

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A szén-monoxid légköri koncentrációjának alakulása Magyarország felett

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Deczki Zoltán

Földtudományi alapszak,
Meteorológus szakirány

Témavezető:

Dr. Haszpra László

Országos Meteorológiai Szolgálat

Konzulens:

dr. habil. Barcza Zoltán

ELTE-TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2019

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1 A szén-monoxid kémiai jellemzői és élettani hatása	5
2.2 A szén-monoxid forrásai	6
2.2.1 Az elsődleges szén-monoxid források	6
2.2.2 A másodlagos szén-monoxid források	8
2.3 A szén-monoxid nyelői	11
2.4 A globális szén-monoxid mérleg	12
2.5 A légköri szén-monoxid koncentráció időbeli alakulása	15
2.6 A légköri szén-monoxid mérése	15
2.6.1 Gázkromatográfiás eljárás	16
2.6.2 Spektroszkópiai eljárás	18
2.6.3 Műholdas szén-monoxid mérések	21
3. Adatfeldolgozás, eredmények	23
3.1 Mérési helyszín	23
3.2 A mérőrendszer működési elve	23
3.3 Felhasznált adatok, módszertan	24
3.4 Adatelemzés	27
4. Összefoglalás	32
Köszönetnyilvánítás	34
Irodalomjegyzék	35
Internetes források	38

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a különböző országok a környezetvédelmi programokra és indítványozzák a különféle éghajlatvédelmi egyezmények megkötését. Az elsődleges célkitűzésük az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, mivel a növekvő légköri koncentrációjuk a Föld-légkör rendszer energiamérlegét megváltoztatja, és az így okozott éghajlatváltozás felborítja az ökológiai rendszerek egyensúlyát. A légkörben a legnagyobb mennyiségben előforduló üvegházhatású gázok a vízgőz után a szén-dioxid és a metán. Ebből következik, hogy az üvegházhatás nagy része a vízgőznek köszönhető, viszont koncentrációját közvetlenül nem tudjuk megváltoztatni nagy mennyisége és rövid tartózkodási ideje miatt (~9 nap), szemben a szén-dioxiddal (~20-150 év) és a metánnal (~10 év).

Az éghajlatvédelemmel kapcsolatos legutóbbi összefogás, az éghajlatváltozási keretegyezmény (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) részesei által megkötött 2015-ös Párizsi Megállapodás volt, amelynek fő céljai az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának mérséklése (legfőképpen a szén-dioxid és a metán) és a globális felmelegedéshez történő alkalmazkodás. A megállapodás a 2020 utáni időszakkal foglalkozik. Az UNFCCC-t már 1992-ben Rio de Janeiro-ban elfogadták a részes felek képviselői, jelenleg pedig 197 ország vesz részt a megállapodásban (5 – UNFCCC).

A szakdolgozatom témája a szén-monoxid, aminek közvetlenül nincs hatása az éghajlatra (nem üvegházhatású gáz), mivel a szén-monoxid elnyelési sávjai a Föld hőmérsékleti kisugárzási spektrumának olyan tartományára esnek, ahol már csak nagyon kevés energia megy, így lényegében nincs elnyelés (Gelencsér et al., 2012). Viszont a kémiai reakciója révén befolyásolja a metán légköri koncentrációját, ami már egy üvegházhatású gáz és légköri mennyisége kihat az éghajlatra (*Isaksen és Hov, 1987*). Ezáltal hasonlóan fontos szerepet tölt be a Föld éghajlatának szabályzásában, mint más üvegházhatású gázok. Ezért a szén-monoxidot (csak) közvetett üvegházhatású gázként vesszük figyelembe.

A szakdolgozat egyik célkitűzése, hogy átfogó képet nyújtson a szén-monoxid jellemzőiről, természetes és antropogén forrásairól, a légkörben való szerepéről és átalakulásáról, a légkörből való kikerüléséről, mérési módszereiről, illetve a mennyiségének globális alakulásairól. A szakdolgozatom második részében a magyarországi, Hegyhátsálon folyamatban lévő mérések adatait használom fel a kutatásomhoz. A szén-monoxid

koncentráció napi és évszakos változásait elemzem a 2016-2019. évek adatai alapján. Az utolsó fejezetben pedig összefoglalom az eredményeimet és a következtetéseimet.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1 A szén-monoxid kémiai jellemzői és élettani hatása

A szén-monoxid káros élettani hatását már az ókorban is megfigyelték, mivel az időszámításunk előtti 4. században Arisztotelész is lejegyezte a szén égésekor keletkező mérgező gázzal a tapasztalatait (*Penney 2000*). Ez volt az első írásos megjelenés a szén-monoxidról, ekkor még részletesebb következtetések nélkül. Azonban a gáz tényleges azonosításra egészen 1800-ig kellett várni, ami egy angol kémikushoz William Cruikshankhoz köthető, aki meghatározta, hogy egy oxigén atom és egy szén atomból áll, amelyek egy hármassal kapcsolódnak össze (*1 – University of Liverpool*). Ebből kettő kovalens kötés egy pedig egy úgynevezett koordinatív kovalens kötés, más néven datív kötés, amelyben a két elektron ugyanazon atomból származik (*2 - Compendium of Chemical Terminology*). Előtte is voltak próbálkozások, egy francia kémikusnak, J. M. Francois de Lassonének is sikerült előállítania 1776-ban. Cink-oxidot melegített faszénnel, viszont az összetevőket tévesen állapította meg, mert kékes lángja miatt hidrogén vegyületnek gondolta. A gáz mérgező hatását már ismerték, viszont a pontos azonosítása után még évtizedeket kellett várni, amikor is 1850-ben egy francia fiziológus, Calude Bernard egy kutyákon folytatott kísérlet folyamán rá nem jött, hogy milyen biológiai folyamat megy végbe az élő szervezetben a szén-monoxid belégzése során (*Waring et al., 2007*).

A szén-monoxid élettani hatását hamarabb kezdték el vizsgálni részletesebben, mint a légkörben beöltött szerepét. Elsősorban azért, mert az emberre gyakorolt toxikus hatása nagy mennyiség esetén halálos végkimenetelű is lehet. Veszélyességét fokozza, hogy a levegővel körülbelül megegyezik a fajsúlya, így jól keveredik vele, illetve egy színtelen szagtalan gázzal beszélünk, ami a szén-monoxid érzékelők segítségével, emberi érzékszerveinkkel nem észlelhető. Leginkább a zárt, szellőzetlen térben tud igazán veszélyes lenni az élő szervezetre, hiszen itt szellőzés hiányában, könnyebben dúsul fel és ér el magas koncentrációt, mint a szabadban. A légzés során a tüdőben zajló gázcsere révén belép a véráramba. Az emberi szervezetre az előbbi folyamat pedig azért mérgező, mert a szén-monoxid 250-szer nagyobb affinitással kötődik a vér hemoglobinjához, mint az oxigén. A vér hemoglobinjában lévő vasatomokkal találkozáva, karboxi-hemoglobint képez, megakadályozva az oxigén felvételét, és így a sejtek oxigénellátását, ez pedig szöveti hipoxiához vezet, amely egy oxigénhiányos állapotot jelent (*Reumuth et al., 2018*).

A szén-monoxid toxikus hatását már az 1800-as években is kutatták, viszont légköri mérése egészen az 1940-es évek végéig váratott magára, mikor is megjelentek az első légköri szén-monoxid koncentráció mérésére alkalmas eszközök. A vizsgálatoknak köszönhetően bizonyossá vált, hogy a CO befolyásolja az OH gyök mennyiségét. Mivel az OH gyök meghatározó szerepet tölt be a légkör oxidáló képességében, így a CO is hatással van a légkör oxidáló képességére, ezen keresztül pedig a légkör összetételére (Ryan et al., 2018). Mind a szén-monoxidot, mind a metánt a hidroxil-gyök oxidálja és távolítja el ily módon a légkörből. A konkurens kémiai reakciók miatt a szén-monoxid légköri mennyiségének változása kihat a metán-mennyiségre, így a szén-monoxid – közvetetten – az üvegházhatású gázokhoz hasonlóan hatást gyakorol az éghajlatra. A metán globális melegítési potenciálját tekintve 100 éves időskálán 28-szor hatékonyabb üvegházhatású gáz, mint a szén-dioxid. Bár légköri tartózkodási ideje csak kb. 9 év, egységnyi tömegre vonatkoztatva több energiát nyel el, mint a szén-dioxid 100 év alatt (Gelencsér et al., 2012; IPCC, 2013). Összességében az éghajlat védelmének, a légkör energiaháztartásának szempontjából az a kedvezőbb eset, ha a szén-monoxid koncentráció alacsony, a metán gyorsabban oxidálódik, gyorsabban kerül ki a légkörből, és így adott kibocsátás mellett légköri egyensúlyi koncentrációja alacsonyabb.

2.2 A szén-monoxid forrásai

2.2.1 Az elsődleges szén-monoxid források

A szén-monoxid forrásokat két különböző módon tudjuk megkülönböztetni, egyenként két-két csoporttal. Az egyik felosztás az antropogén és természetes források csoportjai, a másik pedig az elsődleges és másodlagos források csoportjai. Egy nyomanyag elsődleges forrása az a kibocsátó, amely közvetlenül juttatja az adott anyagot a légkörbe, egy nyomanyag másodlagos forrása pedig az a légköri folyamat, ami a légkörön belül, kémiai reakcióval termeli az adott anyagot. Az elsődleges források esetében az antropogén eredet túlsúlyra jellemző, mivel nagyobb mennyiségű szén-monoxid a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének következtében kerül a légkörbe. Ez magába foglalja a gépjármű közlekedést, a háztartási tüzelést és az ipari folyamatok által kibocsátott szén-monoxid mennyiséget (Mafusire et al., 2016). Igaz, a gépjárművek okozta szennyeződés az 1990-es évektől fokozatosan csökkent az autókba szerelt katalizátoroknak köszönhetően (Bakwin et al., 1994). Idesorolható kategória még a biomassza égése, égetése, aminek során keletkezik nagy mennyiségű szén-monoxid. A biomassza felhasználása energetikai szempontból fontos az

emberek számára. Délkelet-Ázsia, Dél-Amerika és Ausztrália területein a természetes módon keletkezett erdő- és bozóttüzek is hatalmas mennyiségű CO-t juttatnak ki a levegőbe. Ezeket az erdőtüzeket az esetleges szárazságok tehetik gyakoribbá, intenzívebbé, nagyobb kiterjedésűvé. Ezenkívül Dél-Amerika egyes területein az erdők tudatos égetése is elég gyakori, ami az újabb mezőgazdasági területek szerzésének céljából történik. Ez a folyamat az emberi behatás miatt, antropogén forrásként vesz részt a globális szén-monoxid kibocsátásban (Ribeiro *et al.*, 2018). Az égetésre vonatkozó CO értékeket nagy bizonytalanság jellemzi, mert a tüzek kiterjedésének, intenzitásának, időtartamának, a biomassza széntartalmának, az égési hatékonyságnak az ismerete, illetve az ezekre vonatkozó adatok bizonytalanok (Mészáros, 2006).

A szén-monoxid természetes forrásai közé sorolhatjuk a különféle talajokat, a szárazföldi növényzetet és az óceánt. A talaj a talajtípustól függően, helyenként forrásként, helyenként pedig nyelőként viselkedik, tehát elsősorban lokális szinten lehet a tényleges szerepét meghatározni (Mészáros, 2006). A szén-monoxid termelése úgynevezett abiotikus folyamatokon keresztül történik, mint például a hőbomlás és a fotodegradáció (Derendorp *et al.*, 2011). Az előbbi a talaj kémiai vegyületeinek irreverzibilis termikus bomlását jelenti, (Derendorp *et al.*, 2011; van Asperen *et al.*, 2015), míg az utóbbi pedig a talaj felszínén a fény hatására lezajló kémiai bomlást (King *et al.*, 2012).

A növények esetében is hasonló helyzetben vagyunk, hogyha az atmoszférába irányuló szén-monoxid fluxust vizsgáljuk. Viszont az elnyelési mennyiségeik minimálisak, így összességében nettó forrásként számolnak a növényekkel. Laboratóriumi vizsgálatok során megállapították, hogy egy 50 Wm^{-2} nagyságú, fotoszintézis szempontjából aktív sugárzás hatására a levélfelületen, $3 \cdot 10^{-9} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nettó szén-monoxid termelődik, ami alapján a szárazföldi növényzet globális forráserőssége 50-100 Tg CO év⁻¹ (Mészáros, 2006).

Fontos természeti források még az óceánok. Hasonlóképpen az előző természeti forrásokhoz, ennek a hozamát is nagy bizonytalansággal tudjuk csak becsülni, mivel az óceáni szén-monoxid nagy időbeli és térbeli változékonyságú tevékenységből származik (Stubbins, 2006). Az óceáni eredetű szén-monoxid 75-80 %-a az óceánban található oldott szerves anyagokból származik, a maradék 20-25 % pedig biotikus forrásból. Az utóbbi esetben a vízben található algák és fitoplanktonok termelik a szén-monoxidot. (Conte *et al.*, 2019). Egy 2009-es laboratóriumi kísérletben a fitoplankton közvetlen szén-monoxid termelését figyelték meg. A kísérlet úgy zajlott, hogy egy és két napos ciklusokban,

fotoszintetikusan aktív sugárzásnak tették ki a különböző fitoplanktonokat. A legtöbb vizsgált faj jelentős CO termelést mutatott megvilágításkor. A fajoktól függően a kibocsátás értéke $1,4 \cdot 10^{-5}$ és $8,7 \cdot 10^{-4}$ $\mu\text{g CO } \mu\text{g klorofill}^{-1} \text{ h}^{-1}$ közötti (Gros et al., 2009). A kísérlet rávilágított arra, hogy a globális modellek, amik addig csak az oldott szerves anyagokból származó szén-monoxidot vették figyelembe nem teljeskörűek, mivel a biotikus forrásnak is jelentőségteljes szerepe van az óceáni CO termelésben (Gros et al., 2009).

2.2.2 A másodlagos szén-monoxid források

A szén-monoxid másodlagos forrásai közé soroljuk a nem-metán illékony szerves anyagok (NMVOC) csoportjának oxidációs folyamatait. Ebbe a csoportba teljes egészében beletartoznak még a nem-metán típusú szénhidrogének (NMHC), és azok a vegyületek is, amelyek C és H atomokon kívül más fajtákat (főleg O és N atomokat) is tartalmaznak (Mészáros, 2006). Az NMHC mellett maga a metán is fontos másodlagos szén-monoxid forrás. Oxidációjuk a troposzféra egészében zajlik, földrajzi szélességtől függő intenzitással.

A troposzférába éves szinten mintegy 540-568 Tg metán kerül be (Saunio et al., 2016) és légköri oxidációja révén évente 800 Tg-mal járul hozzá globális szén-monoxid kibocsátáshoz, ami a teljes CO emisszió 40 %-át teszi ki (Mészáros, 2006). Metán antropogén és természetes úton is kerülhet a légkörbe. A globális metán kibocsátás 60%-a antropogén forrásból érkezik, így az emberi tevékenység által kibocsátott metán mennyiség nagyobb szerepet tölt be a szén-monoxid kibocsátásban, mint a természetes forrása. Az utóbbi állítás azért fontos, mert az emberi tevékenység által kibocsátott metán mennyiség csökkentése során, közvetett módon a szén-monoxid koncentráció értéke is csökkenne, mivel a metán OH gyökkel való reagálása során szén-monoxid keletkezik. Ráadásul így a CO gyorsabban oxidálna a többlet OH gyök miatt, ami tovább csökkentené a koncentrációt.

Ezzel szemben, a nem-metán illékony szerves komponensek (NMVOC) antropogén forrásai sokkal kisebb szerepet töltenek be a természetes forrásai mellett a szén-monoxid kibocsátásban. Az antropogén eredetű NMVOC elsősorban az ipari és a sűrűn lakott területeken jellemző. Az éves kibocsátás körülbelül 150-200 Tg C*, aminek nagy részét a közlekedési eredetű anyagok teszik ki, de a biomasszaégetésből és a különféle oldószerek használata során is számottevő mennyiség jut ki a troposzférába. Összességében a globális

* A szénegyenértékben kifejezett mennyiség, azaz a vegyületekben lévő szén mennyisége.

szén-monoxid kibocsátásban 5-10 %-ot tesz ki az NMVOC antropogén forrásaiból keletkezett szén-monoxid mennyiség (*Mészáros, 2006*).

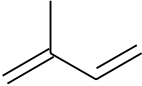
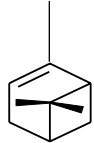
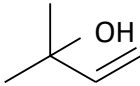
A természetes forrásokat lényegében a különböző növények emissziója adja. Az NMVOC emissziójának megadásához, jól felhasználható a Guenther és munkatársai (*1996*) által meghatározott összefüggés, ami különféle növényfajtákra egyaránt alkalmazható:

$$F = \int \varepsilon \cdot D \cdot \gamma dt \quad (1)$$

ahol F az emisszió ($\mu\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$), ε az átlagos emissziós potenciál ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) az egyes komponensekre nézve, D a növényzet levélsűrűsége ($\text{g száraz levéltömeg m}^{-2}$), és γ a környezeti korrekciós faktor (mértékegység nélküli), ami a hőmérséklet és a napsugárzás emisszióra gyakorolt hatását jelenti (*Mészáros, 2006*). Ezzel az éves emissziók könnyen meghatározhatók, de akár az éven belüli rövidebb időintervallumokra, mint például az évszakokra vagy még ennél rövidebb időszakokra is tökéletesen alkalmazható (*Guenther et al., 1995*).

Jól látható, hogy az összefüggésekben szereplő paraméterek értékének ismeretében kiszámolható fluxus nem csak a növény fajtájától függ, hanem a vizsgált kémiai komponensektől is. A kémiai komponensek függvényében, egy anyagot, és három anyagcsoportot szoktak megkülönböztetni. Az izoprént, a monoterpéneket, az egyéb reaktív szerves komponenseket (Other Reactive Volatile Organic Compound, ORVOC), és az egyéb (nem-reaktív) szerves komponenseket (Other Volatile Organic Compound, OVOC). Az utóbbi kettőt pedig az eltérő kémiai reaktivitás miatt szokás megkülönböztetni.

1. táblázat - A nem-metán illékony szerves komponensek csoportosítása (Guenther et al., 1995)

Csoport	Élettartam	Képlet	Példa	Szerkezet
1. Izoprén	1-2 óra	C ₅ H ₈		
2. Monoterpén	0,5-3 óra	C ₁₀ H _X	α-pinén	
3. Egyéb reaktív VOC	<1 nap	C _X H _Y O _Z	2-metil-3-butén-2-ol	
4. Egyéb nem reaktív VOC	>1 nap	C _X H _Y O _Z	Metanol	—OH

A különböző anyagok, különböző paraméterekkel jellemezhetők kibocsátásuk szempontjából. Először vizsgáljuk meg az izoprént, amelynek a kibocsátása csak nappal, fény hatására történik. A γ_{ISO} környezeti kibocsátási faktor egy fényintenzitástól (C_L) és egy hőmérséklettől (C_T) függő együttható szorzataként adható meg (Mészáros, 2006):

$$\gamma_{ISO} = C_L * C_T \quad (2)$$

a C_L együttható az alábbi módon állapítható meg:

$$C_L = \frac{\alpha C_L Q}{\sqrt{1 + \alpha^2 Q^2}} \quad (3)$$

ahol Q a fotoszintézis szempontjából aktív sugárzás intenzitása (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $\alpha = 0,0027$ és $C_L = 1,066$ empirikus koeficiensek (Mészáros, 2006). A C_T együttható pedig a következőféleképpen adható meg:

$$C_L = \frac{\exp\left(\frac{C_T'(T-T_S)}{RT_S T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{C_T''(T-T_M)}{RT_S T}\right)} \quad (4)$$

ahol T a levél hőmérséklete (K), T_S a levél hőmérséklete standard állapotban (303 K), R az egyetemes gázállandó ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), C_T' ($=95000 \text{ J mol}^{-1}$), C_T'' ($=230000 \text{ J mol}^{-1}$), és T_M ($=314 \text{ K}$) empirikus koeficiensek (Mészáros, 2006).

Ellentétben az izoprénnel, a monoterpének esetében az emisszió nem csak nappal, hanem éjszaka is folyamatos és csak a hőmérséklet befolyásolja. A γ_{MTS} környezeti korrekciós faktort pedig az alábbi egyenlettel lehet kiszámítani:

$$\gamma_{\text{MTS}} = \exp(\beta(T-T_s)) \quad (5)$$

ahol β ($= 0,09 \text{ K}^{-1}$) empirikus koefficiens, T a levél hőmérséklete (K), T_s pedig a levél hőmérséklete standard állapotban (303 K) (Mészáros, 2006). Guenther és munkatársai (1996) értelmezése szerint, a monoterpénekre igaz összefüggés felhasználható az egyéb szerves komponensekre (OVOC) is, így a γ_{OVOC} környezeti korrekciós faktor megadható az alábbi módon:

$$\gamma_{\text{OVOC}} = \gamma_{\text{MTS}} = \exp(\beta(T-T_s)) \quad (6)$$

Az éves természetes VOC fluxus 1150 Tg C mennyiséget tesz ki globális szinten. Ennek körülbelül a 44 %-a az izoprén, 11 %-a a monoterpének, a maradékot pedig fele-fele arányban az egyéb reaktív, illetve nem reaktív illékony szerves anyagok teszik ki (Guenther *et al.*, 1995). Honnan is kerülhetnek be ezek az anyagok a légkörbe? Elsősorban a trópusi erdők, esőerdők adják a természetes VOC kibocsátásának több mint felét, ezenkívül még számottevők a szavannák, és a lombhullató erdőkkel borított területek (Guenther *et al.*, 1995). A kiszámított értékeket nagyfokú bizonytalanság jellemzi.

2.3 A szén-monoxid nyelői

A szén-monoxid legnagyobb mennyiségben az OH gyökkel való oxidáció révén kerül ki a légkörből. A nyelő folyamatok hozamából ez mintegy 80-90 %-ot tesz ki. Mivel az OH gyök az ózon fotolízisével, majd a keletkező oxigén atom H_2O -val való reakciója során keletkezik, az oxidációs folyamat a nyári hónapokban a legintenzívebb (Edwards *et al.*, 2004). Ez a folyamat körülbelül 1500-2700 Tg év^{-1} szén-monoxid oxidációját jelenti. A keletkező szén-dioxid csak minimális mennyiségben befolyásolja a troposzféra CO_2 mennyiségét (Mészáros, 2006). Az OH gyökkel való oxidációs folyamat mellett, ha csak kis mértékben, de van szerepe más nyelő folyamatoknak is, ilyenek például a talajba és a sztratoszférába irányuló fluxusok.

A talaj már a forrásoknál is megemlítésre került, hiszen a nedvességtartalmának vagy hőmérsékletének változása, kihatással lehet a kémiai és biológiai folyamatok sebességére

így ettől függően helyenként és időnként forrásként viselkedik, helyenként és időnként pedig nyelőként. A nyelő folyamatot a talajban lévő mikrobiológiai aktivitás biztosítja (King és Weber, 2007). Ezen belül a különböző talajbaktériumok, például a nitrifikátorok, hozzájárulnak a szén-monoxid oxidálásához (King és Weber, 2007). A jelenlegi ülepedési sebesség, ami a talaj általi anyagfelvételt jellemzi, $0.16\text{--}0.19\text{ mm s}^{-1}$ körüli érték (Liu et al., 2018). Ez mintegy 10-15 %-os mennyiséget jelent az éves szén-monoxid elnyelésből (Chan and Steudler, 2006). A jövőben ez a %-os arány valamilyen szinten változhat. Mivel, ha azt feltételezzük, hogy a CO koncentráció idővel nem változik és a hőmérséklet növekedni fog, akkor az egyes jövőbeli scenáriók olyan képet mutatnak, hogy a CO ülepedési sebessége $0,0002\text{--}0,0013\text{ mm s}^{-1}$ -mal nőhet évente a 2014-2100 időszak alatt (Liu et al., 2018). A sebesség növekedését elősegítő területek, elsősorban az egyenlítő mentén elhelyezkedő térségek, továbbá Európa, Kelet-Ázsia és Észak-Amerika keleti partvidéke, ahol megfelelően magas hőmérséklet és optimális talajnedvesség van a mikrobiológiai aktivitáshoz (Liu et al., 2018). A talaj fluxust, erősen befolyásolja a levegő hőmérséklet, a talaj hőmérséklet, a légköri szén-monoxid koncentráció, a talajban lévő szerves anyagok mennyisége, a talajnedvesség és a csapadék (Liu, et al., 2018). Ezek függvényében a 21. század végére pedig olyan becslések vannak, miszerint az ülepedési sebesség az éghajlat változásának köszönhetően elérheti a $0,20\text{--}0,30\text{ mm s}^{-1}$ -ot (Liu et al., 2018). A talaj szén-monoxid elnyelésének pontos és aktuális értékeit nehéz meghatározni, elsősorban azért, mert nagyon kevés részletes publikáció van a talaj és a légkör közötti anyagcsere folyamatokról, továbbá meglehetősen kevés a hosszú távú szén-monoxid fluxus mérés különböző ökoszisztémákra vonatkozóan. Az eredmények nagy része laboratóriumi kísérletek nyomán került megállapításra, vagy rövidtávú mérések alapján vontak le következtetéseket.

A sztratoszférába irányuló fluxus még kisebb %-os arányt tesz ki a szén-monoxid nyelő folyamatai között. Egyes kutatók $100\text{--}110\text{ Tg CO év}^{-1}$ -re teszik a mértékét (Pacyna és Graedel, 1995), de a legújabb szén-monoxid mérlegekben már a legtöbb esetben el is hanyagolják.

2.4 A globális szén-monoxid mérleg

A világ különböző területein a különböző évszakokban más és más a szén-monoxid forráshozama. Afrikában a szén-monoxid kibocsátás szezonális változása nagy részben a mezőgazdasági tevékenységhez, a biomassza égetéséhez kapcsolódik, de Délkelet-Ázsiában és az Amazonas vidékén szintén jelentős forrásként számolnak a mezőgazdasági égetéssel

(3 - *Earth Observatory*). A trópusi és a meleg mérsékelt övön kívüli területeken pedig a téli hónapokban történő fűtés során kikerülő szén-monoxid okozza az erős szezonális változást. Emellett a fejlett országok és a gyorsan iparosodó fejlődő országok, egész évben nagy hozamú szén-monoxid forrásért felelősek a jármű közlekedés és az ipari folyamatok által (3 - *Earth Observatory*). A NASA EOS Terra műholdján lévő, Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) elnevezésű mérőrendszer (2.6.3 fejezetben bővebben lesz róla szó) mérései azt mutatják, hogy az egyik kontinensen kibocsátott szén-monoxid mennyiség az óceánok felett könnyen átáramolhat másik kontinens fölé (CO légköri tartózkodási ideje ~2 hónap), ahol hatással van a regionális levegőminőségre (3 - *Earth Observatory*). Tartózkodási ideje ahhoz már viszont kevés, hogy a két félgömb közötti csere is végbe tudjon menni, így markáns különbség lehet a déli és az északi félgömb levegőjének CO koncentrációja között.

2. táblázat - Globális CO mérleg a troposzférában (Tg CO év⁻¹)

	Khalil és Rasmussen (1990)	IPCC SAR (1996)	IPCC TAR (2001)	Yin et al., (2015)
Források				
Antropogén emisszió	590	450-750	780	588
Biomassza égetés és égés	680	300-700	700	327
Óceánok	40	20-200	50	54
Nem-metán szénhidrogének oxidációja	600	200-600	300	297-378
Metán oxidáció	600	400-1000	800	793-977
Vegetáció	100	60-160	150	
Összes forrás	2610	1430-3410	2780	2059-2220
Nyelők				
OH reakció	2200	1400-2600		2197
Száraz ülepedés	250	150-350		
Fluxus a sztratoszférába	100	80-140		
Összes nyelő	2550	1650-3150		2197

A szén-monoxid globális forrásait összegezve azt láthatjuk, hogy az éves szintű emisszió mennyisége 2000-2300 Tg-ra tehető. Nehéz pontos keretek között meghatározni, hogy melyik tényező a legbefolyásosabb forrás, hiszen az évenkénti kibocsátás jelentős időbeli ingadozást mutat, összefüggésben az éghajlat ingadozásával (dominánsan az El Niño/La Niña fluktuáció), illetve az éghajlatingadozás hatására az erdő- és bozóttüzek kiterjedtségének, intenzitásának ingadozásával. Erre jó példa, a 1997-98-as közötti erdőtüzek. Ebben az időszakban egy erős El Niño hatására szélsőséges szárazság alakult ki regionális szinten (Mészáros, 2006). A szén-monoxid kibocsátás felét a légköri oxidációs folyamatok hozama teszi ki. Az antropogén emisszió körülbelül a 25-30 %-át, a maradékot

pedig az óceánok, a biomassza égetés és égése, illetve a növényi emisszió teszi ki. A nyelő folyamatok közül a OH-val való reakciója során kerül ki legnagyobb mennyiségben a szén-monoxid. A másik fontos nyelő a talaj, ami globális szinten több szén-monoxidot vesz fel, mint amennyit lead, azaz a talaj nettó nyelőként működik, de regionális szinten nettó forrás is lehet. A nyelők értékei nagyjából megegyeznek a források hozamaival tehát egyensúlyban vannak, de a külön kategóriákat megvizsgálva láthatjuk, hogy az egyes esetekben igen nagy bizonytalansági intervallumok is lehetnek. A szén-monoxid koncentráció erősen befolyásolhatja a troposzféra oxidációs képességét, ezen keresztül pedig a metán koncentrációját, a légkör üvegházhatásának erősségét. Ennek következtében pedig elengedhetetlen a folyamatos nyomon követése.

2.5 A légköri szén-monoxid koncentráció időbeli alakulása

Az ipari forradalom előtt a szén-monoxid koncentrációja 50-90 ppb* között ingadozott (Mészáros, 2006). Ez az érték lényegileg egyenlő, a mai urbanizált régióktól távol eső területeken mért értékekkel. Ilyen például az óceán feletti légkör szén-monoxid koncentrációja és a Déli sarkvidék területeinek értékei. Egy kutatás során kimutatták, hogy az 1800 és 1950 közötti időszakban egy egyértelműen pozitív trend jellemzi a szén-monoxid légköri koncentrációját, amit a grönlandi jégfúrásokból származó minták vizsgálata alapján állapítottak meg. A minták 1800 és 1950 között a szén-monoxid koncentráció mintegy 20 ppb-s növekedését mutatták (Haan és Raymund, 1998). A 20. század közepén megjelenő légköri szén-monoxid mérésére alkalmas eszközök már 1-2 ppb emelkedést mutattak évente. Emellett más kutatók is hasonló trendet határoztak meg, például az 1976 és 1996 közötti időszakban a légkör szén-monoxid koncentrációját vizsgálva 0,96 ppb év⁻¹ növekedést tapasztaltak Oroszországban (Yurganov et al., 1999). Elsősorban az északi féltekére volt jellemző az ekkora mértékben történő növekedés. A déli féltekén nem volt ennyire egyértelmű a CO koncentrációjának változása (Zander et al., 1989).

2.6 A légköri szén-monoxid mérése

A légköri szén-monoxid mérleg nagyfokú bizonytalansága és ingadozásai miatt elengedhetetlen annak folyamatos megfigyelése és mérése. Az első légköri mérést a svájci Alpokban végezték az 1940-es évek végén, 1950-es évek elején spektroszkópiai technikát

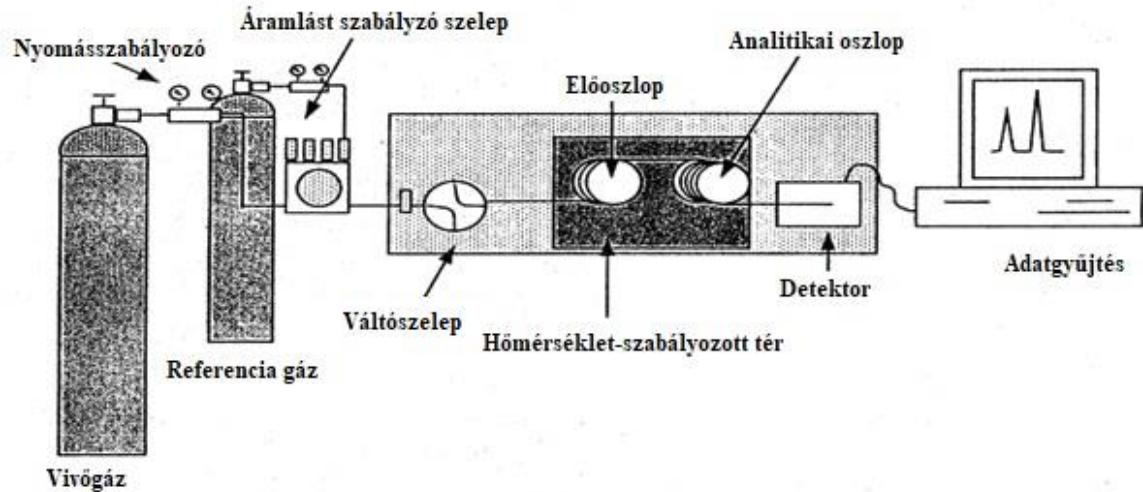
* „part per billion” rövidítése, ami azt jelenti, hogy egy részecske az egy milliárdból, az egész rész milliárdod része (10⁻⁹ térfogatrész)

alkalmazva (*Migeotte és Neven, 1952*). Ezután két évtizeden keresztül igen csekély érdeklődés irányult a további mérések felé. Az 1960-as évek végén a nyomgázok körfolyamatának és képződési folyamatainak vizsgálatai során megállapították, hogy nagyon fontos szerepet tölt be a szén-monoxid a légköri oxidáló képességének befolyásolásában (*Novelli, 1999*). Mivel a déli féltekén a szén-monoxid koncentrációja alacsony értékek között ingadozik, így az esetleges szennyeződések (nagyobb erdő- és bozóttüzek) nagyobb relatív koncentráció-változást jelentenek, mintha egy szennyezett városi környezetben végeznénk méréseket.

A mérési technika szerint két kategóriát különböztetünk meg. Van az optikai, másnéven spektroszkópiai, valamint a gázkromatográfias módszer. A két fő csoporton belül még különböző alcsoportok vannak, amelyek egyes esetekben jobban használhatók a különböző tulajdonságaik miatt. Legfontosabb eltérések a két csoport között a pontosság, a kimutatási határ és hogy mérhető-e vele egyéb vegyület (*Novelli, 1999*). A 3. és a 4. táblázat erről nyújt részletesebb információt.

2.6.1 Gázkromatográfias eljárás

Mészáros (2006) alapján, a gázkromatográfia (GC) egy olyan dinamikus elválasztási módszer, ahol a minta egyes alkotói kémiai kötések kialakítása és felbomlása, illetve abszorpció-deszorpció révén megoszlanak a mozgófázis (vivőgáz) és az állófázis (kromatográfias oszlop) között. Vivőgáznak héliumot és hidrogént is használnak, de leggyakrabban nitrogént, 1-2 ml perc⁻¹ áramlási sebesség és 0,2-0,8 mm belső átmérőjű kromatográfias oszlop mellett. Állófázis az előoszlop és az analitikai oszlop. Az előoszlop a szén-dioxidot és a nem-metán szénhidrogéneket választja le az analitikai oszlop szennyeződésének elkerülése érdekében. Az analitikai oszlop pedig elválasztja a szén-monoxidot a metántól és a hidrogéntől. A gáz mozgása hőmérsékletfüggő, ezért az oszlopokat egy hőmérséklet-szabályozott térben tartjuk.



1. ábra: A légköri CO mérésére használt GC vázlata (Novelli, 1999)

A gázkromatográfias mérések között is van különbség, ezt pedig az eltérő működésű elvű detektorok jelentik, amik általában eltérő anyagú kromatográfias oszlopokat (szilicagél vagy alumínium-oxid) is jelentenek. A leggyakrabban használtak: elektronbefogásos (ECD), higany-oxid/UV abszorpciós (HgO/UV), lángionizációs (FID) és a tömegspektrométer (MS) (Novelli, 1999). Ezekből is a leggyakrabban használt a szén-monoxid mérésekhez a FID.

3. táblázat - Légköri szén-monoxid keverési arányának meghatározására használt gázkromatográfiai eljárások kimutatási határa és pontossága (Novelli, 1999)

Detektor fajták	Kimutatási határ (ppb)	Pontosság (%)	Egyéb mért vegyületek
GC-ECD	25-80	1-8	CH ₄ CO ₂
GC-HgO	10	2-3	CH ₄ H ₂
GC-FID	1-2	0,5-2	H ₂
GC-MS		0,1-0,5	-

A GC-ECD nem a legalkalmasabb a légköri CO mérésére, mivel a szén-monoxid elektronok befogására kevésbé képes, így önmagában nem ad használható jelet. Ha a vivógázhoz N₂O-t adunk hozzá, akkor megfelelő szintre tudjuk növelni az érzékenységet (10 ppb), így a CO mellett a H₂ és a CH₄ egyaránt detektálható (Novelli 1999).

A GC-HgO technika esetén a kromatográfias elválasztás után a komponensek egy szilárd higany-oxidot tartalmazó kemencébe kerülnek. Itt a 200 °C fölött hőmérsékleten a redukált gázok oxidálódnak, ezalatt a higany-oxidból gáz halmazállapotú higany lesz (Mészáros, 2006). A higany-gőzt pedig UV abszorpciós eljárással lehet detektálni. Mivel a kromatográfias elválasztás a szén-monoxidtól elválasztja a metánt és a hidrogént, így azok mennyisége is meghatározható. Az 50-250 ppb CO-t tartalmazó légköri minták esetén a pontosság 0,5 % és 2 %, a kimutatási határ 1-2 ppb (Novelli, 1999).

GC-FID használata során, a szén-monoxid molekulákat először metánná kell redukálni, ezután pedig a keletkezett metán mennyiség kerül detektálásra (Mészáros, 2006). Ehhez általában hidrogénben gazdag, oxigénnel ellátott vivőgáz alkalmaznak (Novelli, 1999). Manapság már nem igazán használják ezt a módszert főként az alacsony 1-8 %-os analitikai pontossága miatt (Mészáros, 2006).

GC-MS alkalmazása azon alapul, hogy a gázállapotú ionizált molekulák képződése egyazon eljárásban történik, így a tömegspektrum adataiból a molekula szerkezetére lehet következtetni (Mészáros, 2006). Kimutatási határa az előző eljárásokhoz képest nagyobb, technikáktól függően 10^{-12} - 10^{-15} g, így olyan kisebb mennyiségű mintákból is lehetséges információt szerezni, amikből az előzőleg említett módszerekkel nem sikerülne (Mészáros, 2006).

2.6.2 Spektroszkópiai eljárás

A gázkromatográfias csoport mellett megkülönböztetünk egy másik nagyobb kategóriát, amit spektroszkópiai módszerek nevezünk és a molekula abszorpciós tulajdonságain alapul. A régebb óta jelen lévő eljárások a spektroszkópiai módszeren belül a nem-diszperzív infravörös spektroszkópia (NDIR), gázsűrő korrelációs spektroszkópia (GFCR), Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR), illetve a hangolható lézerdíódás abszorpciós spektroszkópia (TDLAS) (Mészáros, 2006). Az újabb műszerek már a legtöbb esetben „cavity ring-down” spektroszkópiai (CRDS) eljárást vagy „off-axis integrated cavity output” spektroszkópiai (OA-ICOS) eljárást használnak.

Tudjuk, hogy a szén-monoxid molekulák a meghatározott hullámhosszú infravörös sugárzást elnyeli. Novelli (1999) leírta, hogy az NDIR és a GFCR technika alapjaiban abból indul ki, hogy van egy sugárzónk, ami infravörös sugárzást bocsát ki. A legegyszerűbb esetben ez egy megfelelő hőmérsékletre melegített test. A minden irányú sugárzást a hatékonyság érdekében fókuszálják, majd a széles, folytonos spektrumból egy szűrő

segítségével csak azt a hullámhossz-tartományt engedik tovább, ami a CO mérés szempontjából érdekes. Az NDIR technika esetében a sugárzást két nyalábra bontják. Az egyik a mérendő gázt tartalmazó cellán (mérő-cella), a másik az ismert CO koncentrációjú gáz cellán (referencia-cellán) megy át. Mindkét cella esetében detektálják az áthaladt sugárzás intenzitását. Az ismert koncentrációjú gáz általi elnyelést összevetik az ismeretlen koncentrációjú gáz (levegő) elnyelésével, és ebből számítják ki az ismeretlen összetételű gáz CO koncentrációját. A GFCR technika ettől csak annyiban különbözik, hogy egyetlen cella mellett is működőképes. A sugárnyaláb útjában még a mérőcella előtt van egy cellákat tartalmazó forgó kerék, amelynek egyes cellái CO-mentes, illetve ismert CO-mennyiséget tartalmaznak. Ezeket a cellákat forgatják be a sugárnyaláb útjába. Így felváltva történik levegő- és referencia mérés lényegében ugyanabban a cellában. Az elnyelés különbségéből számolják a levegő CO koncentrációját. Az NDIR és a GFCR kimutatási határa 20-70 ppb között mozog, 5-10 %-os pontosság mellett (Novelli, 1999). A készülékek precízebben működnek nagyobb CO koncentrációk mellett, tehát elsősorban az északi féltekén.

Az FTIR típusú műszerek az NDIR-hez hasonlóan nem diszperzív sugárforrást használnak, viszont az FTIR széles hullámhossz tartományban egyidejűleg detektál (Mészáros, 2006). Egyszerre több olyan vegyület is megfigyelhető, amik az infravörös sugárzásban elnyelést mutatnak. A számunkra fontos spektrumokat pedig összehasonlítjuk a spektrális adatbázisokból származó gáz sztenderdek spektrumaival. A CO, CH₄ és a CO₂ koncentráció mérések pontossága hasonló a többi eljáráshoz, de 50 ppb CO esetében, összehasonlítva a HgO/UV módszerrel 1,5 %-os pontosság helyett, valamivel jobb, 0,5 %-os pontosság érhető el (Novelli 1999).

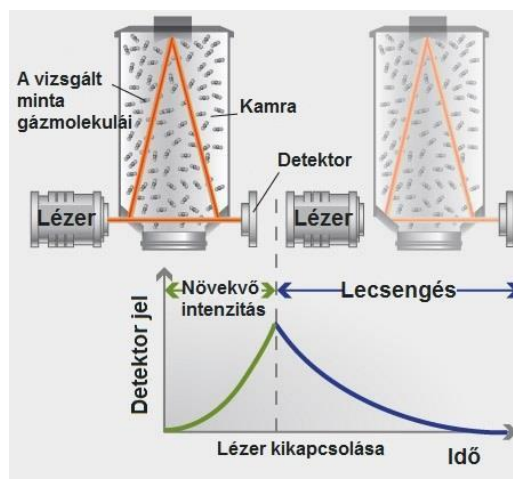
A TDLAS eljárás esetében egy olyan lézert használnak, ami vékony nyalábban nagy szelektivitású infravörös sugárzást bocsát ki. A lézersugár hullámhossza folytonosan változtatható, így széles spektrumtartomány átfogható vele, amibe több anyag elnyelési vonalai is beleeshetnek (CH₄, CO, CO₂, NO, NO₂) (Mészáros, 2006). Az ismert spektroszkópiai paraméterekkel, mért nyomással, a sugár útvonalhosszával és sugárzási intenzitással, abszolút koncentrációk is meghatározhatók (Novelli, 1999)

4. táblázat - Légköri szén-monoxid keverési arányának meghatározására használt spektroszkópai eljárások kimutatási határa és pontossága (Novelli, 1999)

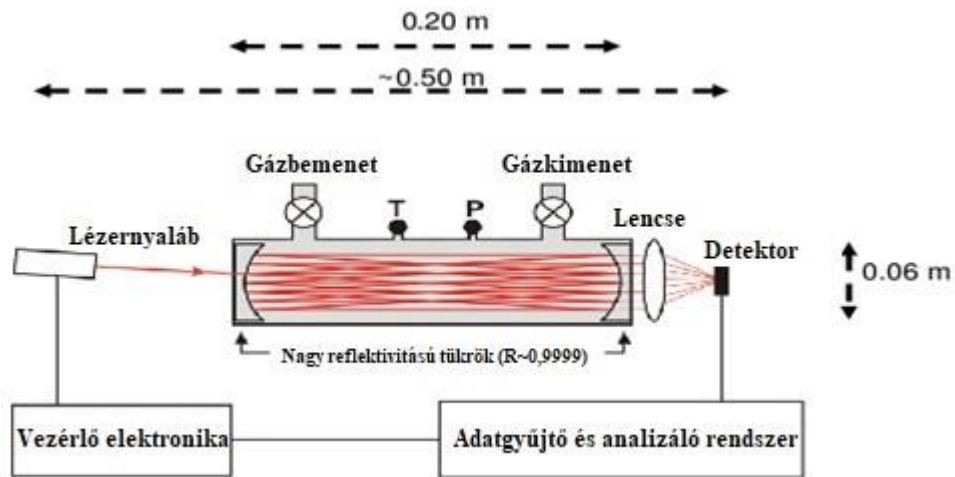
Detektor fajták	Kimutatási határ (ppb)	Pontosság (%)	Egyéb mért vegyületek
NDIR/GFCR	22-70	1-10	CH ₄ CO ₂
FTIR	1	0,5	CH ₄ CO ₂ N ₂ O H ₂ O
TDLAS	1	0,2	CH ₄ CO ₂ N ₂ O

A legújabb szén-monoxidot mérő műszerek legtöbb esetben már spektroszkópai eljárást használnak fel. (Zellweger, 2012). Ilyen például a már említett „cavity ring-down” spektroszkópia (CRDS), és az ehhez hasonló technikájú „Off-Axis Integrated Cavity Output” spektroszkópia (OA-ICOS).

Baer et al., (2012) alapján a CRDS megvalósításához szükséges egy gáz cella, amit erősen visszaverő tükrök határolnak egy rezonáns optikai üreg létrehozásának céljából. A mérés során lézerimpulzusokat bocsátanak a mérőcellába, ahol a tükröző felületekről visszaverődő lézerimpulzus fokozatosan elenyészik. Az impulzus időbeli gyengülését az egyik tükör mögött lévő fotodetektor méri. A mérés azon alapul, hogy mennyivel gyorsabban gyengül az a lézerimpulzus, amelynek hullámhossza egybeesik a szén-monoxid elnyelési hullámhosszával, ahhoz képest, amely hullámhosszon nincs elnyelő anyag. Azt figyelik, hogy mennyi idő után esik az energiája egy bizonyos szint alá, mert ez arányos az elnyelést végző CO-molekulák számával, végső soron a CO-koncentrációval. Az eljárás nagy előre lépésnek számított, mivel egy mérés sokkal kevesebb előkészítést és eszközt igényelt, emellett folyamatos és stabil, szemben a gázkromatográfiás eljárással.



2. ábra: A CRDS eljárás működési elve (10 – Picarro, Tóth, 2018)



3. ábra: Az ICOS eljárás sematikus rajza (9 – Research Gate)

Az „Off-Axis Integrated Cavity Output” spektroszkópia (*OA-ICOS*) hasonlóképpen működik a CRDS eljáráshoz képest, de itt a lézer a mérőcellában tengelyen kívüli szögben lép be (*Baer, 2012*). A cella itt nem egy rezonátor, ezért nincs szükség olyan precíz méretezésre, abszolút stabilan beépített lézerre, érzékelőkre, mint a CRDS esetében. Mivel a sugárnyaláb útvonala nem egy egyedi úthoz köthető, így kevésbé érzékeny a termikus változásokra és a rezgésekre (*Baer, 2012*).

2.6.3 Műholdas szén-monoxid mérések

A technológia fejlődésével a műholdas távérzékelés egyre fontosabb szerephez jut a tudományos és a gyakorlati életben. A műholdfelvételeket az élet más-más területein egyre sokrétűbben használják fel. Igaz erre a szén-monoxid globális vizsgálata, amit legjobban az űrből végzett mérések fednek le. A műholdakon GFCR technikával működő műszereket használnak (lásd 2.6.2 fejezetben), amikkel a Föld által kibocsátott sugárzást lehet mérni. A szén-monoxid mérés szempontjából a legfontosabb műhold a NASA által működtetett EOS (Earth Observing System) részét képező *TERRA* (6 – *MOPITT*). Az EOS a NASA űrprogramja, amely révén olyan műholdakat küldenek Föld körüli pályára, amely hosszútávon a szárazföld, a bioszféra, a légkör és az óceán globális megfigyelésére alkalmasak (7 – *EOS*). A *TERRA* műhold 2000 februárjától működik folyamatosan, ami hosszú távú adatrekordokat eredményez, amelyek alkalmasak számos alkalmazásra, például trendelemzésekre is (*Drummond et al., 2010*). Ennek fedélzetén öt, összesen tizenhatféle mérést végző műszert helyeztek el, aminek része a *MOPITT* (Measurement Of Pollution In The Troposphere) is (*Mészáros, 2006*). A *MOPITT* egy olyan mérő műszer, amelynek célja a légkör alsó részéről való ismereteink növelése és annak a megfigyelése, hogy milyen

folyamatok mennek végbe a troposzféra és a földi bioszféra között (6 – MOPITT). Ezen kívül jelentős hangsúlyt fektet a szén-monoxid eloszlására, szállítására, forrásaira, nyelőire a troposzférában. Továbbá az alsó légkör metán koncentrációjának az eloszlását is méri. A MOPITT műszer képes a CO függőleges koncentráció-profilok meghatározására, termális infravörös (TIR) és közeli infravörös (NIR) sugázmérések segítségével (Deeter et al., 2017). Ezáltal a szén-monoxid értékei három variációban is elérhetők: TIR, NIR, és multispektrális TIR-NIR-ben (Deeter et al., 2013). A TIR-NIR esetében a legnagyobb a vertikális felbontás és az érzékenység az alsó troposzférában (Deeter et al., 2017). Azonban hátrányai közé tartozik, hogy gyakran lépnek fel hibák az adatok kinyerésében, és torzíthat is. A TIR előnye, hogy magas időbeli stabilitást nyújt és változó megfigyelési helyzetekben (nappal, éjszaka, szárazföld, óceán) is hasonló teljesítményt szolgáltat (Deeter et al., 2013). A NIR pedig elsősorban a CO teljes légoszlopbeli mennyiségét határozza meg, kizárólag szárazföldi megfigyelések során (Deeter et al., 2017). A MOPITT-on maximum 22 x 22 km-es felbontás érhető el, a troposzférikus metánra és szén-monoxidra (Mészáros, 2006). Ezenkívül a szén-monoxid koncentrációt 5 km-es rétegekben is képes mérni, hogy segítse a kutatókat a gáz útvonalának megismerésében (6 – MOPITT). A műszer pontossága a szén-monoxid mérésekre 10 %, míg a metán mérésekre 1 % (Mészáros, 2006).

3. Adatfeldolgozás, eredmények

3.1 Mérési helyszín

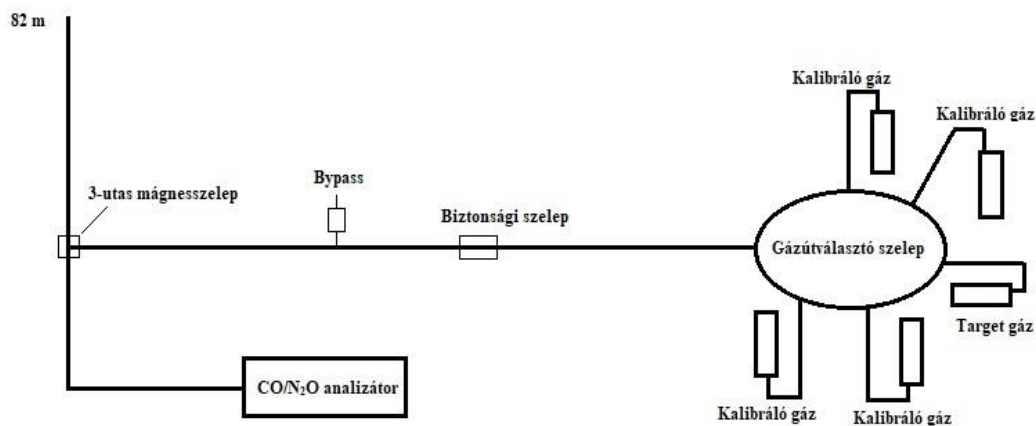
A munkámhoz felhasznált adatok a nyugat-magyarországi Hegyhátsáltól (tengerszint feletti magasság: 248 m) 1 km-re délkeleti irányban található meteorológiai műszerekkel felszerelt torony méréseiből származnak. A torony egy 117 méter magas TV/rádió adótorony, ami az Antenna Hungária Rt. tulajdonában áll. A tornyot főként mezőgazdasági területek (dominánsan kukorica, búza, repce) és kisebb részben pedig erdős területek, legelők veszik körül. Öntözési infrastruktúra nincs kialakítva a környező területeken. A környező területeken csak kisebb falvak találhatóak és számottevő ipari tevékenység sincs jelen. Ezenkívül a helyi utakon is kicsi a járműforgalom. Összességében a mérőállomás egy olyan területen helyezkedik el, ami a direkt szennyeződésektől mentes, így alkalmas a háttérszennyezettség mérésére (*Haszpra et al., 2018*). Azonban, a téli időszakban a Kárpát-medence egy sajátossága a hidegpárnás helyzetek kialakulása, ami annyit tesz, hogy egy anticiklon hatására csekély az átkeveredés. Az éjszaka folyamán kialakult köd nem oszlik fel, hanem megemelkedve egész nap fennmaradó stratust képez, ezáltal pedig a szén-monoxid koncentráció értéke is megnőhet, átkeveredés hiányában. A 11. ábrán 2017 januárjában jól látható egy hidegpárnás helyzet hatása a szén-monoxid koncentráció értékére.

A toronyban már 1994 óta mérik a szén-dioxid keverési arány függőleges profilját, ezenkívül még hőmérséklet-, nedvesség- és szélprofil is. 1997-től a szén-dioxid függőleges fluxusának mérése is elkezdődött. A további üvegházhatású gázok (CH_4 , N_2O , SF_6) koncentrációjának mérése gázkromatográfias műszerrel zajlott 2006-2015 között. A műszer egy Agilent 6890N típusú gázkromatográf volt. 2015-ben elindult az N_2O és CO egyidejű vertikális fluxusának eddy-kovariancia módszerrel való megfigyelése (8 – *HHS*).

3.2 A mérőrendszer működési elve

Hegyhátsálon 2015 óta zajlik az N_2O és a CO koncentráció egyidejű mérése „off-axis integrated cavity output” spektroszkópiai (OA-ICOS) eljárással működő Los Gatos Research műszerrel. Ennek működését a 2.6.2 fejezetben részleteztem. A dolgozatban szereplő elemzésemhez 2016. augusztus 1-től 2019. februárjáig terjedő mérések álltak rendelkezésemre. A 4. ábrán látható a mérőrendszer sematikus rajza. Az általános légköri mérések során a levegő a rendszerbe a 3-utas mágnesszelepen keresztül jut. A műszer 0,2

másodpercenként szolgáltat adatot a mérőcella hőmérsékletéről, a benne lévő gáz nyomásáról, ezenkívül még a vizsgált minta szén-monoxid, dinitrogén-oxid, és vízgőz koncentrációk értékéről. A szén-monoxid (ppm), a dinitrogén-oxid (ppm), és a vízgőz (ppm) is térfogat arányként jelennek meg a kimeneti adatrekordban. Mivel OA-ICOS technikával működő Los Gatos Research műszerbe az is be van építve, hogy az N₂O és a CO mellett egyidejűleg méri a vízgőz molarányt, így ennek köszönhetően a készülék száraz levegő alapján értelmezi a CO-t és az N₂O-t anélkül, hogy a minta szárítására lenne szükség. (4 – Los Gatos Research). Az adatfeldolgozás során száraz levegőre számított értékekkel dolgoztam. A 4. ábrán szereplő gázelosztó feladata, a kalibráló gázok és a target gáz tartályai közötti váltás. A kalibrálás során ezeket a gázokat kézzel vagy számítógépes programmal váltva, egymás után juttatjuk a rendszerbe. A 3-utas szelep és a gázelosztó között van egy biztonsági szelep (az esetleges szivárgások megelőzése végett) és egy úgynevezett "bypass", ami egy léghör felé nyitott cső, ami biztosítja, hogy a műszer felé áramló kalibráló gáz csak légköri nyomással áramolhat. A kalibrációs gázok koncentrációja ismert, ellenben a target koncentrációját nem ismerjük. A target gáz egy ismeretlen, de állandó összetételű gázkeverék, amit automatikusan 13 óránként mér a műszer. Az összetétel rendszeres megméréseiből következtethetünk a mérések pontosságára, a mérési skála esetleges elcsúszására.



4. ábra: CO/N₂O mérőrendszer sematikus rajza

3.3 Felhasznált adatok, módszertan

A műszer egy komplex mérőrendszer részét is képezi. Ennek adatgyűjtő számítógépe a műszer adatai mellett a mérőrendszer más paramétereinek értékét is rögzíti, egyebek között a gázút választó szelep állását is, mely információra az adatfeldolgozás során szükség van.

Az adatgyűjtő naponként, és napon belül 5 percnként, helyezi el külön fájlokban az adatrekordokat. A fájlokban 0,25 másodpercnként van 1-1 adat, mivel az adatgyűjtő a CO₂ fluxus (a CO₂ mérések 1997-ben kezdődtek Hegyhátsálon) mérésekhez igazodik. Az adatgyűjtő kérdezi le az N₂O/CO analizátort, így az másodpercnként egy adatot elveszít, de ez elhanyagolható.

Az adatok feldolgozására Python programozási nyelvben készítettem programot. Az adatfeldolgozásom első lépése az adatok minőségellenőrzése és a hibás adatok kiszűrése volt. Ezt követően perces adatokat állítottam elő a műszer és az adatgyűjtő méréseiből, majd a két forrás perces értékeit összevontam. Erre azért volt szükség mivel az analizátor folyamatosabban mér (nagyon ritkán van adathiány), mint az adatgyűjtő, viszont szükség volt a szelepállást mutató értékekre, ami csak az adatgyűjtő jelenít meg.

Mint ahogy minden műszer esetében az általam használt műszer mérőcellája is csak meghatározott hőmérséklet- és nyomás- tartományban szolgáltat megbízható értékeket. A tűréstartományon kívül eső mérési értékeket bizonytalanság miatt az adatellenőrzés során megjelöltem és az adatfeldolgozásból kihagytam. A tűréstartományt a gyártó nem adta meg, ezért meghatároztam, hogy feltételezhetően normál működés közben ezek a paraméterek milyen értékek között mozognak. Így kijelöltem azt a (szűk) tartományt, ami megfelelő működés esetén jellemzi a műszert, kiszűrve az esetleges áramszünetek vagy más technikai problémák következtében keletkező hibás adatokat. Ugyancsak kiszűrtem azokat az adatokat, amelyek feltételezhetően nem a légkör állapotát reprezentálják figyelembe véve a vízgőz- a szén-monoxid- és a dinitrogén-oxid koncentráció valószínű tartományát. Az analizátor mérőcellájának nyomására, hőmérsékletére, vonatkozó határokat, a vízgőz- a szén-monoxid- és a dinitrogén-oxid koncentráció reális értéktartományait az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat – A mérési paraméterek lehetséges értékei

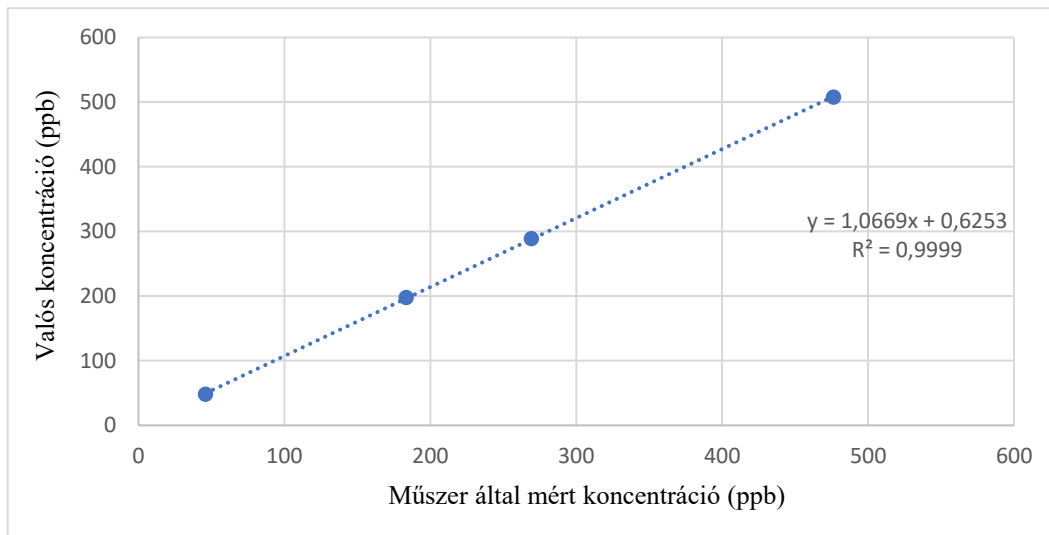
Paraméter	Elfogadási tartomány
Cellanyomás	84-87 Torr
Cellahőmérséklet	43-45 °C
Vízgőz	1000-30000 ppm
CO	0,07-0,7 ppm
N ₂ O	0,31-0,5 ppm

Az elemi méréseket minőségjelző kódokkal illetttem. A minőségjelző kód első bitje a cellanyomás, a második bit a cellahőmérséklet, a harmadik bit a vízgőz, negyedik bit a szén-monoxid, az ötödik bit pedig a dinitrogén oxid adat esetleges hibájára utal. A mért értékekből származtatott perces átlag koncentrációkhoz is hozzárendeltem egy minőségjelző kódot. Ha egy percen belül egyetlen elemi adat is hibás volt, akkor azt a perces adathoz tartozó minőségjelző kódban is megjelenítettem. Az 5. ábra szemlélteti a kódolás módját. Ez megmutatja, hogy az 5. táblázatban megadott érték-tartományon kívül esik-e a mért érték, így könnyen kiválogathatók a nem megfelelő adatok az adatbázisból. A vízgőz értéke abból a szempontból lehet fontos, hogy alacsony értéke a kalibrációs időszakokra és a kalibrációs gázokra utal, mivel ezek a gázok a nagyobb stabilitás érdekében, abszolút vízgőzmentes gázok, így a H₂O koncentráció lefelé kilép a tőrés tartományból.

0	0	0	1	0
Nyomás	Hőmérséklet	H ₂ O	CO ₂	N ₂ O

5. ábra: Az 1-es jelzi, ha a meghatározott tartományon kívülre esik a paraméter, 0 jelöli, ha a megadott tartományon belül van

A hibás értékek kiszűrése után a kalibrációs függvények meghatározása a következő lépés. Havonta átlagosan egyszer történik meg a műszer kalibrálása az állomáson. A vizsgált 30 hónap alatt 27 alkalommal történt kalibrálás. A kalibráció során négy ismert szén-monoxid koncentrációjú palackot kötnek a rendszerre. Minden kalibráló gáz mérése 8-15 percet vesz igénybe, viszont ebből az első öt perc, a műszerhez vezető csövek és a mérőcella teljes átöblítésére fordítódik. Az első öt perc mért értékeit ezért elhagyva számoltam átlagokat az egyes gázpalackokra és vontam kapcsolatokat a valós koncentrációk és a mért koncentrációk között. A műszer által mutatott értékek és a tényleges koncentrációk közötti kapcsolat jó közelítéssel lineáris, ezért kalibrációs függvényként a regressziós egyenes paramétereit határoztam meg. A 6. ábrán látható a 2018 július 30-i kalibrációból megállapított kalibrációs egyenes. Az y-tengelyen a tényleges koncentráció (ppb) szerepel, az x-tengelyen pedig a kalibráló gázok műszer által mért átlagkoncentrációja (ppb).



6. ábra: Kalibrációs egyenes

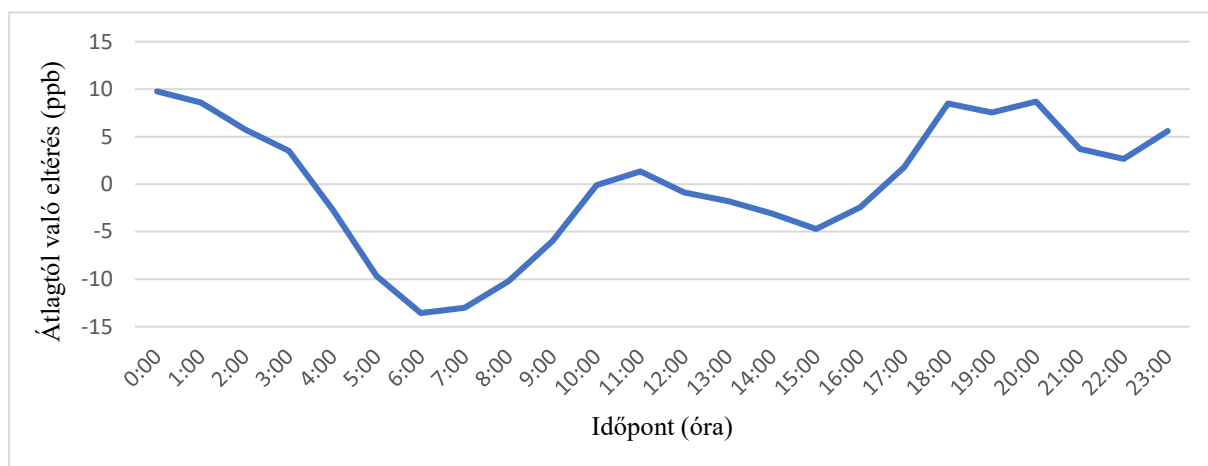
Az összes kalibrációs időpont esetén ezzel az eljárással határoztam meg az összefüggést. A kapott kalibrációs egyeneseket, az egymást követő két kalibrációs időpont közötti intervallum feléig tekintettem érvényesnek. Összesen 27 egyenes segítségével kalibráltam a mért adatokat. Az egymást követő kalibrációs egyenesek között az eltérés csekély, így a váltás időpontjánál a kalibrált adatokban nem észlelhető ugrás.

3.4 Adatelemzés

Az elemzéshez felhasznált adatbázisom kellőképpen folytonos volt, hosszabb távú leállások (pár nap) csak nagyon kevés esetben fordultak elő. A minőségjelző kódok segítségével csak azokat a perceket használtam fel, amelyek megfeleltek a kritériumoknak, hiszen csak ezek tükrözték megfelelően a valódi légköri viszonyokat. A perces adatok összevonásával, órás és napi átlagokat állítottam elő. Az átlagok előállításánál azt vettem figyelembe, hogy az adott időintervallumnak legalább a 2/3-a érvényes adatokat tartalmazzon, amelyiknél ennél kevesebb állt rendelkezésemre, ott nem számoltam átlagot azokra a terminusokra.

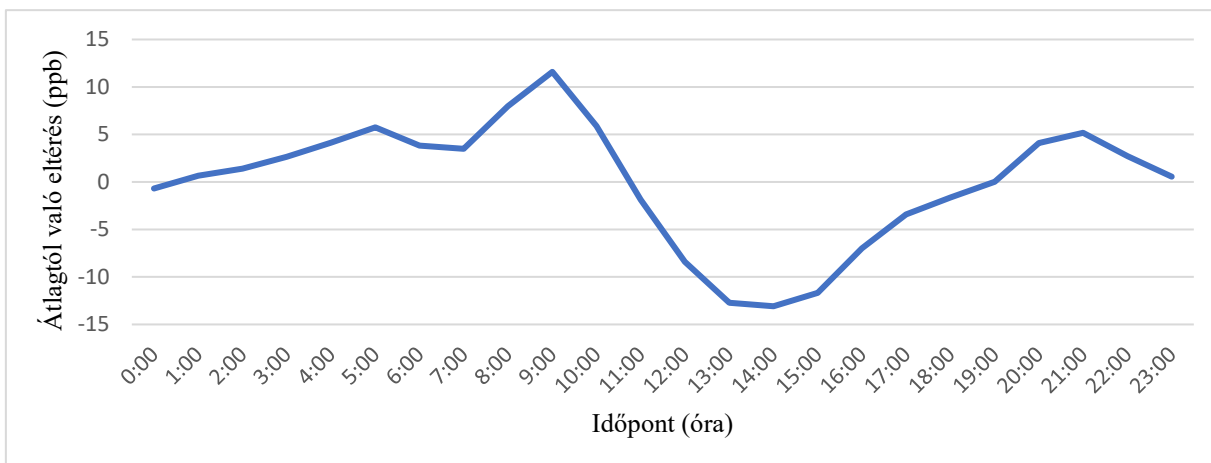
A 7-10. ábrákon az évszakok középső hónapjainak az átlagos napi menete rajzolódik ki, a napi átlaghoz viszonyítva. Kiszámoltam az órás és az adott napi átlagot, majd a kettő különbségéből kapott anomáliáknak a havi átlagát ábrázoltam. Mivel a 2016. és a 2019. év adatsora csonka volt, a vizsgálathoz csak a 2017. és 2018. évek adatait használtam fel annak érdekében, hogy az egyes hónapokra vonatkozó időbeli menetek ugyanarra az időszakra vonatkozzanak és így összehasonlíthatók legyenek.

A 7. ábrán azt láthatjuk, hogy az éjszakai nagyobb felhalmozódási potenciál, és az inkább nappalra koncentrálódó kibocsátás nagyjából kompenzálja egymást. A téli hónapokban nagy mennyiségű szén-monoxid kibocsátás a fűtésből származik, ezért van az, hogy elsősorban nappal és 16 óra (munkaidő vége) után, megemelkedik a koncentráció. Az éjjeli órákban a sekély éjszakai határréteg miatt, akár kis kibocsátás is magas koncentrációt tud előidézni az alacsony befogadó térfogat miatt.

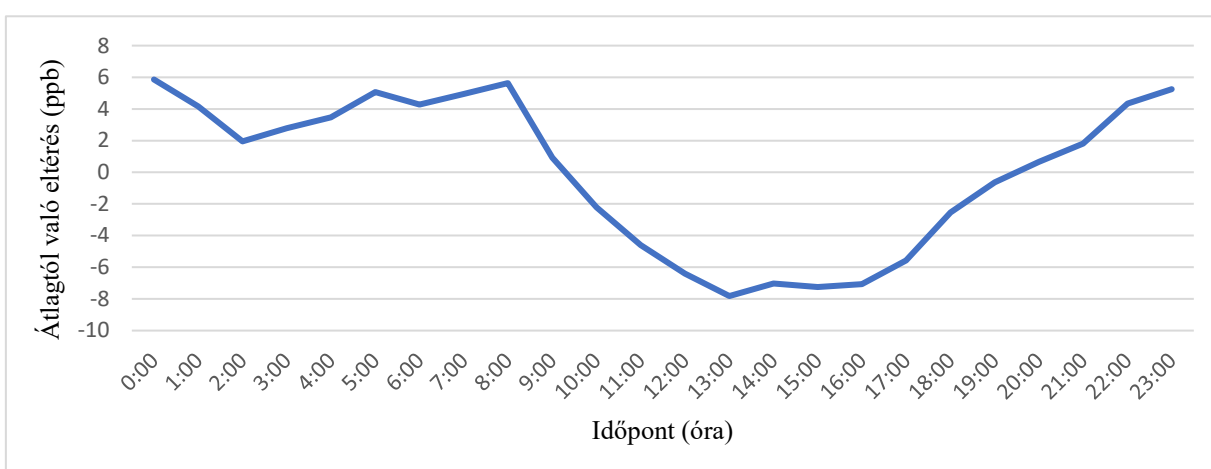


7. ábra: A szén-monoxid koncentráció januári átlagos relatív napi menete 2017-2018 évre

Április és október esetében (8. és 9. ábra) már inkább megjelenik egy jellegzetes napi menet. A kibocsátás ilyenkor a télhez képest összességében kevesebb, de időben valamivel egyenletesebben oszlik el, elsősorban a közlekedés, ipari folyamatok a dominánsak. Ezáltal az éjszakai felhalmozódás is jobban érvényesül, aminek a csúcsa napfelkelte körül van. Ezután megindul a konvekció, átkeveri a légműrt és leesik a koncentráció. Ehhez a jelenséghez hozzájárul a OH gyök, ami a CO fő kémiai nyelője. Ahogy azt már egy korábbi fejezetben kifejtettem az OH napfény hatására képződik, így nappal tud a CO-val reakcióba lépni.

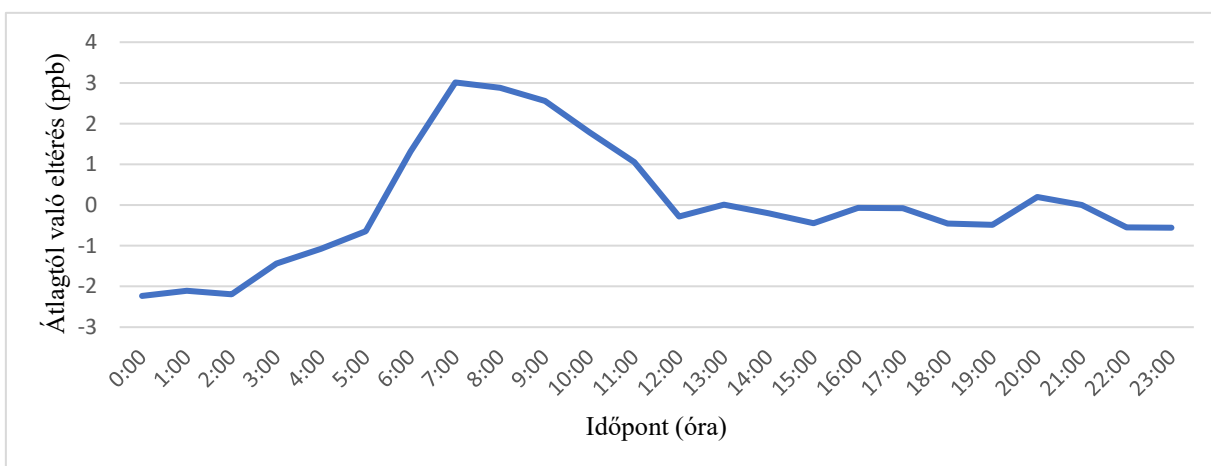


8. ábra: A szén-monoxid koncentráció áprilisi átlagos relatív napi menete, 2017-2018 évre



9. ábra: A szén-monoxid koncentráció októberi átlagos relatív napi menete 2017-2018 évre

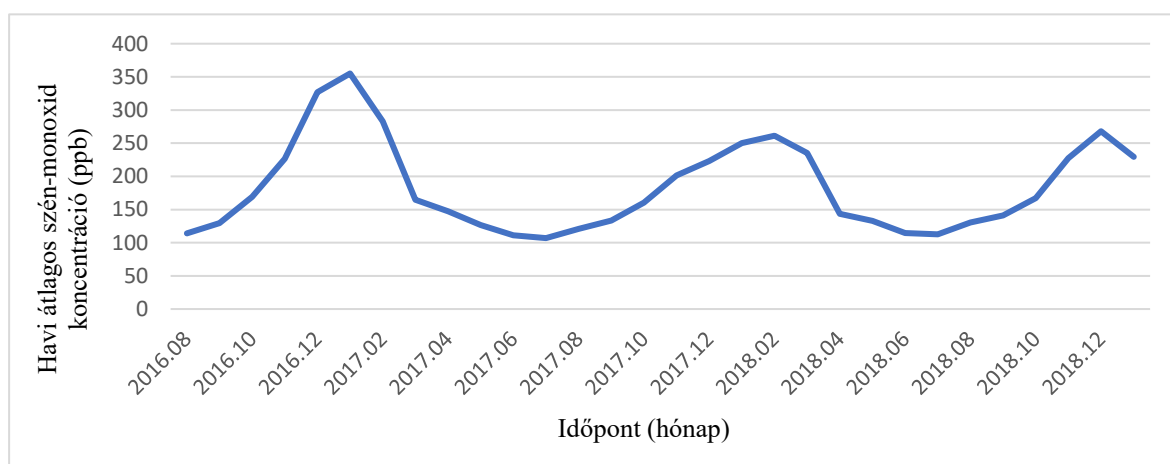
A júliusi ábrán látható alacsony éjszakai felhalmozódás, leginkább a csekély júliusi szén-monoxid kibocsátást jellemzi. Ezt a 11. ábra is alátámaszta, miszerint az elemzett 30 hónap esetében, a 2017-es és 2018-as júliusban volt a legalacsonyabb a szén-monoxid koncentráció.



10. ábra: A szén-monoxid koncentráció júliusi átlagos relatív napi menete 2017-2018 évre

A 11. ábrán láthatók a szén-monoxid 2016 augusztusától 2018 januárjáig tartó átlagos havi értékei. Az ábrán a napi átlagokból számított havi értékek láthatók. Az éjszakai mérés reprezentativitása alacsonyabb a nappali időszakhoz képest, mivel az éjszakát gyengébb átkeveredés jellemzi. Ebből kifolyólag az egésznapos átlagok helyett a 12-16 h-ig használtam fel az adatokat az elemzéshez (ekkor a legintenzívebb az átkeveredés). Az ábrán jól látszik a szén-monoxid szezonális változása. Télen magasabb, nyáron pedig egyértelműen alacsonyabb a koncentráció. Tavasztól kezdődően egyre intenzívebb a légköri átkeveredés, alacsonyabb a kibocsátás, ezek mellett pedig nyáron a fotokémiai folyamatok is jobban dominálnak, mint a téli hónapokban. Ez pedig több hidroxil-gyököt eredményez, amik elreagálnak a szén-monoxiddal. Az ábra szerint a legmagasabb koncentrációk decemberi-januári, a legalacsonyabbak júniusi-júliusi hónapokban fordulnak elő.

Egy magyarországi hosszútávú trend meghatározásához és elemzéséhez, még nem állt elég adat a rendelkezésemre, viszont így is nagy mennyiségű (~ 300 Gigabyte) adat feldolgozására volt szükség.

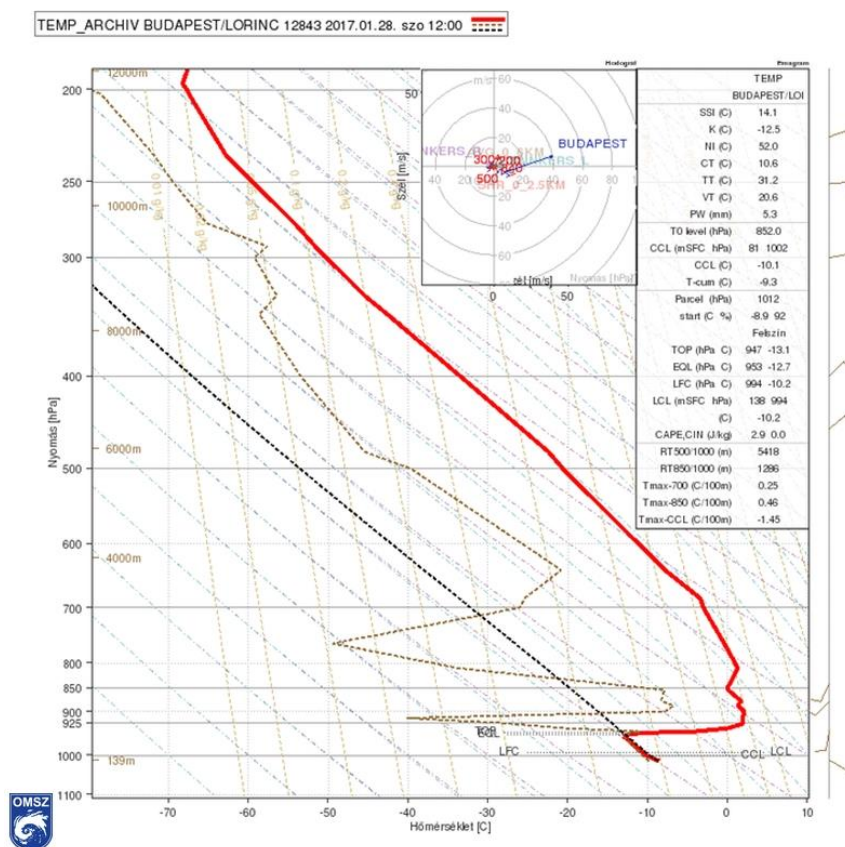


11. ábra: 2016.08.-2019.01-ig tartó átlagos havi szén-monoxid koncentráció (ppb)

A 11. ábrát megfigyelve, nagy különbséget látunk a 2017-es év januárja és a másik két év januárja között. Ezt a többitől kiemelkedő koncentráció értéket egy makroszinoptikus skálájú hatás váltotta ki, amihez még hozzájárult a Kárpát-medence jellegzetes téli időjárási sajátossága.

A téli időszakban az északi féltekén rendszerint két hidegpólus alakul ki: az egyik Szibéria, a másik pedig Kanada északi területei fölött. A hidegpólusok fölött felgyülemelő hideg légtömegek egy idő után egy irányba elmozdulnak és kialakulnak a sarki hidegkitörések, amelyek az érintett területeken extrém hideg időjárást okoznak. A

számunkra fontos hidegkitörés, déli irányba való elmozdulását az egész Ázsián áthúzódó hegységrendszer meggátolja, ezért a nyugat-kelet irányú áramlás miatt, elsősorban Kína felé irányulnak. Azonban a nyugati szelek övében létrejött ciklonrendszerek miatt, esetenként előfordul a nyugat irányú, Európa felé történő mozgás. Ez történt 2017 januárjában is. A legtöbb esetben a Kárpátok védelmet nyújt a lassúbb, taljközeli hideg légtömegek esetén, azonban ezt a makroszinoptikus skálájú hidegkitörés beáramlását nem tudta feltartóztatni. A legjellemzőbb medencehatás ebben a helyzetben a légköri inverzió (hidegpárna) kialakulása. A betörés után a hideg levegő megült az alsó néhány százméteres rétegben és hiába áramlott be a melegebb levegő, nem tudta átkeverni a hideg réteget (11 – OMSZ). Így alakult ki például a január 28-ai vertikális hőmérsékleti profil, amit a 12. ábra szemléltet. A felszín közelében -8 °C volt, míg az 1000 méteres magasságban átment pozitívba a hőmérséklet.



12. ábra: A légállapot vertikális profilja 2017. január 29. 12 UTC-kor (11 – OMSZ)

Összességében a többszöri hidegpárnás helyzetek kialakulásával, a markáns átkeveredés hiányában, a Kárpát-medencét ebben a hónapban teljes egészében beterítette a szennyező anyagok sokasága, ideértve a szén-monoxidot is. Ez magyarázhatja a kiugró koncentráció értéket 2017 januárjában.

4. Összefoglalás

A szakdolgozatomban bemutattam a szén-monoxid kémiai jellemzőit, általános hatásait, a különféle antropogén és természetes forrásait, illetve azokat a nyelő folyamatokat, amelyek légköri szén-monoxidot eltávolítják. Legbefolyásosabb források a nem-metán illékony szerves anyagok (NMVOC) csoportjának oxidációs folyamatai, de az antropogén tevékenységek és a biomassa égetés és égése is jelentős mennyiségű szén-monoxidot bocsátanak ki. Nyelő folyamatok esetében is a kémiai folyamatok dominálnak, hiszen a legnagyobb szén-monoxid nyelő az igen reaktív hidroxil-gyök, ami egy nagyon fontos üvegházhatású gáz, a metán légkörből való kivonásáért is felelős.

A szén-monoxid mennyiségének légköri mérésével sokáig nem foglalkoztak, pedig későbbi vizsgálatok során megállapították, hogy már az ipari forradalom óta fokozatosan emelkedett a koncentrációja. Az 1950-es évektől kezdve jelentek meg a szén-monoxidot mérő műszerek, amik segítségével felfedezték, milyen fontos szerepe is van a légkörben. A szén-monoxiddal is reagáló hidroxil-gyök meghatározó szerepet tölt be a légkör oxidáló képességében, ezáltal a szén-monoxid hatással tud lenni a légkör összetételére. Ezért is elengedhetetlen, hogy a felszíni mérések mellett, műholdas megfigyelés is foglalkozzon a globális szén-monoxid mérleggel.

Magyarországon, azon belül Hegyhátsálon, 2015 óta folyamatosan van szén-monoxid mérés, 2016-ban pedig egy adatgyűjtővel lett kiegészítve, megkönnyítve a kalibrációs időszakok nyomon követését. 82 m magas tornyon végzik a méréseket, „off-axis integrated cavity output” spektroszkópiai eljárással. A műszer 0,2 s-ként szolgáltat adatot a szén-monoxid és a dinitrogén-oxid koncentrációról. Az adatfeldolgozás során elvégeztem az adatok ellenőrzését és kalibrációját, majd egy tudományos elemzésre alkalmas adatbázist hoztam létre.

Megállapítottam az átlagos napi meneteket az egyes hónapok (az évszakok középső hónapjait) esetében. Október és április vizsgálatokor egyértelmű jellegzetes napi menet rajzolódik ki. Napközbeni minimumok és éjszakai maximumok jellemezték ezeket a hónapokat. Január esetében a nappali kiugrásokat a fűtés során kibocsátott szén-monoxiddal lehet magyarázni, továbbá a téli gyenge légköri átkeveredés miatt ilyenkor mérhetjük a legnagyobb értékeket. A júliust a többi hónaphoz képest rendkívül alacsony éjszakai felhalmozódás jellemzi, amit az alacsony szén-monoxid kibocsátás magyarázhat. A mérési

adatok havi átlagainak ábrázolásakor is egyértelmű menet rajzolódik ki téli maximumokkal és nyári minimumokkal. Az adatbázisomban a 2017-es januári hónap kiugró értéket mutatott a többi év januári értékéhez képest. Ezt az akkori időjárási folyamatok összessége, és a hidegpárnás helyzetek kialakulása eredményezte. Az esetleges további kutatásokra, hosszabb távú elemzésre, trend meghatározására a jövőben kerülhet sor.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni dr. Haszpra Lászlónak, a sok segítséget és támogatást, amit a szakdolgozatom elkészítéséhez nyújtott. Számtalan építő ötletet kaptam, ezenkívül az eredmények vizsgálatában és azok tárgyalási módjában is támogatta munkámat.

Valamint szeretném megköszönni a tanszéki konzulensemnek dr. habil Barcza Zoltánnak a segítségét és munkám ellenőrzését.

A szakdolgozatban felhasznált adatok az Országos Meteorológiai Szolgálat és a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközponttól származnak.

Irodalomjegyzék

- Baer, B., Gupta, M., Lee, B., Berman, E., 2012: Environmental and Atmospheric Monitoring Using Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS), American laboratory, 44, 22-23.
- Bakwin, P.S., Tans, P.P., Novelli, P.C., 1994: Carbon monoxide budget in the northern hemisphere, Geophysical Research Letter, 21, 433-436.
- Chan, A. S. K. and Steudler, P. A., 2006: Carbon monoxide up-take kinetics in unamended and long-term nitrogen-amended temperate forest soils, FEMS Microbiology Ecology, 57, 343–354
- Conte, L., Szopa, S., Séférian, R., Bopp, L., 2019: The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere, Biogeosciences, 16, 881–902.
- Deeter, M. N., Martínez-Alonso, S., Edwards, D. P., Emmons, L.K., Gille, J. C., Worden, H. M., Pittman, J. V., Daube, B. C., and Wofsy, S. C., 2013: Validation of MOPITT Version 5 thermal-infrared, near-infrared, and multispectral carbon monoxide pro-file retrievals for 2000–2011, Journal of Geophysical Research, 118, 6710–6725.
- Deeter, M.N., Edwards, D.P., Francis, G.L., Gille, J.C., Alonso, S.M., Worden, H.M., and Sweeney, C., 2017: A climate-scale satellite record for carbon monoxide: the MOPITT Version 7 product, Atmospheric Measurement Techniques, 10, 2533–255.
- Derendorp, L., Quist, J. B., Holzinger, R., and Röckmann, T., 2011: Emissions of H₂ and CO from leaf litter of Sequoiadendron giganteum, and their dependence on UV radiation and temperature, Atmospheric Environment, 45, 7520–7524.
- Drummond, J. R., Zou, J., Nichitiu, F., Kar, J., Deschambaut, R., and Hackett, J., 2010: A review of 9-year performance and operation of the MOPITT instrument, Advances in Space Research., 45, 760–774.
- Edwards, D.P., Emmons, L.K, Haughustaine, D.A., Chu, D.A., Gille, J.C., Kaufman, Y.J., Pétron, G., Yurganov, L.N., Giglio, L., Deeter, M.N., Yudin, V., Ziskin, D.C., Warner, J., Lamarque, J.F., G. L. Francis, G.L., Ho, S.P., Mao, D., Chen, J., Grechko, E.I., and Drummond J.R., 2004: Observations of carbon monoxide and aerosols from the Terra satellite: Northern Hemisphere variability, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 109, Issues D24.
- Gelencsér, A., Molnár, Á., Imre K., 2012: Az éghajlatváltozás okai és következményei, Pannon Egyetem, 51.
- Gros, V., Peeken, I., Bluhm, K., Zöllner, E., Sarda-Esteve, R., Bonsang, B., 2009: Carbon monoxide emissions by phytoplankton: evidence from laboratory experiments, Environmental Chemistry., 6, 369.
- Guenther, A., Hewitt, C.N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W.A., Pierce, T., Scholes, R., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J. and Zimmerman, P., 1995: A global model of natural volatile organic compound emissions, Journal of Geophysical Research, 100, 8873-8892.
- Guenther A., Greenberg J., Helmig, D., Klinger, L., Vierling, L., Zimmerman, P, Geron, C., 1996: Leaf, branch, stand and landscape scale measurements of volatile organic compound fluxes from U.S. woodlands, Tree Physiology 16, 17-24.
- Haan, D., Raymond, D., 1998: Ice core record of CO variations during the last two millennia: atmospheric implications and chemical interactions within the Greenland ice, Tellus B 50, 253-262.
- Haszpra, L., Hidyc, D., Taligás, T., Barcza, Z., 2018: First results of tall tower based nitrous oxide flux monitoring over an agricultural region in Central Europe, Atmospheric Environment, 176, 240-251.
- IPCC, 1996: Climate change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Eds.: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callender, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., and Maskell, K.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572.

- IPCC, 2001: Climate change 2001: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Eds: *Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A.*) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (Eds: *Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., V. Bex, V., and Midgale P.M.*) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 714
- Isaksen, I., Hov, O.*, 1987: Calculation of trends in the tropospheric concentration of O₃, OH, CO, CH₄ and NO_x, *Tellus*, 39B, 271-285.
- Khalil, M.A.K. Rasmussen, R. A.*, 1990. The global cycle of carbon monoxide: trends and mass balance, *Chemosphere* 20, 227-242.
- King, G. M. and Weber, C. F.*, 2007: Distribution, diversity and ecology of aerobic CO-oxidizing bacteria, *Nature Reviews Microbiology*, 5, 107–18.
- King, J. Y., Brandt, L. A., and Adair, E. C.*, 2012: Shedding light on plantlitter decomposition: advances, implications and new directions in understanding the role of photodegradation, *Biogeochemistry*, 111, 57–81.
- Liu, L., Zhuang, Q., Zhu, Q., Liu, S., Asperen, H.V., and Pihlatie, M.*, 2018: Global soil consumption of atmospheric carbon monoxide: an analysis using a process-based biogeochemistry model, *Atmospheric Chemistry Physics*, 18, 7913–7931.
- Mafusire, G., Annegarn, H.J., Vakkari, V., Beukes, J.P., Josipovic, M., van Zyl, P.G., Laakso, L.*, 2016: Submicrometer aerosols and excess CO as tracers for biomass burning air mass transport over southern Africa, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 10262-10282.
- Mészáros T.*, 2006: A légköri szén-monoxid mérlege és trendje Európában, PhD értekezés, Pannon Egyetem, elérési útvonal: http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2006/Meszarus_Tamas_dissertation.pdf
- Migeotte, M., Neven, L.*, 1952: Recents progres dans l'observation du spectra solaire a la station scientifique du Jungfrau hoch, *Société Royale des Sciences de Liege* 12, 165-169.
- Novelli, P.C.*, 1999: CO in the atmosphere: measurement techniques and related issues, *Chemosphere: Global Change Science* 1, 115-126.
- Pacyna, J.M., Graedel, T.E.*, 1995. Atmospheric emission inventories: status and prospects, *Annual Review of Energy and the Environment* 20, 265-300.
- Penney, G.D.*, 2000: Carbon Monoxide Toxicity, CRC Press, Boca Raton-London-New York-Washington D.C., 5. old.
- Reumutha, G., Alharbib, Z., Houschyard, K. S., Kimb, B., Siemersa, F., Fuchse, P.C., Griebb, G.*, 2018: Carbon monoxide intoxication: What we know, *BURNS*, 45, 526-530
- Ribeiro, I.O., Andreoli, R.V., Kayano, M.T., Sousa, T.R, Medeiros, A.S., Godoi, R.H.M, Godoi, A.F.L., Duvoisin, S., Martin, S.T., Souza R.A.F.*, 2018: Biomass burning and carbon monoxide patterns in Brazil during the extreme drought years of 2005, 2010, and 2015, *Environmental Pollution*, 243, Part B, 1008-1014.
- Ryan, N. J., Kinnison, D.E., Garcia, R.R., Hoffmann, C.G., Palm, M., Raffalski, U., and Notholt, J.*, 2018: Assessing the ability to derive rates of polar middle-atmospheric descent using trace gas measurements from remote sensors, *Atmospheric Chemistry Physics*, 18, 1457–1474.
- Saunio M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregon, A., Ciais, P., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., Janssens-Maenhout, G., Tubiello, F. N., Castaldi, S., Jackson, R. B., Alexe, M., Arora, V. K., Beerling, D. J., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Brovkin, V., Bruhwiler, L., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Frankenberg, C., Gedney, N., Höglund-Isaksson, L.*

- Ishizawa, M., Ito, A., Joos, F., Kim, H. S., Kleinen, T., Krummel, P., Lamarque, J. F., Langenfelds, R., Locatelli, R., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., Marshall, J., Melton, J. R., Morino, I., Naik, V., O'Doherty, S., Parmentier, F. J. W., Patra, P. K., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Pison, I., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Riley, W. J., Saito, M., Santini, M., Schroeder, R., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, P., Takizawa, A., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Viovy, N., Voulgarakis, A., van Weele, M., van der Werf, G. R., Weiss, R., Wiedinmyer, C., Wilton, D. J., Wiltshire, A., Worthy, D., Wunch, D., Xu, X., Yoshida, Y., Zhang, B., Zhang, Z., Zhu, Q., 2016: The global methane budget 2000–2012, *Earth System Science Data*, 8, 697–751.
- Stubbin, A., Uhera, G., Kitidisa, V., Lawb, C.S., Upstill-Goddarda, R.C., Woodward, E.M.S, 2006: The open-ocean source of atmospheric carbon monoxide, *Deep-Sea Research II*, 53, 1685–1694.
- Tóth, A., 2018: *A metán légköri koncentrációjának alakulása Magyarország felett, Bsc szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem.*
- van Asperen, H., Warneke, T., Sabbatini, S., Nicolini, G., Papale, D., and Notholt, J. 2015: The role of photo- and thermal degradation for CO₂ and CO fluxes in an arid ecosystem, *Biogeosciences*, 12, 4161–4174.
- Waring, R.H., Steventon, G.B., Mitchell, S.C., 2007: *Molecules of death*. Imperial College Press, London, 38. old.
- Yin, Y., Chevallier, F., Ciais, P., Broquet, G., Fortems-Cheiney, A., Pison, I. and Saunois, M., 2015: Decadal trends in global CO emissions as seen by MOPITT, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 13433-13451.
- Yurganov, L.N., Grechko, E.I., Dzola, A.V., 1999: Zvenigorod carbon monoxide total column time series: 27 year of measurements, *Chemosphere: Global Changing Science* 1, 127-136.
- Zander, R., Demoulin, P., Ehhalt, D.H., Schmidt, U., Rinsland, C. P., 1989: Secular increase of total vertical column abundance of carbon monoxide above Central Europe since 1950. *Journal of Geophysical Research* 94, 11021-11028.
- Zellweger, C., Steinbacher, M., Buchmann, B., 2012: Evaluation of new laser spectrometer techniques for in-situ carbon monoxide measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2555–2567.

Internetes források

[1 – University of Liverpool]

<http://www.chemtube3d.com/orbitalsCO.htm>

[2 – Compendium of Chemical Terminology]

<http://goldbook.iupac.org/pdf/goldbook.pdf>

[3 – Earth Observatory]

https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOP_CO_M

[4 – Los Gatos Research]

<http://www.lgrinc.com/analyzers/overview.php?prodid=20&type=gas>

[5 – UNFCCC]

<https://unfccc.int/process/the-convention/what-is-the-convention/status-of-ratification-of-the-convention>

[6 – MOPITT]

<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/mopitt>

[7 – EOS]

<https://eospsa.nasa.gov/content/nasas-earth-observing-system-project-science-office>

[8 – HHS]

<http://nimbus.elte.hu/hhs/index.html>

[9 – Research Gate]

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-overview-of-the-integrated-cavity-output-analysis-ICOS-technique-used-in-the_fig1_26638857

[10 – Picarro]

<https://www.picarro.com/company/technology/crds>

[11 – OMSZ]

https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1805