

Különböző belterek levegőminőségének jellemzése

Doktori értekezés tézisei

SZABADOS MÁTÉ



**ELTE Természettudományi Kar
Környezettudományi Doktori Iskola
Környezetkémiai Program**

Doktori Iskola vezetője: Dr. Turányi Tamás

Programvezető: Dr. Turányi Tamás

Témavezető: Dr. Szigeti Tamás, levegőhigiénés szakértő

Készült a Nemzeti Népegészségügyi Központban

Budapest, 2023

DOI: 10.15476/ELTE.2023.138

Bevezetés

Napjainkban a légszennyezettség a legjelentősebb környezetegészségügyi probléma, mely évente körülbelül 8000-12000 ember idő előtti halálát okozza Magyarországon. Időnk akár 80-90%-át is belső terekben töltjük, így a megfelelő beltéri levegőminőség biztosítása kiemelt fontosságú egészségünk szempontjából. A beltéri levegőminőség jelenleg nem szabályozott a világ számos táján, így Magyarországon sem, azonban az Egészségügyi Világszervezet (WHO) és néhány európai uniós ország is irányértékeket vagy határértékeket fogalmazott meg számos légszennyező beltéri koncentrációjára. Az egyes beltéri környezetek levegőminősége nagyon változatos lehet, mivel azt számos tényező befolyásolja, például a beltéri szennyező források, a kültéri levegő minősége, a légcseres mértéke, a kémiai reakciók és a légszennyező anyagok eltávolítására alkalmazott technikák.

Az iskolás gyermekek egészségét meghatározó tényezők között a kültéri és otthoni környezet mellett az iskolai környezetnek is rendkívüli jelentősége van, mivel a gyermekek naponta átlagosan 6-8 órát töltenek ott el. A gyermekek a népesség egyik különösen érzékeny csoportját képezik, ezért kiemelt figyelemmel szükséges kísérni az épített belső környezet szervezetre gyakorolt hatásait. Az elmúlt két évtizedben számos nemzeti és nemzetközi projekt fókuszpontjába került az általános iskolák beltéri levegőminőségének vizsgálata, valamint a beltéri légszennyezők gyermekek egészségre gyakorolt hatásának kutatása. A különböző tanulmányok eredményei rámutattak arra, hogy az iskolaépületek beltéri levegőminőségével kapcsolatban továbbra is számos probléma megoldatlan, mivel az osztálytermekben egyes légszennyezők koncentrációja magasabb lehet, mint a kültéri értékek.

A globális energiaválság miatt az épületeink fenntartási költségei folyamatosan emelkednek, és a környezetterhelés okozta károk egyre pusztítóbbá válnak, így az energiahatékony építészeti megoldások, így például a passzívház építés technológiája mind inkább a figyelem középpontjába kerül. Ennek eredményeképp a passzívházak világszerte a mai kor egyik legmeghatározóbb építészeti jelenségeivé váltak. Mint minden új technológiánál, a passzívházak esetén is felvetődik a kérdés, hogy az energiamegtakarításon kívül a beltéri levegőminőség szempontjából kedvezőbbek-e a feltételek a hagyományos építési technológiával épült házakhoz képest. A közegészségügyi szempontból legjelentősebb légszennyezők vizsgálata segítheti a szakembereket olyan megfelelően kialakított épületek tervezésében, melyek megszüntetik ezen szennyező anyagok forrásait.

Célkitűzés

Doktori munkám az általános iskolák és passzív épületek bel- és kültéri levegőminőségének vizsgálatára és az egészségkockázatok meghatározására irányult.

Az InAirQ projekt (*Transnational Adaption Actions for Integrated Indoor Air Quality Management*) keretében a 2017/2018-as fűtési időszakban 5 közép-európai ország (Cseh Köztársaság, Lengyelország, Magyarország, Olaszország, Szlovénia) 64 általános iskolájában vizsgáltuk a bel- és kültéri levegő minőségét a kiválasztott általános iskolák egy-egy osztálytermében és iskolánként egy-egy kültéri mintavételi ponton. A felmérés célja többek között a beltéri levegőminőségi paraméterek vizsgálata, illetve a vizsgált légszennyező anyagok beltéri koncentrációjából eredő nem karcinogén és karcinogén egészségkockázatok meghatározása. A levegőminőségi vizsgálatokkal párhuzamosan egy kérdőív segítségével felmértük az érintett osztálytermekben tanuló gyermekek egészségi állapotát. Így további célként tűztem ki a légszennyezők beltéri koncentrációja és a gyermekek egészségi állapota közötti kapcsolat vizsgálatát.

Az Európai Parlament 2010/31/EU irányelve kimondja, hogy 2021. január 1-jétől az Európai Unióban minden új épületnek tartalmaznia kell energiamegtakarítási intézkedéseket, és „közel nulla energiaigényű épületnek” kell lennie, ezáltal Magyarországon is egyre szigorodnak az új épületekre vonatkozó követelmények, előírások és energetikai jogszabályok. Az ilyen energiahatékony épületekben sajátos gépészeti kialakításuk miatt, a jól záródó nyílászárók következtében, illetve a megfelelő hőszigetelésnek köszönhetően gyakran alacsony a légcseres mértéke, így a beltéri levegőben ennek hatására feldúsulhatnak a beltéri forrással rendelkező légszennyező anyagok, melyek káros hatással bírhatnak az ott tartózkodók egészségére. Ezt felismerve a Nemzeti Népegészségügyi Központ által, 2019 és 2021 között végzett felmérés fókuszában a magyarországi passzívházak levegőminőségének felmérése állt. A felmérés keretében 15 passzív épület levegőminőségének felmérését tűztem ki célul a fűtési és a nem fűtési időszakban. Ezenfelül céлом volt a levegőminőségi paraméterek (fizikai és kémia) szezonális változásainak megfigyelése és a beltéri szennyező anyagok koncentrációjából eredő egészségkockázatok meghatározása. További célként tűztem ki az épületek beltéri levegőminőségével kapcsolatos legfontosabb problémák feltárását is.

I. Általános iskolák bel- és kültéri levegőminőségének jellemzése

Az iskolaépületek kiválasztása előre meghatározott szempontok alapján történt. Elsődleges szempont volt, hogy a kiválasztott épületek jellemezzék az adott ország iskolaépületeit, azaz a kiválasztás során figyelembe vettük az alkalmazott építési technológiát, az épületek korát, a szellőztetés típusát és az iskolaépületek elhelyezkedését. Az osztálytermek kiválasztása szintén előre meghatározott szempontrendszer alapján történt. Minden iskolaépületben egy tanteremet vizsgáltunk, mely a legjobban reprezentálta az épületben található legtöbb osztálytermet. Összesen 64 általános iskola épületének egy-egy osztálytermét vizsgáltuk a Cseh Köztársaságban (n = 12), Magyarországon (n = 16), Olaszországban (n = 12), Lengyelországban (n = 12) és Szlovéniában (n = 12). A bel- és kültéri levegőminőség vizsgálatára irányuló mintavételeket a 2017/2018-as fűtési időszakban (2017. november 6-tól 2018. április 6-ig) 5 egymást követő tanítási napon végeztük épületenként. A kitettség pontosabb becslése érdekében a mintavétel és a helyszíni mérések kiértékelése egy 6 - 8 órás időintervallumra vonatkozott, azaz a mintavételt és a mérési adatok kiértékelését a tanítási nap hosszához igazítottuk. A felmérés során olyan légszennyezők kerültek meghatározásra, melyek a korábbi, nemzetközi vizsgálatokban is szerepeltek. Meghatároztuk 10 illékony szerves vegyület (benzol, toluol, etilbenzol, xilolok, triklór-etilén, tetraklóretilén, α -pinén, d -limonén, 2-etil-hexanol, sztirol), 5 aldehid (formaldehid, acetaldehid, propionaldehid, benzaldehid, hexaldehid), PM_{2.5} méretfrakció, szén-dioxid és a radon koncentrációját, valamint néhány fizikai paraméter (hőmérséklet, relatív páratartalom) alakulását is nyomon követtük. A levegőminőségi vizsgálatokkal párhuzamosan egy, a szülők vagy gondviselők által kitöltött kérdőív segítségével felmértük az érintett osztályterekben tanuló gyermekek egészségi állapotát (pl. allergia, orvos által diagnosztizált asztma és tünetei, a felmérést megelőző három hónapban tapasztalt légzőszervi, bőr-, szem- és általános tünetek).

A mintavételi eszközöket az ISO 16000-1:2004 szabványnak megfelelően a padlótól körülbelül 0,8 - 1 m magasságban telepítettük, mely megfelel az ülő gyermekek légzési zónájának. Amikor arra lehetőség volt, az eszközöket az osztályterem közepén, de minden esetben a faltól vagy ablaktól egy méter távolságban helyeztük el. A beltéri vizsgálattal párhuzamosan minden épületnél kültéren is méréseket végeztünk azonos mérőműszerekkel és mintavételi eszközökkel. A kültéri mintavételi pont kiválasztásánál figyelembe vettük, hogy a mintavételi eszközök a vizsgált tanteremmel azonos magasságban legyenek elhelyezve. Azokban az iskolákban, melyek mechanikus

Alkalmazott módszerek

szellőztetőrendszerrel voltak ellátva, a mintavételi pontot a szellőzőrendszer légbeömlőjénél jelöltük ki.

Az illékony szerves vegyületek és aldehidek mintavételezésére passzív mintavételi technikát alkalmaztunk. A mintavételi idő a teljes hét folyamán 30 és 40 óra között volt, az osztályterem foglaltságától függően. Az illékony szerves vegyületek megkötésére adszorpciós mintavevő csöveket (Radiello®) használtunk. A komponensek meghatározását az ISO 16017-2:2003 szabvány szerint TD-GC-MS/MS rendszerrel SIM módban végeztük. Aldehidek mintavételezésére 2,4-dinitrofenilhidrazinnal bevont szilikagélt alkalmaztunk (Radiello®). Az aldehideket HPLC-DAD rendszerrel, 360 nm hullámhosszon vizsgáltuk az ISO 16000-4:2011 szabványnak megfelelően. A kisméretű aeroszol részecskék (PM_{2.5}) mintavétele alacsony térfogatáramú (10 l/perc) mintavevőkkel történt. A mintavétel során a megmintázandó levegőt egy kvarcszálás szűrőt (Ø 37 vagy 47 mm, Pallflex® Tissuquartz) tartalmazó mintavevő egységen áramoltattuk keresztül. A mintavételt követően a szűrők tömegének meghatározása gravimetriásan történt. A radon mérésére egy CR-39 típusú passzív nyomdetektort (RSKS type) helyeztünk ki 3 hónapos időszakra, majd az ISO 11665-4:2012 szabványnak megfelelően történt a begyűjtött detektorok elemzése. A hőmérsékletet, a relatív páratartalom és a szén-dioxid méréseket különböző, kalibrált műszerekkel végeztük.

A mintavételt követően a partnerországok a mintavevő eszközöket (Radiello mintavevők, kvarcszálás szűrő, CR-39 nyomdetektor) hűtött csomagolásban küldték a Nemzeti Népegészségügyi Központba. Az összes laboratóriumi vizsgálatot a Nemzeti Népegészségügyi Központban végeztük el, mely a projektben a központi laboratórium szerepét töltötte be.

II. Passzív épületek bel- és kültéri levegőminőségének jellemzése

A bel- és kültéri levegőminőség vizsgálatára irányuló mintavételeket és helyszíni méréseket a 2019 és 2021 közötti fűtési és nem fűtési időszakban, 7 egymást követő napon végeztem épületenként és szezononként. Összesen 15 passzív épület felmérésére került sor Magyarországon. A vizsgált légszennyezők közé tartoztak illékony szerves vegyületek (benzol, toluol, etilbenzol, xilolok, sztirol, triklór-etilén, tetraklóretilén, α -pinén, *d*-limonén, 2-etil-hexanol), aldehidek (formaldehid, acetaldehid, propionaldehid, benzaldehid, hexaldehid), PM_{2.5}, ózon, nitrogén-dioxid és szén-dioxid. A felmérés ideje alatt néhány, a komfortérzetet befolyásoló fizikai paraméter (hőmérséklet, relatív páratartalom, légsebesség) alakulását is nyomon követtem. A levegőminőséget meghatározó

Alkalmazott módszerek

paraméterek mérésén kívül felmértem a passzív épületek és a mintavételezett helyiségek tulajdonságait (pl.: épület elhelyezkedése, padlóburkolat típusa, épület kora, stb.) ellenőrzőlisták segítségével.

A mintavételi eszközöket az ISO 16000-1:2004 szabványnak megfelelően a padlótól körülbelül 1-1,5 m magasságban telepítettem. Amikor arra lehetőség volt, az eszközöket a helyiség közepén, de minden esetben a faltól vagy ablaktól egy méter távolságban helyeztem el. Továbbá ügyeltem arra, hogy az eszközök kellő távolságra legyenek a mechanikus szellőzőrendszer légbeömlőjétől és elszívójától. A beltéri vizsgálattal párhuzamosan minden épületnél kültéri mintavételt és méréseket is végeztem azonos mintavételi eszközökkel és mérőműszerekkel. A kültéri mintavételi pont kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy az eszközök a mechanikus szellőzőrendszer légbeszívó egység közelében legyenek elhelyezve.

Az illékony szerves vegyületek és aldehidek mintavételezésére passzív mintavételi technikát alkalmaztam. A mintavétel 7 teljes napon keresztül tartott, aminek eredményeképpen a mintavételi idő a teljes hét folyamán körülbelül 168 óra volt. Az illékony szerves vegyületek megkötésére adszorpciós mintavevő csöveket (Radiello®) használtam. A komponensek meghatározását az ISO 16200-2:2000 szabvány szerint GC-FID rendszerrel végeztem. Aldehidek mintavételezésére 2,4-dinitrofenilhidrazinnal bevont szilikagélt alkalmaztam (Radiello®) és a mintákat HPLC-DAD rendszerrel vizsgáltam az ISO 16000-4:2011 szabványnak megfelelően. A PM_{2.5} mintavétele alacsony térfogatáramú mintavevőkkel történt. A mintavétel során a megmintázandó levegőt egy alacsony térfogatáramú (10 l/perc) pumpa segítségével, egy kvarcszálalás szűrőt (Ø 37 mm, Pallflex® Tissuquartz) tartalmazó mintavevő egységen áramoltattam keresztül. A mintavételt követően a szűrők tömegének meghatározása gravimetriásan történt. Az ózon, nitrogén-dioxid, hőmérséklet, relatív páratartalom és szén-dioxid méréseket beltéren és kültéren, valamint a légsebesség meghatározását, egyaránt különböző, kalibrált műszerekkel végeztem.

III. Statisztikai adatfeldolgozás mindkét tanulmány esetén

Az adatok statisztikai elemzését az IBM által kínált SPSS (IBM SPSS 24.0 szoftver; IBM Corporation, Armonk, NY, USA) és a STATISTICA szoftvercsomagokkal (STATISTICA 7.1 szoftver; Statsoft, Inc.) végeztem. Az adatok eloszlásának vizsgálatát Shapiro-Wilk teszt alapján végeztem, mely meghatározta az alkalmazott statisztikai módszer típusát. Minden esetben a 0,05 alatti p-értéket tekintettem statisztikailag szignifikánsnak.

Alkalmazott módszerek

Az InAirQ projekt esetén, annak eldöntésére, hogy egy adott országhoz tartozó levegőminőségi paraméterek átlagai vagy mediánjai között szignifikáns eltérés mutatkozik-e, paraméteres (ANOVA és kétmintás t-próba) vagy nem paraméteres (Kruskal-Wallis és Mann-Whitney-U statisztikai próbát) statisztikai próbát alkalmaztam. A mért légszennyező anyagok beltéri és kültéri koncentrációja közötti kapcsolat vizsgálatára Spearman-féle rangkorrelációt alkalmaztam.

A vizsgált osztálytermek beltéri levegőminőségének egészségre gyakorolt hatását mennyiségi kockázatbecsléssel számszerűsítettem. A dolgozat keretében értékeltem a vizsgált légszennyező anyagok nem karcinogén (kockázati hányados, kockázati mutató, maximum kumulatív arány) és karcinogén kockázatát (élettartamra vonatkozó többlet daganatkockázat (ELCR)) az osztályteremben történő tartózkodási időre vonatkoztatva. A nem karcinogén kockázat egy alkotó esetén a kockázati hányadossal (HQ) jellemezhető, több hasonló természetű toxikus anyag esetén a HQ értékek összeadhatók, melyet kockázati mutatónak (HI) hívunk. Ha a számított HQ és HI értékek nagyobb, mint 1, akkor az egészségre gyakorolt káros hatás nem elhanyagolható. Azonban a HI nem ad információt arról, hogy az egészségkockázatot az egyidejűleg jelenlévő légszennyező anyagok közül egy vagy több anyag hajtja-e, így a maximum kumulatív arány is kiszámításra került. A karcinogén kockázat esetén számolt ELCR értékei, akkor tekinthetők elfogadhatónak, ha az értékek nem haladják meg az Amerikai Környezetvédelmi Hivatal (US EPA) által javasolt, társadalmilag elfogadható kockázatot (1×10^{-6}). Azonban ELCR értékek kiszámítása a gyermekek iskolában töltött időjükre (8 év \times 180 nap \times 8 óra) vonatkozott, így az eredmények összehasonlítása az elfogadható kockázat értékével félrevezető lehet, mivel az iskolán kívüli tartózkodásra (pl.: otthon, kültér) vonatkozó kitettséget nem vettem figyelembe az értékelésnél. Ennek okán definiáltam egy időarányos elfogadható kockázati értéket ($1,88 \times 10^{-8}$), ami az iskolában töltött időszakra vonatkozó értékekből származik.

A szülők által kitöltött kérdőív alapján khi négyzet próbával vizsgáltam az iskolás gyermekek egészségi állapotában jelentkező különbségeket és hasonlóságokat a felmérésben résztvevő országok között. Továbbá, többváltozós logisztikus regressziós modellekkel vizsgáltam a beltéri légszennyezők koncentrációja és az elmúlt három hónapban tapasztalt tünetek gyakorisága közötti összefüggéseket.

Passzív épületek esetén, annak megállapítására, hogy a fűtési és a nem fűtési időszakok alatt vizsgált levegőminőségi paraméterek mediánjai között szignifikáns eltérés mutatkozik-e, páros Wilcoxon statisztikai próbát alkalmaztam.

Eredmények, a doktori értekezés tézisei

I. Általános iskolák bel- és kültéri levegőminőségének jellemzése [1, 2]

T1. Meghatároztam a mintavételi időszak alatt 5 közép-európai ország 64 általános iskolájának egy-egy osztálytermében és kültéren az illékony szerves vegyületek (n=10), az aldehidek (n=5), a PM_{2.5}, a szén-dioxid és a radon koncentrációját, valamint a komfort paraméterek alakulását. Jelentős eltéréseket tapasztaltam számos légszennyező esetén a felmérésben résztvevő országok között. Az eredmények alapján elmondható, hogy a legtöbb vizsgált illékony szerves vegyület beltéri koncentrációja jelentősen magasabb volt az olaszországi általános iskolákban, mint más országok iskolaépületeiben. Továbbá, szignifikánsan magasabb PM_{2.5} tömegkoncentráció (medián: 46 µg/m³) jellemezte a magyarországi iskolaépületeket, míg a radon koncentrációja a szlovén iskolákban ért el jelentősen magasabb értékeket (medián: 145 Bq/m³). A vizsgált osztálytermekben a szén-dioxid koncentrációja több esetben (n=52) is magas volt (az átlag meghaladta a 1000 ppm értéket), jelezve az elégtelen szellőztetést. Jelentős eltérések mutatkoztak a komfort paraméterek (hőmérséklet, relatív páratartalom) alakulásában is az egyes országok között. A legmagasabb hőmérséklet értékeket a Cseh Köztársaságban (átlag: 23,7°C), míg a legalacsonyabbakat Lengyelországban (átlag: 21,4°C) mértük. Eredményeink alapján megállapítható, hogy az osztálytermekben mért átlagos hőmérsékleti értékek 44%-a (n = 28) a javasolt tartományon (20-23°C) kívül estek és elsősorban a túlmelegedés (38%) okozott problémát. A legmagasabb relatív páratartalom értékeket Szlovéniában (átlag: 39,9%), míg a legalacsonyabbakat Olaszországban (átlag: 30%) mértük. Az átlagos relatív páratartalom értékek az iskolaépületek 80%-ában az ajánlott tartomány (40% – 60%) alatt voltak, míg a felső határértéket egyetlen esetben sem haladta meg. A projekt eredményeit összehasonlítottam az általános iskolák beltéri levegőminőségének felmérésére irányuló, az elmúlt két évtizedben végzett nemzetközi tanulmányok eredményeivel és megállapítottam, hogy Közép-Európában, az elmúlt két évtizedben vizsgált épületekben a beltéri levegőminőséggel kapcsolatos problémák gyakoriak és hasonlóak voltak, mely a korábbi projekteken megfogalmazott intézkedések megvalósításának hiányára utal.

T2. A bel- és kültéri koncentrációk arányának mediánja az illékony szerves vegyületek esetén 0,93 (benzol) és 23,2 (limonén), míg az aldehidek esetén 1,62 (propionaldehid) és 7,86 (acetaldehid) között változott. Az eredmények alapján meghatároztam, hogy számos illékony szerves vegyület és aldehid jelentős beltéri forrással rendelkezik és az alacsony légcseré (medián: 1,49 1/h) következtében dúsulnak fel a beltéri környezetben. A bel- és kültéri PM_{2.5} tömegkoncentrációk

Eredmények, a doktori értekezés tézisei

arányának mediánja 0,76 és 1,34 között változott az öt közép-európai országban, mely azt jelzi, hogy a beltéri források kisebb mértékben járulnak hozzá a PM_{2,5} tömegkoncentrációhoz, és megerősítik azt a tényt, hogy a finom részecskék nagyrészt kültéri eredetűek.

T3. Számszerűsítettem a vizsgált légszennyezők által okozott nem karcinogén és karcinogén egészségkockázatot. A HQ értékei egy kivétellel (2-etilhexanol) az 1-es küszöbérték alatt voltak, azaz sem a vizsgált illékony szerves vegyületek, sem az aldehidek nem jelentettek külön-külön jelentős nem karcinogén egészségkockázatot. A HQ értékekkel szemben az iskolaépületek 31%-át (n = 20) 1-nél magasabb HI értékek jellemezték, vagyis a beltéri légszennyező anyagoknak való együttes kitétség egyes esetekben jelentős nem karcinogén egészségkockázatot jelenthet. A maximum kumulatív arány értékek széles skálán, 1,7 és 6,9 között mozogtak. Az értékek többsége a II. (n = 44; 68,8%) vagy a III.B (n = 18; 28,1%) csoportba tartozott, ami azt mutatja, hogy a vizsgált illékony szerves vegyületek és aldehidek nem karcinogén kombinált egészségkockázata vagy alacsony volt, vagy a nem elhanyagolható egészségkockázatért az egyidejűleg jelenlévő komponensek a felelősek. A PM_{2,5} tömegkoncentráció az iskolák 81%-ában meghaladta a WHO által 2021-ben megállapított 24 órás irányértéket (15 µg/m³), illetve az iskolák 95%-ában az éves (5 µg/m³) irányértéket meghaladó értékeket mértünk. Az élettartamra vonatkozó többlet daganatkockázat medián értékei a radon és a formaldehid esetében meghaladták a US EPA által javasolt, társadalmilag elfogadható kockázatot (1×10⁻⁶). Továbbá az acetaldehid és a benzol esetében az élettartamra vonatkozó többlet daganatkockázat értékek az iskolaépületek 100%-ában, míg az etilbenzol esetén az épületek 79%-ban haladták meg az általam definiált, időarányos elfogadható kockázati értéket (1,88×10⁻⁸).

T4. A szülők által kitöltött, összesen 1084 db kérdőív segítségével felmértük az érintett osztálytermekben tanuló gyermekek egészségi állapotát, beleértve az allergiát, orvos által diagnosztizált asztmát és tüneteit, a felmérést megelőző három hónapban tapasztalt légzőszervi, bőr-, szem- és általános tüneteket. A gyermekek egészségi állapotában jelentős területi eltéréseket azonosítottam. Az orvos által diagnosztizált asztma prevalenciája és az asztmaszerű tünetek előfordulása a szlovén, míg az akut légzőszervi, bőr- és általános tünetek (fejfájás, megfázás érzése és fáradékonyság) gyakorisága a lengyel gyermekek körében volt a legmagasabb.

Eredmények, a doktori értekezés tézisei

T5. Logisztikus regressziós modellekkel vizsgáltam a beltéri légszennyezők koncentrációja és az elmúlt három hónapban tapasztalt tünetek gyakorisága közötti összefüggéseket. A statisztikai elemzés alapján a légzőszervi tünetek előfordulásának gyakorisága elsősorban az aldehidek, a kisméretű aeroszol részecskék és a szén-dioxid koncentrációjával, továbbá a kockázati hányadosok összegével mutatott szignifikáns összefüggést. A bőrtünetek gyakorisága magasabb volt azon gyermekek körében, ahol az osztálytermekben magasabb volt az aromás szénhidrogének koncentrációja. Elemzésem alapján az általános tünetek (fejfájás és fáradtság érzése) a levegő elhasználtságát jelző indexszel és a hexaldehiddel mutattak szignifikáns összefüggést. A korábbi tanulmányok jelentősen hozzájárultak a beltéri levegőminőségi paraméterek és a gyermekek egészségi állapota közötti összefüggések megértéséhez, azonban továbbra is fennálltak ellentmondások és hiányosságok ezen a területen. Jelen kutatás eredményei megerősítik és kiegészítik a korábbi ismereteket.

II. Passzív épületek beltéri levegőminőségének jellemzése [3]

T6. Meghatároztam a mintavételi időszak alatt 15 passzív épület egy-egy helyiségében és kültéren az illékony szerves vegyületek ($n=10$), az aldehidek ($n=5$), az ózon, a nitrogén-dioxid, a $PM_{2.5}$ és a szén-dioxid koncentrációját, valamint néhány fizikai paraméter alakulását. A benzol, a $PM_{2.5}$, az ózon és a nitrogén-dioxid kültéri koncentrációja majdnem minden esetben meghaladta a beltéri értéket, így kijelenthető, hogy ezen szennyezőanyagok főként kültéri eredetűek. Ezzel szemben, a többi vizsgált illékony szerves vegyület és aldehid a beltéri környezetben mutattak magasabb koncentrációt. Jelentős eltéréseket tapasztaltam valamennyi fizikai paraméter (hőmérséklet, relatív páratartalom, légcsereszám) értékeiben, valamint egyes illékony szerves vegyületek (benzol, α -pinén, d -limonén) és az acetaldehid beltéri koncentrációjában a fűtési és a nem fűtési időszak összehasonlítása során. A fizikai paraméterek értékei a nem fűtési időszakban voltak magasabbak, míg a kémiai légszennyezők koncentrációi a fűtési időszakban emelkedtek jelentősen. Az átlagos hőmérséklet értékek a fűtési időszakban $22,2 - 25,8^{\circ}C$, a nem fűtési időszakban $23,2 - 28,2^{\circ}C$ közötti tartományban, míg az átlagos relatív páratartalom értékek a fűtési szezonban $30,0 - 53,8\%$, a nem fűtési szezonban $32,4 - 61,0\%$ közötti tartományban mozogtak. A fűtési szezonban a légcsereszám mediánja $0,47$ 1/h-nak, míg a nem fűtési szezonban $0,52$ 1/h-nak adódott. A beltéri környezetben a legmagasabb koncentrációban a limonén volt jelen mindkét időszakban,

Eredmények, a doktori értekezés tézisei

mediánértéke a fűtési szezonban $48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -nek, míg a nem fűtési szezonban $11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -nek adódott. Az α -pinén koncentrációja szintén magas volt, medián értékei a fűtési szezonban $16,2$, illetve a nem fűtési időszakban $10,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voltak. A szezonális különbség mindkét terpén esetében jelentős volt. A benzol beltéri koncentrációjának mediánja a fűtési időszakban ($1,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) szignifikánsan magasabb volt a nem fűtési időszakhoz képest ($0,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A vizsgált aldehidek közül csak az acetaldehid mutatott szignifikáns szezonális eltérést, ami a fűtési időszakban volt jelen magasabb koncentrációban ($17,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ és $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Az eredmények alapján megállapítható, hogy a lakókat jelentősebb kitétség érheti egyes légszennyező anyagok esetén a fűtési időszakban.

T7. A légszennyező anyagok nem karcinogén egészséghatásainak értékelése során a mért koncentrációkat összehasonlítottam a levegőminőségi irányértékekkel, küszöbértékekkel vagy nemzeti cél-/határértékekkel. A $\text{PM}_{2.5}$ és a nitrogén-dioxid heti átlagkoncentrációja a vizsgált passzív épületekben minden esetben meghaladta a WHO által 2021-ben megállapított éves irányértéket ($\text{PM}_{2.5}$ esetén az $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, NO_2 esetén a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t), míg más légszennyező anyag (pl. triklór-etilén, α -pinén, propionaldehid és benzaldehid) esetén a mért értékek csak néhány esetben haladták meg a nagyobb nemzetközi szervezetek által javasolt krónikus referencia értékeket.

T8. Tudomásom szerint ez az első tanulmány, amely a levegőminőségi paraméterek széles körét vizsgálta olyan magyarországi passzívházakban, amelyeket életvitelszerűen használnak, illetve a nemzetközi szakirodalomban is kevés olyan tanulmány érhető el, melyben részletes levegőminőségi méréseket végeztek. A felmérés eredményei alapján a mechanikus szellőztetőrendszerrel kapcsolatos gyakori problémaként azonosítottuk a nyári hónapokban tapasztalható túlmelegedést, az alacsony légcsereszámot és relatív páratartalmat, valamint a megfelelő részecskeszűrők hiányát. Az építőanyagok és bútorok általi illékony szerves vegyületek és aldehidek kibocsátása és az építési munkálatok közelsége szintén befolyásolhatja a beltéri levegőminőséget. Ezek alapján a légcseré mértékének növelése, a légtechnikai egységek rendszeres karbantartása, illetve a légszennyező források csökkentése szükséges a passzív épületek beltéri levegőminőségének javítását illetően.

A doktori értekezés alapjául szolgáló közlemények

Nemzetközi folyóiratokban megjelent közlemények:

1. **Szabados, M.**, Csákó, Z., Kotlík, B., Kazmarová, H., Kozajda, A., Jutraz, A., Kukec, A., Otorespec, P., Dongiovanni, A., Di Maggio, A., Fraire, S., Szigeti, T. (2021). Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe – The InAirQ study. *Indoor Air*, 31(4), 989–1003.
<https://doi.org/10.1111/ina.12802>
IF = 6.554 (D2) (2021)
2. **Szabados, M.**, Kakucs, R., Páldy, A., Kotlík, B., Kazmarová, H., Dongiovanni, A., Di Maggio, A., Kozajda, A., Jutraz, A., Kukec, A., Otorespec, P., Szigeti, T. (2022). Association of parent-reported health symptoms with indoor air quality in primary school buildings – The InAirQ study, *Building and Environment*, 221, 109339.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109339>
IF: 7,093 (D2) (2021)
3. **Szabados, M.**, Magyar, D., Tischner, Zs., Szigeti, T. (2023). Indoor air quality in Hungarian Passive Houses, *Atmospheric Environment*, 307, 119857.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119857>
IF: 5,755 (Q1) (2023)

Hazai folyóiratban megjelent közlemény:

1. **Szabados, M.**, Csákó, Z., Kotlík, B., Kazmarová, H., Kozajda, A., Jutraz, A., Kukec, A., Otorespec, P., Dongiovanni, A., Di Maggio, A., Fraire, S., Szigeti, T. (2021). Általános iskolák beltéri levegőminősége Közép-Európában - Az InAirQ projekt. *Egészségtudomány*, 65(2): 51-71.
<https://doi.org/10.29179/EgTud.2021.2.51-71>

Egyéb közlemény

1. Lange, R., Vogel, N., Schmidt, P., Gerofke, A., Luijten, M., Bil, W., Santonen, T., Schoeters, G., Gilles, L., Sakhi, A. K., Line, S. H., Jensen, T. K., Frederiksen, H., Holger, M. K., Szigeti, T., **Szabados, M.**, Tratnik, J. S., Mazej, D., Gabriel, C., Sarigiannis, D., Dzhezheia, V., Karakitsios, S., Rambaud, L., Riou, M., Koppen, G., Covaci, A., Zvonař, M., Piler, P., Klánová, J., Fábelová, L., Richterová, D., Kosjek, T., Runkel, A., Pedraza-Díaz, S., Verheyen, V., Bastiaensen, M., Esteban-López, M., Castaño, A., & Kolossa-Gehring, M. (2022). Cumulative risk assessment of five phthalates in European children and adolescents. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 246, 114052.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.114052>
IF: 7,401 (2021)

Előadások

- 1. Beltéri levegőminőség általános iskolákban – Az InAirQ projekt**
Szabados Máté, Csákó Zsófia, Balogh Boglárka Sára, Középesy Szilvia, Magyar Donát, Rudnai Péter, Páldy Anna, Szigeti Tamás
Népegészségügyi Képző- és Kutatóhelyek Országos Egyesületének XII. Konferenciája
2018. augusztus 29-31., Budapest
- 2. Nemzetközi együttműködés általános iskolák beltéri levegőminőségének javítására - Az InAirQ projekt**
Szabados Máté, Csákó Zsófia, Balogh Boglárka Sára, Szigeti Tamás
Magyar Higiénikusok Társasága XLV. Vándorgyűlése
2018. október 8-10., Budapest
- 3. Health risk of indoor air pollutants in primary school buildings in Central Europe**
Máté Szabados, Bohumil Kotlik, Helena Kazmarová, Anna Kozajda, Anja Jutraz, Andreja Kukec, Peter Otorepec, Arianna Dongiovanni, Andrea Di Maggio, Tamás Szigeti
Joint meeting of the International Society Of Exposure Science and the International Society Of Indoor Air Quality And Climate
2019. augusztus 18-22., Kaunas, Litvánia
- 4. A beltéri levegőminőség javításának lehetőségei általános iskolákban – Az InAirQ projekt**
Szabados Máté, Szigeti Tamás
Magyar Higiénikusok Társaságának LXVI. Vándorgyűlése
2019. október 1-3., Sarlópuszta
- 5. A lakosság allergiás érintettségének felmérése**
Szigeti Tamás, Páldy Anna, Szabados Máté, Málnási Tibor
Magyar Higiénikusok Társaságának XI. Nemzeti Kongresszusa
2021. szeptember 28-29., Budapest
- 6. Lágýtőszerek biomarkerei általános iskolás gyermekek vizeletében**
Szigeti Tamás, Szabados Máté, Kakucs Réka, Középesy Szilvia, Csákó Zsófia
Magyar Higiénikusok Társaságának XI. Nemzeti Kongresszusa
2021. szeptember 28-29., Budapest
- 7. Általános iskolák beltéri levegőminősége és a gyermekek egészségi állapota közötti kapcsolat – Az InAirQ projekt**
Szabados Máté, Kakucs Réka, Páldy Anna, Szigeti Tamás
XIV. Fiatal Higiénikusok Fóruma
2022. május 13., Budapest

Konferencia részvételek

8. **Közép-európai általános iskolák beltéri levegőminősége és a gyermekek akut tünetei közötti kapcsolat - Az InAirQ projekt**

Szabados Máté, Kakucs Réka, Páldy Anna, Szigeti Tamás
Magyar Higiénikusok Társaságának LXVII. Vándorgyűlése
2022. szeptember 12-13., Balatonakarattya

Poszter

1. **Indoor air quality in primary school buildings across Central Europe – The InAirQ study**

Máté Szabados, Zsófia Csákó, Anna Kozajda, Andreja Kukec, Anja Jutraz, Peter Otorepec, Bohumil Kotlik, Helena Kazmarová, Arianna Dongiovanni, Andrea Di Maggio, Péter Rudnai, Tamás Szigeti
Indoor Air Toxicology - International Conference on Risk Assessment of Indoor Air Chemicals
2018. szeptember 16-18., Berlin

2. **Illékony szerves vegyületek és aldehidek meghatározása általános iskolákban – Az InAirQ projekt**

Szabados Máté, Csákó Zsófia, Balogh Boglárka Sára, Szigeti Tamás
Elvlasztástudományi Vándorgyűlés
2018. november 8-10., Tapolca

3. **Evaluating the health risk of indoor air pollutants in Central European primary schools**

Máté Szabados, Bohumil Kotlik, Helena Kazmarová, Anna Kozajda, Anja Jutraz, Andreja Kukec, Peter Otorepec, Arianna Dongiovanni, Andrea Di Maggio, Tamás Szigeti
International Conference on Integrated Problem-Solving Approaches to Ensure Schoolchildren's Health
2019. május 23-24., Budapest

4. **Attempt for indoor air quality improvement in a primary school by an air cleaner**

Máté Szabados, Zsófia Csákó, Tamás Szigeti
International Conference on Integrated Problem-Solving Approaches to Ensure Schoolchildren's Health
2019. május 23-24., Budapest

5. **Levoglükózán a vizeletben: a fatüzelés egy lehetséges biomarkerének nyomában**

Csákó Zsófia, Nyiri Zoltán, Szabados Máté, Erdélyi Norbert, Balogh Boglárka Sára, Kakucs Réka, Szigeti Tamás
Magyar Higiénikusok Társaságának XI. Nemzeti Kongresszusa
2021. szeptember 28-29., Budapest

6. **Passzív épületek levegőminősége**

Szabados Máté, Magyar Donát, Szigeti Tamás
Magyar Higiénikusok Társaságának XI. Nemzeti Kongresszusa
2021. szeptember 28-29., Budapest