

A tűzijáték árnyai és fényei

Különböző ünnepek alkalmával a világ számos helyén tartanak tűzijátékot. Ezek változó arányokban tartalmaznak és jelenítenek meg spiritualitást, kulturális vagy történelmi hagyományokat, ünnepelést és szórakozást. A legnagyobb események közé tartoznak a díváli (hindu vallási) fényünnep, a kínai holdujév és a Julianus-ujév látványos eseményei, illetve az Egyesült Államok függetlenség napjához és a francia forradalom évfordulójához kapcsolódó rendezvények. Magyarország legjelentősebb, szervezett tűzijátékát Budapesten tartják a Szent István-napi ünnepi eseménysorozat részeként, amellyel a magyar állam megalapítására emlékezünk I. István király 1083. augusztus 20-i szentté avatásának napján. Az első ilyen budapesti tűzijátékról az 1829. évből van feljegyzés, amely több, tartós szünet után az 1920-as évek végén folytatódott, majd többször és hosszabb időre ismét megszakadt, míg végül 1966-tól az állami/nemzeti ünnep fő látványosságává vált.

A tűzijáték szépsége és fényes oldala közismert. Egészségi és környezeti hatásai ez idáig kevesebb figyelmet kaptak. Pedig az esemény kiegyensúlyozott megítéléséhez a hagyományok megtartása és a szórakozás igénye mellett a kockázati tényezőket is célszerű megismerni. Írásunkkal ehhez kívánunk hozzájárulni a légkörkémia szempontjából: kísérleti úton mért adatok természettudományos módszerekkel alapuló kiértékelésével és értelmezésével.

A látvány és termékei

A tűzijátékot létrehozó pirotechnikai lövedéket egy rakéta emeli magasan a levegőbe. A rakéta-hajtóanyagot (például elemi C-, S-, P-, Mg-, Al-, Fe-port) és oxidálószer (főleg K-nitrát- és -perklorátsókat) tartalmaz összekeverve [1]. A lövedék belső egységekből épül fel, melyekben az említett anyagokon kívül különböző fémcsók is találhatóak. A lövedék a levegőben felrobban, ami erős hangot kelt, illetve a fémcsók

termikus gerjesztésével színes és látványos fényjelenségeket hoz létre. A lítium rózsaszínű, a nátrium sárga, a kalcium narancsszínű, a réz kék, a stroncium piros, míg a bárium zöld lángnyelveket eredményez. További és összetettebb hatások kialakítása is lehetséges.

A tűzijáték légszennyező gázokat (például kén-dioxidot, nitrogén-oxidokat, szerves természetű anyagokat) és füstöt termel. A füstben – amit szakmai nyelven aeroszolnak nevezünk – találhatóak meg a színező fémek, közöttük többféle átmeneti- és nehézfém, ezért fokozottan veszélyes. A későbbiekben erre összpontosítunk. A füst szabad szemmel is jól látható, és gyakran csóvaként terjed a légmozgással. Különösen markáns a tűzijáték elhalványuló fényének megvilágításában (lásd a címlapot). A füst jelentősen csökkenti a látótávolságot és a színek telítettségét. Ez a fő oka annak, hogy az esemény során többször is rövid szünetet tartanak a szervezők, ami alatt a füst felhígul vagy részben tovaszáll.

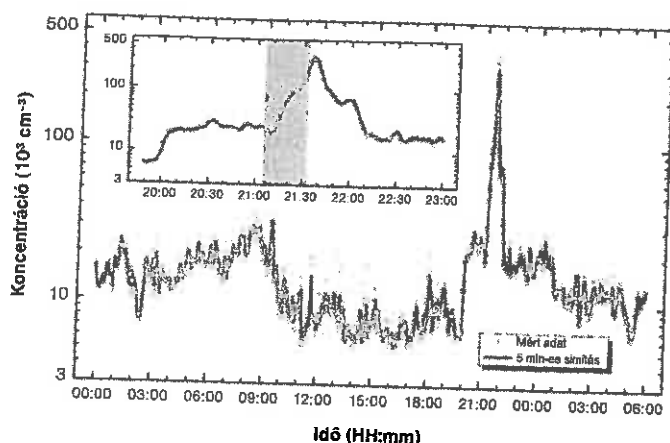
A tűzijátékot és hatásait a keletkezett aeroszol-részecskék koncentrációjával jellemezhetjük. Ezt megadhatjuk a részecskék tömegével (ami a levegőminőségi szabályozás alapja) vagy a részecskék számával. Az utóbbi mennyiség időben jól követhető források és a nyelők változásait, valamint az aeroszol-rendszer belső átalakulási folyamatait, illetve gyorsan és pontosan mérhető, ezért előnyös a légköri rendszer dinamikájának a vizsgálatára. Mi is ezt a mennyiséget használtuk fel a kutatásban.

Laboratórium falak nélkül

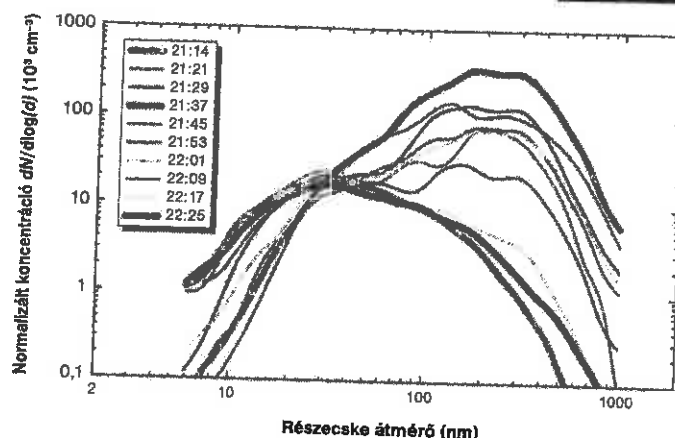
Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézetében a Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART) Laboratóriumában (<https://salma.elte.hu/BpART>) évtizedek óta kutatjuk a városi levegőkörnyezet kémiai, fizikai, meteorológiai és biológiai folyamatait nemzetközi együttműködések keretében a tudományos megismerés és megértés céljából (1. ábra). A

1. ábra. Az ELTE Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART) Laboratórium a Duna partján





2. ábra. Az aeroszol-részecskék számának koncentrációja 2021. augusztus 20-án és 21-én a Duna-parton 1 perces időfelbontással. Az ábrába illesztett, kisebb panel a koncentráció idősorát mutatja részletesebben. Sárga sávval a tűzijáték aktív szakaszát jelöltük



3. ábra. Az aeroszol-részecskék méreteloszlásának időszora 2021. augusztus 20-án 21:14 és 22:25 óra között. A tűzijáték hatása előtt közvetlenül (21:14), a koncentráció maximumának időpontjában (21:37) és a hatás lecsengése után (22:25) mért méreteloszlásokat vastagabb vonallal jeleltük. Az időpontok a 8 perces mérési ciklus végére vonatkoznak

Duna partján, a Petőfi híd budai hídfőjének közelében található mérőállomáson csúcsmínőségű rendszerekkel, például mozgékonyági részecskeméret-spektrométerrel, kondenzációs részecskeszámlálóval és meteorológiai műszerekkel végzünk folyamatos méréseket [2]. A kutatási adatok lehetővé teszik, hogy a levegőminőséggel kapcsolatos ismerteket is megszerezzük.

Ebben az írásban Budapesten 2014 és 2022 között rendezett Szent István-napi tűzijáték hatásaival foglalkozunk egy most megjelent, szakmai cikkünk alapján [3]. A 2016., 2017., 2021. és 2022. években egyértelműen azonosítottuk a tűzijáték csúvját a mérőállomáson, 2014-ben és 2015-ben a kedvezőtlen helyi időjárás ezt nem tette lehetővé, 2020-ban nem volt tűzijáték a Covid-19 világjárvány miatt (de ezeket az éveket is kiértékeljük), míg 2018-ban és 2019-ben az adott napon nem álltak rendelkezésünkre teljeskörűen a mérési adatok. Ezekben az években a rakétákat bárkákról, pontonokról és hidakról indították a Duna fölé. A két legmonumentálisabb tűzijáték 2021-ben és a 2022-ben volt, amikor kb. 33 ezer és 40 ezer rakétát lőttek fel; a látványosság az Erzsébet és a Szabadság hidakról aláhulló, vízesés jellegű effektussal (görögtűz) zárult. E két tűzijáték vizsgálatához a meteorológiai viszonyok is különösen kedvezőek voltak. A magas művészi fokan megtervezett és lebonyolított esemény fontos részét képezték az audiovizuális részek: fényfestés az Országház épületén, fényjáték drónokkal, valamint a narráció és a zene.

Augusztus 20., 21:00 óra

2021-ben a lövések 21:06 órakor kezdődtek, és a görögtűz 21:32-kor fejeződött be. A két időpont között az aeroszol-részecskék számának a koncentrációja $20 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ értékről $369 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ -re, tehát 18-szorosára nőtt a mérőállomásunkon (2. ábra). A koncentráció a tűzijáték után 5–6 perccel érte el a maximumát, majd további 45 perc alatt visszatért az esemény előtti szintre. A csúcsot egyértelműen a tűzijáték okozta. Nagyobb (1 másodperces) időfelbontású méréseink kapcsolatot mutattak ki a koncentráció és a tűzijáték típusai között. A görögtűz és a római gertya például fokozottan hozzájárult a felszíni koncentrációkhoz. A kapott csúcserő extrém nagy koncentrációnak minősül Budapesten; sokkal nagyobb, mint a szennyezett időszakokban előforduló adatok. A belvárosban a részecskék számának koncentrációja általában $9\text{--}10 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$. A tűzijáték csúcspontjához hasonló, nagy értékeket a Várhegyi-alagútban mértünk [4]. Ott a tipikus koncentráció $134 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, míg a legnagyobb (10 perces) adat időszakosan elérte a $392 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ -t. Szükséges azonnal rögzíteni, hogy az említett két mikrokozmoszban a részecskék kémiai összetétele nagyban eltér. A tűzijáték részecskéi átmeneti- és nehézfémeket tartalmaznak nagyobb arányban, míg a közlekedésből származó részecskékben szerves vegyületek találhatók dúsult mennyiségekben. Mindkét csoport különböző módon, de kifejezetten kockázatos az emberi egészség szempontjából. A többi vizsgált évben (különösen 2022-ben) hasonló jellegű idő-

sorok, de kisebb koncentrációk valósultak meg a tűzijátékok alkalmával.

A tűzijátékból származó részecskék (medián) átmérője meglehetősen nagy, 203 nm körüli (3. ábra). Ez szokatlan érték a magas, 2500 °C égési hőmérsékletet tekintve. Hasonló hőfokú égések általában sokkal kisebb, 25–30 nm átmérőjű részecskéket hoznak létre. A tűzijáték-részecskék nagyobb mérete magyarázható azzal, hogy a robbanásszerű égés nem kiterjedt térfogatban, hanem kis, szétszórt pontokban zajlik, amelyek közvetlen környezetében meredek, negatív hőmérsékleti gradiens alakul ki. Emiatt sok részecske keletkezik az égés központjánál kisebb hőmérsékleteken. Ez a tulajdonság elkülöníti a tűzijátékból származó részecskéket a többi légköri részecskétől. Az átmérőket a folyó fölötti, nagyobb relatív páratartalom is megnövelheti. A viszonylag nagy méretnek fontos következményei lesznek a légzőszervi kiüledésben.

A tűzijáték aktív szakasza és ennek közvetlen hatása a levegőben hozzávetőlegesen 1 óráig érvényesült. Ilyen hosszúságú időszakot tekintve megállapítottuk, hogy a részecskék számának koncentrációja 5–6-szor volt nagyobb, mint az eseményt megelőző vagy követő órában. A legérzékenyebben érintett (100–1000 nm) mérettartományban (3. ábra) ez a növekmény elérte a 20–25-szörös szintet.

A levegő minőségét a szabályozási területeken a részecskék tömegével (és nem a részecskék számával) fejezzük ki. Mérési eredményeinket ezért átszámítottuk bizonyos közelítések alkalmazásával a szállópor (PM_{10} méretfrakció) tömegkoncentrá-

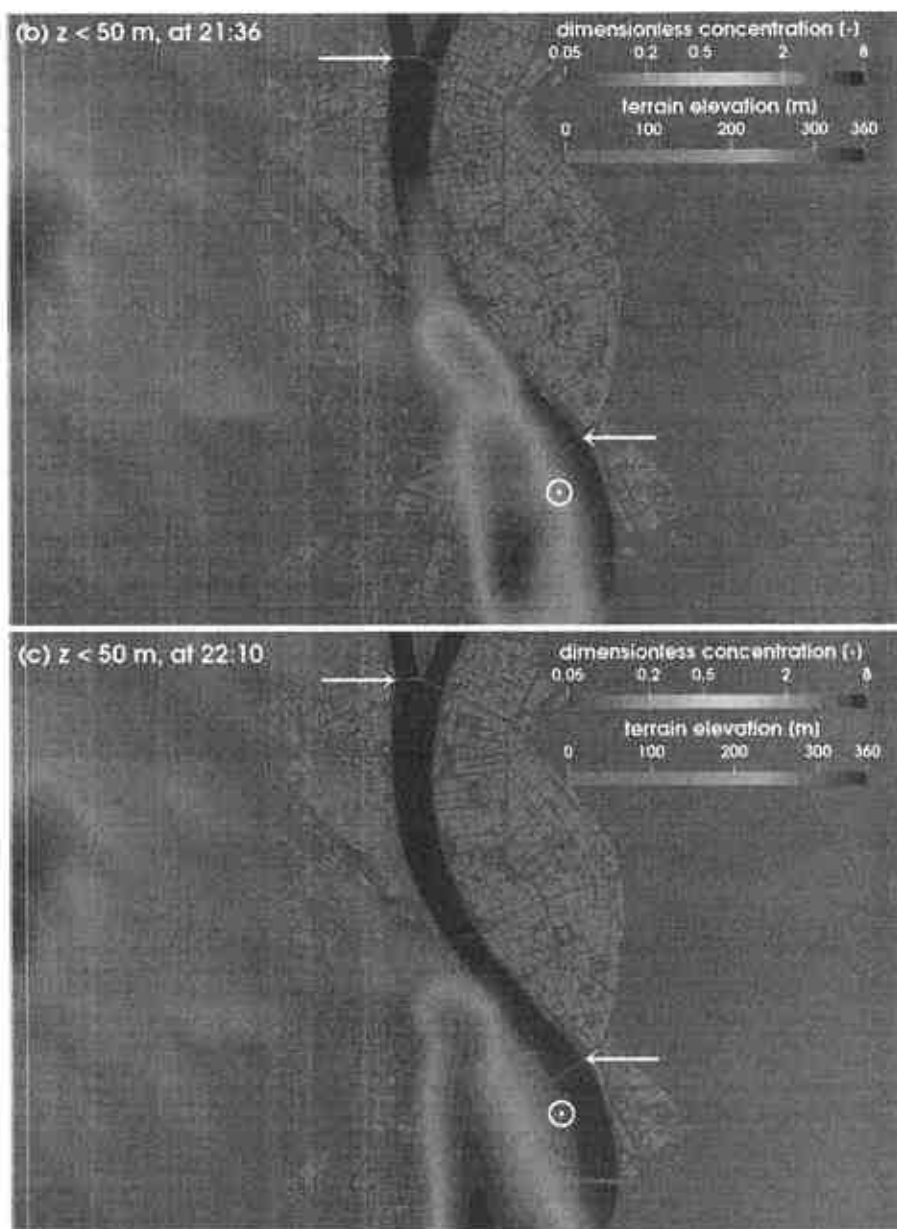
ciójára. Megállapítottuk, hogy a részecskék tömegének a koncentrációja a Duna-parton 100–150-szeresére növekedett a tűzijáték csúcspontjában a tűzijáték előtti vagy utáni időszakhoz képest. Az órás átlagokat tekintve 40–70-szeres emelkedést kaptunk. Budapesten más alkalommal vagy máshol, nyílt levegőben (például szmogriadó esetén), de a metróban sem alakul ki ilyen mértékű szennyezettség [5] [6].

A füstcsóva terjedése

A csóva terjedésének követése érdekében nagy térbeli felbontású szimulációkat végeztünk numerikus áramlástani (CFD) modell alkalmazásával [7]. Az ehhez szükséges, $16 \times 16 \times 3$ km méretű modelltartomány geometriáját térinformatikai (GIS) adatok alapján alakítottuk ki, amely tartalmazta a komplex domborzatot, a felszínborfoltosságot, valamint az erdős területek, a hidak és több ezer különálló épülettömb geometriáját (4. ábra). A számítások során először a kezdeti és peremfeltételeket állítottuk elő, majd időfüggő szimulációkat végeztünk a terjedés meghatározására részecsekövető (Lagrange-) módszert alkalmazva. Ennek során részecskefelhőket juttatunk az áramlási mezőbe a tűzijáték pontos forgatókönyve alapján meghatározott helyeken és időpillanatokban, majd az áramlási modellel követtük a csóva térbeli és időbeli alakulását.

A füst terjedését és tulajdonságait a felszínhez közelebbi (magasság $z < 50$ m) és távolabbi ($z > 50$ m) rétegekben határoztuk meg. Megállapítottuk, hogy a magasabb rétegben tipikusan mintegy 15-ször nagyobb koncentrációk fordulnak elő az időátlagok tekintetében, mint az alsóbb részben. A csóva terjedelmesebb is volt a felsőbb részben. Vízszintes irányban az alsóbb rétegben 10-szer nagyobb koncentrációk voltak a csóva belsejében, mint a szélen, míg a hasonló arány a magasabb rétegben 60 és 100 közöttinek adódott. A csóva kiterjedését a közvetlen földrajzi adottságok és az épített környezet, illetve az aktuális meteorológiai viszonyok, különösen a szélsébség és a szélirány befolyásolták.

A terjedési modell egyértelműen megmutatta, hogy a tűzijáték füstcsóvája és a belőle kihulló vagy kiülepedő szennyezőanyagok nemcsak a tűzijáték közvetlen környezetét, a Duna-szakaszt és -partokat érintik, hanem a város nagyobb és távolabbi kerületeire is hatással lehetnek (4. ábra). Modellezési eredményeink azt is jelezték, hogy 2021-ben a mérési helyszínt (a BpART Laboratóriumot) a csóva csupán érintette,



4. ábra. A tűzijáték füstcsóvájának mérete és elhelyezkedése 2021. augusztus 20-án a mért koncentráció maximumának időpontjában (21:36), illetve a lecsengése után (22:10) a felszínhez közeli ($z < 50$ m) levegőrétegben. A tűzijátékot határoló hidakat nyílakkal, míg a mérési helyszínt fehér körrel és ponttal jelöltük

ezért a dél-budai területeken kialakuló koncentrációk várhatóan nagyobbak voltak a Duna-parton mért értékeknél.

Kiülepedés a légzőrendszerben

A részecskék légzőrendszeri kiülepedését – mint az egészségre gyakorolt hatás jellemzésének első lépését – sztochasztikus matematikai tüdőmodellel vizsgáltuk a mérési helyszínen üve szemlélődő felnőtt nő és ötéves gyermek esetén [8]. A tűzijáték előtt és után a felnőtt nő a beszívott részecskék körülbelül felét kilélegezte, míg ez az érték elérte a 77%-ot a tűzijáték alatt.

Gyermekek esetén a kilélegzett részecskék aránya még nagyobb, 86% lett. A légzőszervi kiülepedés valószínűsége tehát a tűzijáték ideje alatt mindkét esetben csökkent, ami a tűzijátékból származó részecskék átmérőjével magyarázható (ebben a mérettartományban a kiülepedés valószínűsége csökken az átmérő növekedésével), illetve a felnőtt és a gyermek közötti anatómiai és légzési különbségekkel kapcsolatos.

A kiülepedési sebesség (az egységnyi idő alatt beszívott részecskék kiülepedési aránya) kifejezi a beszívott levegőben lévő eltérő koncentrációk hatását is. Láttuk, hogy a tűzijáték igen jelentősen megnövelte a légköri koncentrációkat. A kiülepedési

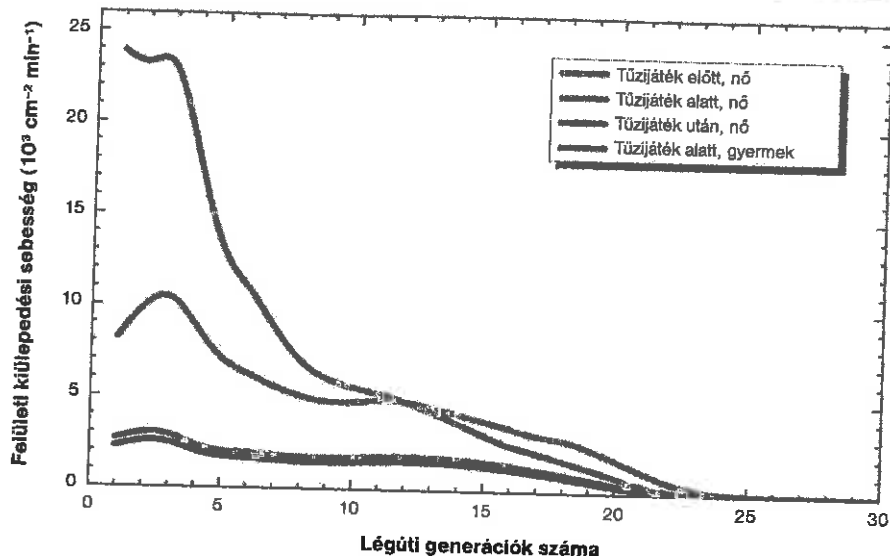


sebesség a teljes légzőrendszerben 4-szer nagyobb volt a tűzijáték alatt, mint előtte vagy utána, és a maximuma a tüdő mélyebb (acináris) részeiben alakult ki. A növekmény azonban kisebb, mint a koncentráció emelkedése (1 óras átlagok esetén 5–6-szoros), ami a méreteloszlásban tapasztalt változások (3. ábra) kedvező hatásával függ össze.

A felületi kiülepedési sebesség magába foglalja azt is, hogy a részecskék kiülepedése mekkora légzőszervi felületen valósul meg. A kiülepedési sebességtől eltérően, a felületre vonatkoztatott mennyiségnek a maximuma nem a tüdő mélyebb részeiben, hanem a két főhörgőben és a hörgőkben (a 2. és a 3. légúti generáció) alakul ki. Ez azért fontos, mert ebben az anatómiai részben fordul elő a tüdő elsődleges daganatos megbetegedéseinek jelentős aránya. A tűzijáték alatt a felületi kiülepedési sebesség jelentősen nagyobb lett felnőtt nő esetében az esemény előtti vagy utáni görbékhez képest (5. ábra). Mindez egészségi többletkockázatot jelent. A gyermekek légúti kiülepedési sebessége, ezért a náluk kapott növekedés még markánsabb lett, valamint a maximális kiülepedés a légcső szakaszára (1. légúti generáció) tolódott. Ezek az eredmények azt jelzik, hogy a gyermekek érzékenyebben reagálnak a tűzijáték okozta légszennyezettségre, mint a felnőttek.

Egészségi és környezeti hatások

A tűzijáték rengeteg nézőt vonz a helyszínre. Becslések alapján 2021-ben például 700 ezer ember szemlélte az eseményt közvetlenül a Duna-partokon. Ezekben a résztvevőkben a rövid idejű aeroszol-expozíció és ennek következtében a részecskék légzőrendszeri kiülepedése biológiai választ válthatott ki. Az egészséges szervezet általában jobban tolerálja a rövid ideig tartó expozíciót, mint a tartósabb kitettséget. Ilyenkor torokkaparás, irritáció, köhögés, esetleg légszomj alakulhat ki. A légzőszervi (például asztma vagy COPD) betegségekben szenvedőknél azonban előfordulhat a tünetek súlyosbodása rövidebb expozíciónál is. Az időseknél megnőhet a halálozási arány a szív- és érrendszeri, a légzőszervi, illetve az agyi vérellátáshoz kapcsolódó betegségekben, illetve figyelem-rendellenesség keletkezhet. Az elhízott egyéneknek gyakoribb lehet a szívritmuszavar és az agyvérzés (egynapos késleltetéssel). A tűzijáték fizikai hatásai pszichikai stresszt, félelemérzetet válthatnak ki emberben és állatoknál, valamint a látás és



5. ábra. A felületi kiülepedési sebesség alakulása a tüdőben felnőtt nő esetén a tűzijáték előtt, alatt és után, illetve gyermek esetén a tűzijáték alatt 2021. augusztus 20-án

a hallás is károsodhat. A csóvából kikerülő légszennyezők hosszabb ideig is kifeléhatolhatnak a hatásukat például parkokban, felszíni vizekben, játszótéren, természetben és más, nyitott városi létesítményekben.

Zárszó

A légszennyezés igen jelentős hányada az emberi társadalom alapvető igényeinek a kielégítésével, például elektromosáramtermeléssel, fűtéssel, főzéssel, közlekedéssel, iparral és mezőgazdasággal kapcsolatos. Ezzel szemben a tűzijátékoknak vannak olyan típusai, amelyek kifejezetten a szórakozást szolgálják. Ezeket tanácsos szigorúan szabályozni és korlátozni a jól dokumentált egészségi és környezeti kockázataik miatt. Más típusú tűzijátékok azonban a kultúra részét képezik azáltal, hogy történelmi és vallási tartalmakat hordoznak. Ezek eltérő elbírálás alá esnek. Esetükben is szükség lehet azonban fokozatos változtatásokra és alternatívák keresésére – például a fényforrások és a modern technológiák kínálta dramaturgiai lehetőségek jobb kihasználásával.

A tűzijáték sokféle szennyezőanyag összetett keverékét eredményezi a levegőben, amit légköri kórtételnek is nevezünk. Végső soron a helyi közösségek feladata és felelőssége annak az eldöntése, hogy a tűzijáték élménye megéri-e annak a káros légköri kórtételnek az elfogadását, amit a tűzijáték létrehoz.

Köszönetnyilvánítás. Köszönetünket fejezzük ki Tóth Ferencnek, a Nuvu Kft. ügyvezetőjének, aki rendelkezésünkre bocsátotta a 2021. évi tűzijáték részletes harmonogramját és látványtervét. A kutatást a Nemzeti Kuta-

tási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K132254 és a K124439 szerződés alapján.

IRODALOM

- [1] Cao, X., Zhang, X., Tong, D. Q., Chen, W., Zhang, S., Zhao, H., Xiu, A.: Review on physicochemical properties of pollutants released from fireworks: environmental and health effects and prevention. *Environ. Rev.* (2018) 26, 133–155. <https://doi.org/10.1139/er-2017-0063>
- [2] Salma, I., Németh, Z., Weidinger, T., Kovács, B., Kristóf, G.: Measurement, growth types and shrinkage of newly formed aerosol particles at an urban research platform. *Atmos. Chem. Phys.* (2016) 16, 7837–7851. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7837-2016>
- [3] Salma, I., Farkas, Á., Weidinger, T., Balogh, M.: Firework smoke: Impacts on urban air quality and deposition in the human respiratory system. *Environ. Pollut.* (2023) 320, 121612. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121612>
- [4] Salma, I., Borsós, T., Németh, Z., Weidinger, T., Aalto, T., Kulmala, M.: Comparative study of ultrafine atmospheric aerosol within a city. *Atmos. Environ.* (2014) 92, 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.020>
- [5] Budapest Környezeti Állapotértékelése 2022, Budapest Főváros Önkormányzata, Főpolgármesteri Hivatal, Klíma- és Környezetügyi Főosztály, 2023. <https://budapest.hu/Lapok/2020/budapest-kornyezeti-allapot-ertekelese.aspx>, utolsó letöltés 2023. 06. 08.
- [6] Salma, I., Weidinger, T., Maenhaut, W.: Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station. *Atmos. Environ.* (2007) 41, 8391–8405. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.017>
- [7] Balogh, M., Parente, A.: Realistic boundary conditions for the simulation of atmospheric boundary layer flows using an improved k-ε model. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* (2015) 144, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.010>
- [8] Salma, I., Püri, P., Németh, Z., Farkas, Á., Balásházy, I., Hofmann, W., Farkas, Á.: Lung burden and deposition distribution of inhaled atmospheric urban ultrafine particles as the first step in their health risk assessment. *Atmos. Environ.* (2015) 104, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.060>