraku standardizirane preskusne komore ne sme biti več kot $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$. Proizvod, ki ustreza vsem ocenjevalnim kriterijem, se šteje kot varen in je dovoljen za uporabo.

V Sloveniji ocenjevanja gradbenih materialov na tako opisan način še ne izvajamo.



Slika 1: Shema vrednotenja emisij iz gradbenih materialov povzeta po nemški shemi AgBB (30). Pomen kratic: TVOCs: celotne hlapne organske spojine, TSVOCs: celotne polhlapne organske spojine, VVOCs: zelo hlapne organske spojine, VOCs: hlapne organske spojine, SVOCs: polhlapne organske spojine, LCI: referenčna koncentracija snovi.

3.1.3 Emisije iz lesa

Les je naraven in primeren kot gradbeni material. Njegova uporaba lahko različno vpliva na kakovost notranjega zraka, kar je odvisno od vrste lesa ter sredstev za njegovo obdelavo in ohranjanje (32, 33, 34).

Izdelki iz naravnega lesa lahko v notranji zrak sproščajo veliko terpenov (35). Alfa-pinen je glavni sestavni del terpentina in je značilen za emisije iz iglavcev, predvsem bora in navadne smreke (29). Predelan les, npr. iverne plošče, lahko sprošča benzen (5) in formaldehid, ter druge aldehide, npr. heksanal, nonanal, oktanal (36, 37, 38). Lesni materiali prispevajo tudi k povišanim koncentracijam očetne kisline (39). Značilne emisije iz lesa so predstavljene v Tabeli 2.

Tabela 2: Značilne emisije iz lesa in nekaterih lesnih izdelkov (povzeto po 29, 35, 37, 38, 39, 40, 41).

| Lesni izdelek | Značilne emisije | Referenca |
|--|--------------------------------------|-----------|
| Naravni les | terpeni (npr. α -pinen) | 29, 35 |
| | Organske kisline npr. očetna kislina | 39 |
| | formaldehid | 40 |
| Iverne plošče, sestavljene lesne plošče, vezan les | benzen | 5 |
| | heksanal, formaldehid | 38, 41 |
| | nonanal, oktanal in heksanal | 37 |

Formaldehid je značilno in pogosto onesnaževalo notranjega zraka, večina emisij formaldehida v okolje pa prihaja iz sečninsko-formaldehidnega lepila v lesnih izdelkih (41). Formaldehid in drugi aldehidi ter ketoni so prisotni tudi v emisijah iz naravnega lesa, ki ni lepljen, ker nastajajo pri toplotni razgradnji v lesu prisotnih polisaharidov (40).

Emisije formaldehida in drugih hlapnih organskih spojin iz naravnega lesa so odvisne od vrste lesa, vsebnosti vlage v lesu, temperature in časa skladiščenja (40).

3.1.4 Ocena vpliva hlapnih organskih snovi na zdravje

SZO je že pred leti ugotovila, da hlapne (in manj hlapne) organske snovi, ki se sproščajo iz gradbenih materialov (npr. stenskih oblog, barv in lakov, s katerimi so pobarvane, ter ostankov čistil na površinah) vplivajo na kakovost notranjega zraka, kar predstavlja javnozdravstveni problem (5). Sproščene organske snovi lahko vplivajo na počutje ljudi v prostoru, imajo lahko moteč vonj, delujejo dražeče na sluznice, povzročajo glavobol, utrujenost, težave s koncentracijo in slabost. Gre za skupek nespecifičnih znakov in simptomov, ki jih poimenujemo z izrazom »sindrom bolnih stavb«. Največkrat niso vezani na točno določen razlog, kaže pa, da so povezani s sproščanjem kemikalij iz različnih materialov, lahko tudi s prezračevalnimi in klimatskimi napravami, z ogrevanjem. Med organskimi snovmi, ki se sproščajo iz različnih materialov, so lahko tudi rakotvorne in mutagene snovi, snovi strupene za reproduktivni, živčni in srčno-žilni sistem, snovi, ki povzročajo ali spodbujajo nastanek preobčutljivostnih

reakcij (42, 43). Za mnoge hlapne in manj hlapne organske snovi, ki se sproščajo iz gradbenih materialov, pa toksikološke informacije še niso na voljo.

Hlapnim organskim spojinam se, za povečanje trajnosti in prožnosti polivinil klorida ter drugih plastičnih mas, med predelavo dodaja različne mehčalce, npr. ftalate. Nekateri ftalati so strupeni in lahko prispevajo k razvoju številnih kroničnih bolezni. Razvrščeni so med snovi, strupene za reproduktivni sistem, lahko spremenijo delovanje hormonskega sistema (44). Bilban s sodelavci (8) je v pregledu literature povzel rezultate epidemioloških raziskav, ki kažejo na povezanost ftalatov s pojavom astme, alergije in draženja sluznic dihal. Najbolj izpostavljene populacijske skupine so otroci (glede na telesno maso vdihnejo več zraka) in odrasli na delovnih mestih (poklicna izpostavljenost) (8).

Kratkotrajno in dolgotrajno vdihavanje formaldehida, ki se sprošča iz lesenih izdelkov pri ljudeh, zlasti pri otrocih, lahko povzroči bolezni dihal in draženje oči, nosu in grla (36). Predvideva se, da delci alergenov (npr. cvetni prah) lahko prenašajo formaldehid do spodnjih dihalnih poti (5).

Verjetnost za nastanek škodljivih posledic za zdravje zaradi vdihavanja hlapnih in manj hlapnih organskih snovi pri določeni izpostavljenosti ocenimo tako, da sledimo že znani paradigmi za ocene tveganja (ocena nevarnosti, ocena izpostavljenosti in karakterizacija tveganja) (45, 46, 47).

Nevarnost določene organske snovi identificiramo (ugotovimo vrsto in velikost škodljivega učinka), določimo izpostavljenosti za različne populacije (splošno populacijo – odrasle, otroke različnih starosti, nosečnice, kronične bolnike ...) ter zdravstvene učinke pri različnih nivojih izpostavljenosti. Pri tem upoštevamo velikost prostora, v katerem se nahaja nek gradbeni material, prezračevanje prostora, čas bivanja v prostoru (45). Na koncu tveganje za zdravje ovrednotimo – ocenimo tveganje za zdravje za določeno populacijo. Če toksikoloških informacij o določeni snovi ni na voljo, lahko za oceno tveganja uporabimo različne ne-testne metode npr., in silico metode in navzkrižno branje (angl. read-across) (47). Pri in silico metodah pridobivamo informacije o strupenosti snovi z uporabo računalniške programske opreme ali simulacije, pri navzkrižnem branju pa za oceno varnosti snovi, uporabimo toksikološke informacije druge snovi, ki ji je dovolj podobna.

Pri dražečih snoveh se za oceno učinkov za zdravje neposredno uporabijo koncentracije, izmerjene v zraku. Za sistemske učinke pa je potrebno koncentracije v zraku prevesti v interne odmerke s pomočjo volumnov vdihanega zraka in upoštevati njihovo zadrževanje v pljučnih mešičkih (5). Pri oceni izpostavljenosti je potrebno upoštevati vse možne vire izpostavljenosti določeni snovi, poleg emisij iz gradbenih materialov tudi morebitno prisotnost v notranjem zraku zaradi kajenja, kuhanja, sproščanja iz odprtih kaminov in zaradi gorenja sveč, sproščanja iz pohištva, zaradi uporabe čistil in podobno. Pri manj hlapnih snoveh (npr. pri policikličnih aromatskih ogljikovodikih) ne smemo pozabiti, da se adsorbirajo na površino prašnih delcev

in smo jim zaradi različnih dejavnosti in dvigovanja prahu indirektno izpostavljeni (5).

Za ocene izpostavljenosti obstajajo tudi že računalniški modeli (48). Modeli so relativno poceni, z njihovo uporabo se lahko hitro oceni sproščanje snovi, niso pa še zelo zanesljivi, ne upoštevajo kompleksne kemije med različnimi onesnaževali in lahko vodijo do previsokih ocen sproščenih snovi (48).

SZO je za zdaj določila le smerne vrednosti za devet snovi v notranjem zraku (za benzen, ogljikov monoksid, formaldehid, dušikov dioksid (NO₂), naftalen, policiklične aromatske ogljikovodike (PAH), radon ter tetra in trikloroetilen (5). Pregled navajamo v Tabeli 3. Za ostale spojine ter za kombinirane učinke različnih spojin, istočasno prisotnih v notranjem zraku, smernih vrednosti še nimamo.

Tabela 3: Izvleček smernih vrednosti za zrak in učinkov na zdravje nekaterih onesnaževal (povzeto po SZO dokumentu (5)).

| Onesnaževalo | Učinki na zdravje (glede na opredeljena priporočila) | Smernice | Opombe |
|--------------------------------------|--|--|--|
| Benzen | <ul style="list-style-type: none"> akutna mieloblastna levkemija genotoksičnost | <ul style="list-style-type: none"> ni možno določiti varne ravni izpostavljenosti tveganje za levkemijo pri koncentraciji 1 µg/m³ v zraku je 6 × 10⁻⁴ tveganje za dodatnega raka pri doživljenjski izpostavljenosti smerni koncentraciji 17 µg/m³ je 1/10.000, pri koncentraciji 1,7 µg/m³ je 1/100.000 in pri koncentraciji 0,17 µg/m³ je 1/1.000.000 | |
| Ogljikov monoksid | <ul style="list-style-type: none"> zmanjšana toleranca pri aktivnosti, ki je povezana z akutno izpostavljenostjo in povečanje simptomov na področju ishemičnih bolezni srca | <ul style="list-style-type: none"> za izpostavljenost 15 minut – 100 mg/m³ za 1-urno izpostavljenost – 35 mg/m³ za izpostavljenost 8 ur – 10 mg/m³ za izpostavljenost 24 ur – 7 mg/m³ | |
| Formaldehid | <ul style="list-style-type: none"> draženje oči in zgornjih dihalnih poti | <ul style="list-style-type: none"> za povprečno 30-minutno izpostavljenost – 0,1 mg/m³ | Smernica za 30-minutno izpostavljenost bo preprečila tudi učinke na delovanje pljuč, raka nazofaringsa in mieloblastno levkemijo |
| Naftalen | <ul style="list-style-type: none"> v eksperimentalnih študijah na živalih so ugotovili, da izpostavljenost naftalenu povzroča lezije dihalnih poti, ki vodijo do vnetij in malignosti | <ul style="list-style-type: none"> za povprečno letno izpostavljenost – 0,01 mg/m³ | Smernica za kronično izpostavljenost domnevno vključuje tudi preprečevanje potencialnih malignih učinkov v dihalnih poteh. |
| Dušikov dioksid | <ul style="list-style-type: none"> simptomi dihal, bronhokonstrikcija, povečana bronhialna reaktivnost, vnetje dihalnih poti in zmanjšana odzivnost imunskega sistema kar vodi do povečane dovzetnosti za okužbe dihal. | <ul style="list-style-type: none"> za povprečno 1-urno izpostavljenost – 200 µg/m³ za povprečno letno izpostavljenost – 40 µg/m³ | iz epidemioloških študij ni bilo mogoče opredeliti praga izpostavljenosti. |
| Policiklični aromatski ogljikovodiki | <ul style="list-style-type: none"> rak pljuč | <ul style="list-style-type: none"> praga izpostavljenosti ni bilo mogoče določiti, vsakršna izpostavljenost v notranjem okolju je pomembna za zdravje tveganje za pljučnega raka je za mešanico PAH-ov na ng/m³ benzo(a)pirena ocenjeno na 8,7 × 10⁻⁵ tveganje za dodatnega raka pri doživljenjski izpostavljenosti smerni koncentraciji benzo(a)pirena 1,2 µg/m³ je 1/10.000, pri koncentraciji 0,12 µg/m³ je 1/100.000 in pri koncentraciji 0,012 µg/m³ je 1/1.000.000 | Benzo(a)piren je uporabljen kot marker za mešanico PAH-ov. |
| Radon | <ul style="list-style-type: none"> rak pljuč obstajajo dokazi o možni povezanosti z drugami vrstami raka, predvsem z levkemijo in raki dihalnih poti izven prsne votline | <ul style="list-style-type: none"> ocenjeno je, da je tveganje za smrt zaradi pljučnega raka, ki ga povzroča radon (do starosti 75 let) 0,6 × 10⁻⁵ Bq/m³ za vseživljenjske nekadilce in 15 × 10⁻⁵ Bq/m³ za kadilce, ki pokadijo 15 do 24 cigaret na dan. Med nekdanjimi kadilci je tveganje | Priporočila SZO omogočajo celostni pristop k obvladovanju tveganj za zdravje povezanih z radonom. |

| Onesnaževalo | Učinki na zdravje (glede na opredeljena priporočila) | Smernice | Opombe |
|------------------|--|---|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> med kadicli in nekadicli, odvisno od časa od prenehanja kajenja. tveganje za dodatnega raka pri doživljenjski izpostavljenosti smerni vrednosti radona 67 Bq/m³ je 1/100, za smerno vrednost 6,7 Bq/m³ pa 1/1000 (oboje velja za kadiclice). Za vseživljenjske nekadiclice pa je tveganje pri smerni vrednosti radona 1670 Bq/m³ 1/100, za smerno vrednost 167 Bq/m³ pa je 1/1000. | |
| Trikloretilen | <ul style="list-style-type: none"> rakotvornost (jetra, ledvice, žolčevod in ne-Hodgkinov limfom) in domnevna genotoksičnost | <ul style="list-style-type: none"> tveganje za pljučnega raka je za µg/m³ ocenjeno na $4,3 \times 10^{-7}$ tveganje za dodatnega raka pri doživljenjski izpostavljenosti smerni koncentraciji trikloroetilena 230 µg/m³ je 1/10.000, pri koncentraciji 23 µg/m³ je 1/100.000 in pri koncentraciji 2,3 µg/m³ je 1/1.000.000 | |
| Tetrakloroetilen | <ul style="list-style-type: none"> škodljivi učinki na ledvice (ki nakazujejo zgodnjo ledvično bolezen in oslabiljeno delovanje ledvic) | <ul style="list-style-type: none"> za povprečno letno izpostavljenost – 0,25 mg/m³ | Rakotvornost se ne uporablja kot končna točka, ker ni dokazov za genotoksičnost tetrakloroetilena. Ni dovolj z dokazi podprtih epidemioloških dokazov in študij, ki bi potrjevale rakotvorne učinke na živalih. |

4 ZAKLJUČEK

Iz gradbenih materialov se v notranji zrak sproščajo različne organske snovi. Njihova sestava in koncentracija v notranjem zraku je zelo odvisna od vrste materiala, temperature in relativne vlažnosti zraka, prezračevanja in hitrosti gibanja zraka v prostoru ter od aktivnosti ljudi prostoru. Sproščene snovi lahko predstavljajo tveganje za zdravje pri dolgotrajni izpostavljenosti. Na Nacionalnem inštitutu za javno zdravje (NIJZ), kjer izvajamo ocene tveganja, se zavedamo, da je sproščanje snovi iz gradbenih materialov in ocena tveganja za zdravje zaradi izpostavljenosti tem snovem kompleksen problem zaradi zahtevnega preskušanja, včasih neznanih

toksikoloških lastnosti snovi in zaradi številnih negotovosti pri ocenah tveganja. Istočasno se lahko sproščajo različne organske snovi, ki lahko povzročijo kombinirane učinke. Vseh možnih učinkov ni mogoče predvideti, zato je za preprečevanje možnih škodljivih učinkov na zdravje zaradi izpostavljenosti organskim spojinam, ki se sproščajo v notranji zrak iz gradbenih materialov ter za zaščito občutljivih populacij, priporočljivo zmanjšati izpostavljenost na najmanjšo možno mero.

Ocenjevanje emisij različnih organskih spojin iz posameznih gradbenih izdelkov s pomočjo standardizirane testne komori se v Sloveniji sistemsko še ne izvaja.

Zahvala: Delo je nastalo s finančno pomočjo projekta InnoRenew CoE (Horizon 2020 Framework Programme of the European Union; H2020 WIDESPREAD-2-Teaming; #739574).

Nasprotje interesov: Avtor izjavlja, da pri raziskavi ne obstaja nasprotje interesov.

Etika raziskovanja: Prispevek je bil pripravljen v skladu z etiko raziskovanja v javnem zdravju.

LITERATURA

1. World Health Organization, Regional Office for Europe. Evolution of World Health Organization air quality guidelines: past, present and future. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2017.
2. Dovjak M, Kuček A. Creating Healthy and Sustainable Buildings. An Assessment of Health Risk Factors. Switzerland: Springer, 2019.
3. Uredba (EU) št. 305/2011 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 9. marca 2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov.
4. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ).

5. World Health Organization, Regional Office for Europe. Guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2010.
6. Lu CY, Lin JM, Chen YY, Chen YC. Building-Related Symptoms among Office Employees Associated with Indoor Carbon Dioxide and Total Volatile Organic Compounds. *Int J Environ Res Public Health*. 2015; 12(6): 5833–45.
7. Jutraz A, Kukec A, Uršič S, uredniki. Zdrav zrak, zdravi otroci – Kakovost notranjega zraka v osnovnih šolah. Priročnik projekta InAirQ: Priročnik za izobraževanje učencev in učiteljev osnovnih šol. Ljubljana: Nacionalni inštitut za javno zdravje, 2019.
8. Bilban M, Rejc T, Dovjak M, Kukec A. Sindrom bolnih stavb in bolezni, povezane z bivanjem v grajenem okolju: opredelitev učinkov na zdravje in dejavnikov tveganja. *Delo in varnost*. 2017; 62(5): 28–43.
9. National Center for Biotechnology Information. PubMed [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 20. 11. 2020 s spletne strani: <http://www.pubmed.org>.
10. World Health Organization, Regional Office for Europe [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 20. 11. 2020 s spletne strani: <https://www.euro.who.int/en>.
11. Uradni list Republike Slovenije [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 20. 11. 2020 s spletne strani: <https://www.uradni-list.si/>.
12. Schlink U, Thiem A, Kohajda T, Richter M, Strebel K. Quantile regression of indoor air concentrations of volatile organic compounds (VOC). *Science of The Total Environment*. 2010; 408(18): 3840–51.
13. Joo E, Van Langenhove H, Simpraga M, Steppe K, Amelynck C, Schoon N, et al. Variation in biogenic volatile organic compound emission pattern of *Fagus sylvatica* L. due to aphid infection. *Atmospheric Environment*. 2010; 44(2): 227–34.
14. Forester CD, Wells JR. Hydroxyl radical yields from reactions of terpene mixtures with ozone. *Indoor Air*. 2011; 21(5): 400–9.
15. Schripp T, Langer S, Salthammer T. Interaction of ozone with wooden building products, treated wood samples and exotic wood species. *Atmospheric Environment*. 2012; 54: 365–72.
16. Demirel G, Özden Ö, Döğeroğlu T, Gaga EO. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂ and ozone in Eskişehir, Turkey: Relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment. *Science of The Total Environment*. 2014; 473–4: 537–48.
17. Madureira J, Paciencia I, Pereira C, Teixeira JP, Fernandes EdO. Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air*. 2016; 26(4): 526–37.
18. Harčárová K, Vilčeková S, Bálintová M. Building Materials as Potential Emission Sources of VOC in the Indoor Environment of Buildings. *Key Engineering Materials*. 2020; 838: 74–80.
19. Shin S-H, Jo W-K. Longitudinal variations in indoor VOC concentrations after moving into new apartments and indoor source characterization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013; 20(6): 3696–707.
20. Wolkoff P. How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from building products. A perspective. *Science of the Total Environment*. 1999; 227(2-3): 197–213.
21. Zhang Y, Luo X, Wang X, Qian K, Zhao R. Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials. *Atmospheric Environment*. 2007; 41(15): 3203–16.
22. Han K, Zhang JS, Wargocki P, Knudsen HN, Varshney PK, Guo B. Model-based approach to account for the variation of primary VOC emissions over time in the identification of indoor VOC sources. *Building and Environment*. 2012; 57: 403–16.
23. Lee Y-K, Kim H-J. The effect of temperature on VOCs and carbonyl compounds emission from wooden flooring by thermal extractor test method. *Building and Environment*. 2012; 53: 95–9.
24. Enescu D. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2017; 79: 1353–79.
25. Pegas PN, Nunes T, Alves CA, Silva JR, Vieira SLA, Caseiro A, et al. Indoor and outdoor characterisation of organic and inorganic compounds in city centre and suburban elementary schools of Aveiro, Portugal. *Atmospheric Environment*. 2012; 55: 80–9.
26. Raysoni AU, Stock TH, Sarnat JA, et al. Characterization of traffic-related air pollutant metrics at four schools in El Paso, Texas, USA: Implications for exposure assessment and siting schools in urban areas. *Atmos Environ* 2013; 80: 140–51.
27. European Commission. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. EU-LCI Values. [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en.
28. EN 16516:2017+A1:2020 Gradbeni proizvodi - Ocenjevanje sproščanja nevarnih snovi - Določevanje emisije v notranji zrak (vključuje dopolnilo A1).
29. Harmonisation framework for health based evaluation of indoor emissions from construction products in the European Union using the EU-LCI concept, Report No 29 Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC83683/eca%20report%2029_final.pdf.
30. Uredba (ES) št. 1272/2008 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 16. decembra 2008 o razvrščanju, označevanju in pakiranju snovi ter zmesi, o spremembi in razveljavitvi direktiv 67/548/EGS in 1999/45/ES ter spremembi Uredbe (ES) št. 1907/2006 [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: http://publications.europa.eu/resource/ceilar/a0da21bf-b795-4b30-983b-f146aa15e594.0022.04/DOC_1.

31. Ohura T, Amagai T, Senga Y, Fusaya M. Organic air pollutants inside and outside residences in Shimizu, Japan: levels, sources and risks. *Science of the Total Environment* 2006; 366: 485–99.
32. Jia C, Batterman S, Godwin C. VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods, Part 1: Indoor and outdoor concentrations, variation, and risk drivers. *Atmospheric Environment* 2008; 42: 2083–100.
33. Missia D, Demetriou E, Michael N, Tolis E, Bartzis J. Indoor exposure from building materials: A field study. *Atmospheric Environment* 2010; 44: 4388–95.
34. Ye W, Won D, Zhang X. A Simple VOC Prioritization Method to Determine Ventilation Rate for Indoor Environment Based on Building Materials Emissions. *Procedia Engineering* 2015; 121: 1697–704.
35. McGwin G, Lienert J, Kennedy J. Formaldehyde exposure and asthma in children: a systematic review. *Environmental Health Perspectives* 2010; 118: 313–7.
36. Cakmak S, Dales R, Liu L, Kauri L, Lemieux C, Hebborn C, Zhu J. Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environmental Pollution* 2014; 194: 145–51.
37. Jiang C, Li D, Zhang P, Li J, Wang J, Yu J. Formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions from particleboard: Identification of odorous compounds and effects of heat treatment. *Building and Environment* 2017; 117: 118–26.
38. Guo H. Source apportionment of volatile organic compounds in Hong Kong homes. *Building and Environment* 2011; 46: 2280–6.
39. Salem M, Böhm M. Understanding of Formaldehyde Emissions from Solid Wood: An Overview. *BioResources* 2013; 8(3): 4775–90.
40. Hu H, Zhang Y, Wang X, Little J. An analytical mass transfer model for predicting VOC emissions from multi-layered building materials with convective surfaces on both sides. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2007; 50(11–12): 2069–77.
41. Jensen L, Larsen A, Mølhav L, Hansen M, Knudsen B. Health Evaluation of Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from Wood and Wood-Based Materials. *Archives of Environmental Health* 2001; 56–5.
42. Zhou X, Liu Y, Song C, Wang X, Wang F, Liu J. A novel method to determine the formaldehyde emission characteristic parameters of building materials at multiple temperatures. *Building and Environment* 2019; 149: 436–45.
43. FTALATI: KAJ MORATE VEDETI? [spletna stran na Internetu] Pridobljeno 22. 1. 2021 s spletne strani: <https://www.nijz.si/sites/www.nijz.si/files/uploaded/ftalati.pdf>.
44. Risk Assessment In Relation To Indoor Air Quality, Report No 22 [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: http://www.iaquk.org.uk/ESW/Files/Risk_Assessment_In_Relation_To_Indoor_Air_Quality_Report_No_2.pdf.
45. National Research C. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process. Washington, DC: The National Academies Press; 1983.
46. Navodila za izdelavo ocene tveganja za zdravje ljudi zaradi izpostavljenosti kemijskim in mikrobiološkim dejavnikom iz okolja z izbranimi poglavji in praktičnimi primeri I del, [e-knjiga]. P. Pollak, L. Perharič, 2017, Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: https://www.nijz.si/sites/www.nijz.si/files/publikacije-datoteke/navodila_nijz_za_oceno_tveganja_kem_in_mikrobiol_dejavnikov.pdf.
47. National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport. RIVM Committed to health and sustainability. DustEx tool. [spletna stran na Internetu]. Pridobljeno 10. 11. 2020 s spletne strani: <https://www.rivm.nl/en/consexpo/related-tools/dustex-tool>.
48. El-Harbawi, M. Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environmental Reviews* 2013, 21 (3), 149–79.