

IDŐJÁRÁS

Az Országos Meteorológiai Szolgálat folyóirata. 95. évf. 2-3. szám, 1991. március-június
Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 95 No. 2-3 March-June 1991

Ózon képződése és eloszlása nagy szennyezőforrások környezetében

Bérces Tibor és Turányi Tamás

MTA Központi Kémiai Kutató Intézet, 1525 Budapest, Pf. 17.

A troposzférában található ózon egy része sztratoszférikus eredetű, más része szerves vegyületek NO_x által katalizált fotooxidációjának terméke. Az ózon koncentráció nagyságát, térbeli és időbeli eloszlását meghatározzák az esődleges légszennyezők emissziójának erőssége, az emisszió összetétele és a meteorológiai tényezők. Bemutatjuk a Budapest és környékére vonatkozó mérési és számolási eredményeket. A modellszámítások szerint Budapest környékének ózon szennyezettsége igen jelentős. A modell-számítások eredményei azt mutatják, hogy a szennyezettség várható mértéke a jövőben lényegesen javulhat a kétütemű gépjárművek számának csökkenésével.

*

Formation and distribution of ozone around large pollution sources. Tropospheric ozone has two origins: (i) transport from the stratosphere and (ii) O_3 is a product of the NO_x catalyzed photooxidation of airborne organic compounds. The concentration and the spatial and temporal distribution of ozone is determined by the intensity of the emission of primary pollutants, by the composition of emitted gases and by meteorological factors. Results of measurements and of model calculations for Budapest and for the surrounding areas are presented. The model calculations show that the rural areas near Budapest are highly polluted by ozone. Results of model calculations also indicate that the level of pollution expected in the future may improve significantly with the decrease of the number of vehicles equipped with two-stroke engines.

Bevezetés

A troposzférikus ózon problémára először e század közepén figyeltek fel. A történet 1944-ig nyúlik vissza, amikor Los Angeles környékén növényi kultúrák nagyfokú károsodását észlelték (Middleton et al., 1950). Rövidesen felismerték, hogy a károsodás egy újfajta, addig ismeretlen levegőszennyeződéstől ered, amit gyakran „los angelesi szmog”-nak, szabatosabban „fotokémiai légszennyezés”-nek neveznek. Ennek legfőbb ismérve a légszennyezés oxidatív jellege, ami elsősorban az ózontól ered. Már az 1950-es évek elején Haagen-Smit és munkatársai (1951) megállapították, hogy az ózon a troposzférában a napsugárzás hatására az illékony szerves vegyületek (valamint CO) és a nitrogén-oxidok ún. fotooxidációs reakcióiban képződik. Ezt a folyamatot az alábbi egyenlettel szimbolizálták:



Itt NMOC a nem-metán organikus vegyületeket és NO_x a nitrogén-oxidokat (NO és NO_2) jelöli.

III. táblázat:
A teljes ózontartalom trendértékei néhány közép-európai állomás adataiból számolva
(Borbély, 1977 nyomán)

	Hradec Kralove (Cs)	Potsdam (D)	Oxford (GB)	Arosa (Ch)	Belsk (Pl)
%/10év	+0,65	-7,01	+2,15	+0,93	-0,69

trendet. Végezetül meg kell említeni, hogy a mérőműszer hibája $\pm 2\%$ körüli. Véleményünk szerint az említett három körülmény együttesen már létrehozhat ilyen mérvű pozitív emelkedő trendenciát. Miután a Közép-Európa térségére vonatkozó adatok is hasonlóak, feltételezhető, hogy a magyarországi gyenge emelkedő ózon-trend reális. Más szavakkal: elfogadhatjuk, hogy a mért teljes ózon-tartalom 20 éves adatsorában csökkenés közvetlenül nem tapasztalható. Az április havi negatív trend viszont kisebb ózon csökkenésre utal. Valószínűnek tűnik, hogy az Északi-sarkvidék peremterületein, így esetleg Közép-Európában is ilyen változásokat a jövőben egyre jelentősebb mértékben fognak regisztrálni.

IRODALOM

Borbély, E., 1977: A teljes ózontartalom trendjének változása Európában. *Időjárás* 81, 94-99.

Putaki, M., 1981: Az ultraviola napsugárzás és hatásai. *OMSZ Kiseb kiadványai* 50, 38-51.

Putaki, M., 1987: A teljes ózonneménység meghatározásának eredményei, problémái és perspektívái. *OMSZ Beszámoló az 1984-ben végzett tudományos kutatásokról*, 62-73.

Mészáros, E., 1977: *A levegőkémia alapjai*. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Tanulmányok hazánk környezeti állapotáról, 1989: *A levegő*. Környezetgazdálkodási Intézet, 77-101.

1. A troposzférikus ózon forrásai

A troposzférában megfigyelhető ózonok kétféle forrását szokták feltételezni. Ezek (1) Az ózon képződése a troposzférában napfény hatására nitrogén-oxidok és szénhidrogének, vagy szén-monoxid reakciójában; (2) A sztratoszférában képződött ózon bekeveredése a troposzférába.

Számos megfigyelés bizonyítja, hogy a troposzférában található ózon egy része a sztratoszférából származik. Az egyik ilyen bizonyíték, hogy az északi féltekén a troposzférában az ózon koncentráció nő a magassággal. Emellett számos jel utal a troposzférikus eredetre is.

A földfelszín közelében esetenként észlelet 100 ppb fölötti ózon-koncentrációk csak az ózonnak helyben történő képződésével értelmezhetők. Európa és Észak-Amerika egyes sűrűn lakott területein, néhány száz kilométeres körzetben a nyári hónapokban észlelhető tartósan magas ózon-koncentrációk is egyértelműen az antropogén emisszió alapuló fotokémiai ózon-képződést bizonyítják.

A troposzférában található ózon kétféle forrásának jelentősége helyről-helyre és időről-időre eltérő. Például az északi féltekén, a jelentős antropogén NMOC és NO_x emisszió miatt a troposzférikus fotokémiai ózon forrása jelentősebb. A továbbiakban a lokális, fotooxidációs ózonképződés néhány kérdésével fogunk foglalkozni.

2. A lokális ózonszintek kialakulását meghatározó főbb tényezők

A földközeli ózonképződéshez az elsődleges légszennyezőknek nevezett anyagok, NO_x, CO, szénhidrogének és egyéb szerves anyagok emissziója szükséges. Miután ezek az anyagok a légkörbe kerültek, az eloszlásukat elsősorban meteorológiai tényezők által meghatározott transzport folyamatok alakítják. A transzport folyamatokkal egyidőben kémiai folyamatok is lejátszódnak és a kémiai reakciók révén képződnek az ún. másodlagos légszennyezők, mint amilyen például az ózon is. A lokális ózonszintek kialakulását meghatározó főbb tényezők közül tehát a következő hármat lehet kiemelni:

- emisszió,
- meteorológiai tényezők,
- fotokémiai átalakulás.

2.1. Emisszió

A fotokémiai légszennyezést okozó elsődleges szennyezők természetes és antropogén eredetűek lehetnek. Ezek aránya a különféle elsődleges légszennyező anyagoknál eltérő.

Nem-metán szénhidrogének (NMHC)

Becslések szerint Európában egy-egy nagyobb területen a természetes és emberi tevékenységgel összefüggő NMHC kibocsátás összemérhető. A nagy szennyezőforrásokat képező sűrűn lakott területeken az antropogén források mellett a természetes eredetű szénhidrogén emisszió elhanyagolható. Az emberi tevékenységtől eredő kibocsátás több mint 50 %-a közlekedéssel és a hozzákapcsolódó kőolaj feldolgozással, illetve gáz előállításával kapcsolatos. Kb. 25 %-ot tesz ki a kémiai ipar tevékenységeként jelentkező oldószer emisszió.

CO emisszió

Hasonlóan mint a szénhidrogénekénél, a szén-monoxid esetén is összemérhető a természetes és mesterséges eredetű emisszió. Az emberi tevékenységgel összefüggő hozzájárulás döntő része különféle energiahordozók tökéletlen elégésétől származik, ez a fejlettebb országok esetében motorok kipuffogózáival kerül a légkörbe.

NO_x emisszió

Az NO_x emisszió is lehet természetes eredetű és emberi tevékenységgel összefüggő. Az antropogén NO_x különféle égési és oxidációs folyamatokból származik. A magas hőmérsékletű égési folyamatokban a levegő nitrogénje oxidálódik és elsősorban NO képződik.

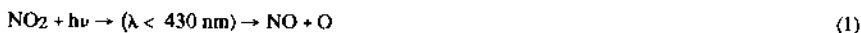
2.2 Meteorológiai tényezők

A közismert londoni szmog események alkalmával olyan meteorológiai körülmények álltak fenn, amelyek mellett a kibocsátott szennyezőanyagok a Föld közelében elhelyezkedő vékony légrétegben halmozódtak fel és ez okozta a jelentős szennyezőanyag koncentrációkat. A fotokémiai légszennyezés esetén a másodlagos levegőszennyezők koncentrációját is jelentősen befolyásolják a meteorológiai viszonyok.

A troposzférában a hőmérséklet általában csökken a magassággal. Az ilyen „normálisan” viselkedő légkörben lehetőség van arra, hogy a földközeli melegebb levegő felfelé áramoljon és így a levegő hatékonyan elkeveredjen. Meghatározott körülmények között bizonyos magasságokban azonban megjelenhet fordított hőmérsékleti gradiens is, létrehozva az ún. „inverziós réteget”-et, amely mintegy lehatárolja az alatta elhelyezkedő viszonylag jól elkevert légréteget. Az inverziós réteg jelentősége a levegőszennyezés szempontjából nyilvánvaló: meggátolja a levegőszennyezők elkeveredését az egész troposzférában és ezáltal nagy szennyezőanyag koncentrációk kialakulását eredményezi a földközeli rétegekben.

2.3 Kémiai átalakulások

Az ózon képződéshez vezető kémiai folyamatokat a nitrogén-dioxid fotodisszociációja vezeti be



amelyet a napfény 430 nm-nél rövidebb hullámhosszú komponensei válthatnak ki. Ebben a reakcióban képződnek azok az oxigénatomok, amelyek oxigén molekulával kombinálódva ózont képeznek:



Ez a reakció a légköri ózonképződés egyetlen ismert útja. Az így képződött ózon azután az (1) reakcióban keletkezett vagy emisszióból származó nitrogén-monoxiddal gyorsan reagál és eközben egy molekula nitrogén-monoxid NO₂-vé oxidálódik:



Ez az ózon fogyasztó lépés az oka annak, hogy jelentősebb ózon szintek nem alakulhatnak ki mindaddig, amíg jelentős a nitrogén-monoxid koncentráció a légkörben.

Az (1)–(3) reakciók kedvező körülmények között egyensúlyihoz közelálló rendszert képeznek. E három reakció alapján a

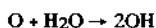
$$[\text{O}_3] = \kappa \frac{[\text{NO}_2]}{[\text{NO}]} \quad (4)$$

összefüggés vezethető le. Ez a korreláció jól mutatja azt, hogy jelentős ózon felhalmozódás csak nagy [NO₂]/[NO] koncentráció viszonyok mellett alakulhat ki.

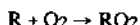
Ismeretes, hogy az antropogén eredetű NO_x nagy része NO alakban kerül a légkörbe. Ezért nagy [NO₂]/[NO] koncentráció viszonyok kialakulásához létezniük kell a troposzférában olyan oxidáló anyagfajtáknak, amelyek gyors reakciókban képesek az NO-t NO₂-vé átalakítani. Ezt a szerepet a peroxi-gyökök (a HO₂ és az RO₂ játszik. Itt az R organikus

csoportot, például metil, etil, stb. csoportot jelöl. A peroxi-gyökök a troposzférában az illékony organikus vegyületek (pl. szénhidrogének) és CO primer légszennyezők reakcióiban képződnek. E reakciókban az OH-gyökök meghatározó szerepet játszanak.

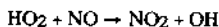
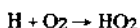
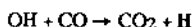
Az OH-gyökök képződését a



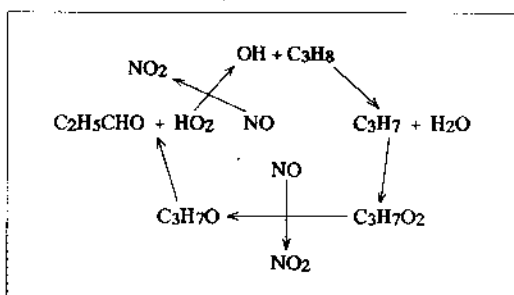
reakcióban a szénhidrogének esetén az alábbi folyamatok követik:



Szén-monoxid esetén hasonló jellegű reakciók játszódnak le:



Mindkét esetben az OH gyök indítja a reakciósort, amelyben peroxi-gyök (HO_2 vagy RO_2) képződik, amely képes az NO-t NO_2 -vé oxidálni. Ezekből az egyszerű sémákból nem tűnik ki, hogy egyetlen szénhidrogén molekula átalakulása több $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ oxidációt eredményez-



1. ábra:

A propán légköri oxidációjának reakciói

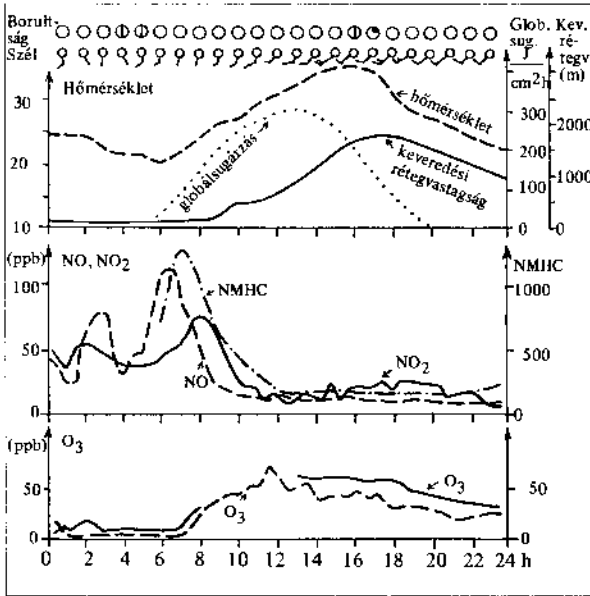
het. Ezért ennek illusztrálására az 1. ábrán bemutatjuk a propán molekula OH gyök által indított oxidációját. Kiemeltük azokat a reakciókat, amelyekben peroxi-gyökök nitrogén-dioxiddá oxidálnak nitrogén-monoxidot. Mint látható egyetlen propán molekula lebomlása során két $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ átalakulás is végbemegy. Más szénhidrogének lebomlása több $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ átalakulást is eredményezhet. Ez egyben azt is jelenti, hogy egyetlen szénhidrogén molekula lebomlása következményeként több molekula ózon képződhet.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az NO NO_2 -vé oxidálódhat napfény hatására egy olyan reakciósorban, amelyet a hidroxil-gyök és egy szerves molekula kölcsönhatása indít meg és amelyben résztvesznek a HO_2 és RO_2 peroxi gyökök. Utóbbiak azok az oxidálós anyagok, amelyek közvetlenül átalakítják az NO-t NO_2 -vé.

3. Az ózonkoncentráció időbeni és térbeni eloszlása

A kémiai folyamatok és meteorológiai paraméterek szerepének ismeretében értelmezni tudjuk a szennyezőforrások környezetében kialakuló ózon koncentráció szinteket és azok időbeni, illetve térbeni eloszlását.

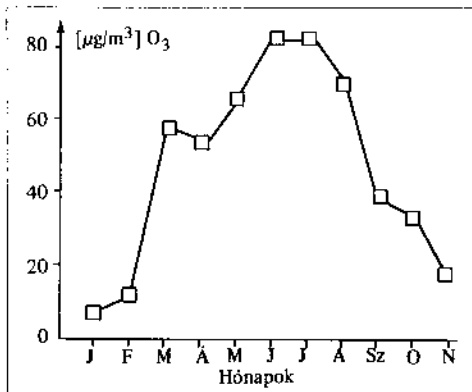
A légszennyező anyagok koncentrációjának napi menete igen jellegzetes képet mutat. A 2. ábrán bemutatjuk az 1988. július 12-én Budapesten végzett mérések eredményeit. A legfelső grafikonon feltüntettük a legfontosabb meteorológiai paraméterek (szélirány és erősség, a hőmérséklet, a napsugárzás erőssége és a keveredési rétegvastagság) napi



2. ábra:
1988. július 12-én Budapesten mért meteorológiai adatok és légszennyező koncentrációk

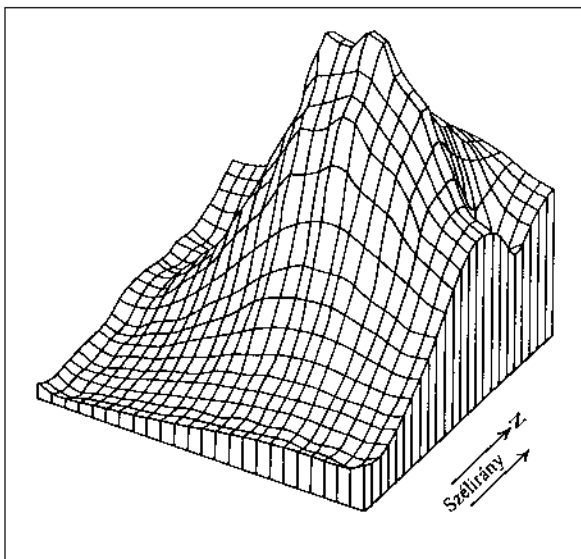
menetét. A középső grafikonon a primer szennyezőanyagok (NO, NO₂ és NMHC) koncentrációit, míg az alsó grafikonon a legfontosabb másodlagos szennyező, az ózon koncentráció-profilját mutatjuk be Haszpra et al., (1988).

Az éjszakai és hajnali órákban igen kicsi volt a keveredési réteg vastagsága. Ezért a reggel meginduló gépkocsiforgalom hatására gyorsan nőtt a primer légszennyezők, a NMHC és az NO koncentrációja és a 6 és 9 óra közötti időtartományban jelentős szennyezetségi szintek alakultak ki. Az ábrán megfigyelhető, hogy az NO₂ csúcs az NO koncentráció csúcsánál későbbben jelent meg. Ennek az az oka, hogy az NO₂ nagyobb része az NO-ból fotooxidációs folyamatban képződik és csak kisebb része jön közvetlenül emisszióból. Érdemes felhívni a figyelmet arra, hogy a primer szennyezőanyagok koncentrációja 9 óra



3. ábra:
Az ózon koncentrációk napi maximumának havi átlagértékei 1988-ban Budapesten

körül hirtelen lecsökken. Ez a koncentráció csökkenés lényegesen gyorsabb, mint amit a gépkocsik reggeli forgalmának csökkenése és a fotooxidációs folyamat előrehaladása alapján várnánk. A jelenségnek az a magyarázata, hogy nagyjából 9 óra után megindul



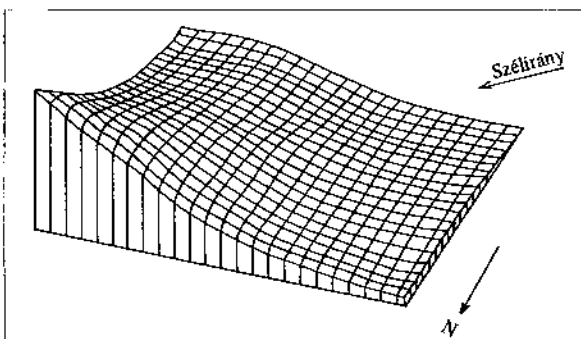
4. ábra:
A szénhidrogén koncentráció számított eloszlása Budapesten 1988. július 6-án reggel 7 órakor.
Megjegyzés:
A horizontális tengelyeken egy beosztás 1 km-t, a függőleges beosztás viszonylagos koncentrációt jelent

a keveredési rétegvastagság gyors növekedése és ezzel a primer légszennyezők felhígulása.

A másodlagos légszennyező ózon a nap folyamán később halmozódik fel. Az ózon és NO között lejátszódó gyors reakció miatt az ózon koncentráció határozott növekedése csak akkor kezdődhet meg, amikor a nitrogén-monoxid koncentráció már kis értékre csökkent.

Az ózonkoncentrációk hosszabb időtávon is jellegzetes változást mutatnak. A 3. ábrán bemutatjuk az ózon koncentráció napi maximumának havi átlagértékeit Bazeli külterületén végzett mérések alapján (Buwal, 1989). Látható, hogy az átlag koncentrációk maximumot mutatnak a nyári hónapokban és minimumot télen.

Az ózon koncentrációk időbeni alakulása mellett bemutatjuk az ózon koncentráció térbeli alakulását Budapest területén és Budapest környékén a modell számításainak alapján. Ezeket a számítási eredményeket a Budapesten 1988. július 6-án mért meteorológiai és egyéb adatok felhasználásával nyertük. Először összehasonlítóként a Budapest területére,

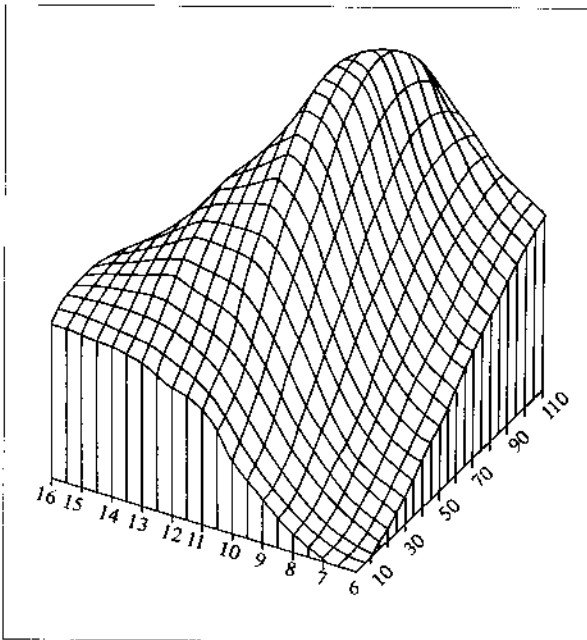


5. ábra:
Az ózon koncentráció számított eloszlása Budapesten 1988. július 6-án délután 4 órakor.
Megjegyzés: A horizontális tengelyeken egy beosztás 1 km-t, a függőleges beosztás viszonylagos koncentrációt jelent

reggel 7 órai időpontra számított szénhidrogén koncentrációkat mutatjuk be a 4. ábrán. Látható, hogy a városközpont fölött igen jelentős maximumok alakulnak ki a belváros nagy gépkocsiforgalma miatt. Hasonló képet mutat az NO_x koncentrációk térbeli eloszlása is.

Az 5. ábrán az ózon koncentráció számított értékei láthatók. Ezek 1988. július 6-án délután 4 órára és Budapest területére vonatkoznak. Szembeötlő, hogy az ózon koncentrációja fokozatosan nő a város szélé felé haladva a levegőmozgás irányában.

Megvizsgáltuk a nagymértékben szennyezett levegő útját és sorsát a városon kívüli területeken is úgy, hogy modell-számításokkal meghatároztuk a levegőszennyezők összetételét egy-egy olyan légcellában, amely áthalad a város fölött, majd az elhagyva az uralkodó széliránynak megfelelően távolodik a nagy szennyezőforrást képviselő lakott területtől. Erős napsütést hatására a fotooxidációs folyamatok eredményeként a légcellában nő az ózon és egyéb fotooxidációs termékek koncentrációja. Ezek általában a várostól távolabb érik el a maximális értéküket. A 6. ábrán bemutatjuk, hogy számításaink szerint hogyan függ a



6. ábra:

Budapestet elhagyó légcellában az ózon koncentráció a légcella indulási időpontja és a Budapesttől való távolság függvényében. Az x tengely beosztása órákat jelent, az y tengely a várostól mért távolságot (km) jelöli. A koncentráció egysége viszonylagos

Budapest légtérét elhagyó légcellában az ózon koncentrációja a légcella indulási időpontja és a Budapesttől való távolság függvényében. Az ábra egyik tengelyén azokat az időpontokat tüntettük fel, amikor a légcella elhagyta Budapest szélét, a másik tengelyen a várostól mért távolság található (feltételezve, hogy a szélesség 10 km/óra). Látható, hogy a legnagyobb ózonkoncentráció abban a légcellában alakul ki, amely 10 óra körül hagyta el a várost és amely 8 óra körül haladt el a városközpont fölött, amikor az elsődleges légszennyezők koncentrációja tetőzött. Az ábráról ugyancsak leolvasható, hogy az ózon maximumok kialakulása késő délután délután 18 óra körül következett be, amikor a légcella (10 km/óra szélesség mellett) kb. 80 km-re hagyta el a várost.

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy az ózon maximumok várhatóan a nagy szennyezőforrásoktól távolabb alakulnak ki, ahol az ózon szintek az egészségügyi határértékeket lényegesen meghaladó koncentrációkat érhetnek el.

5. Ózon korlátozó környezetvédelmi stratégiák

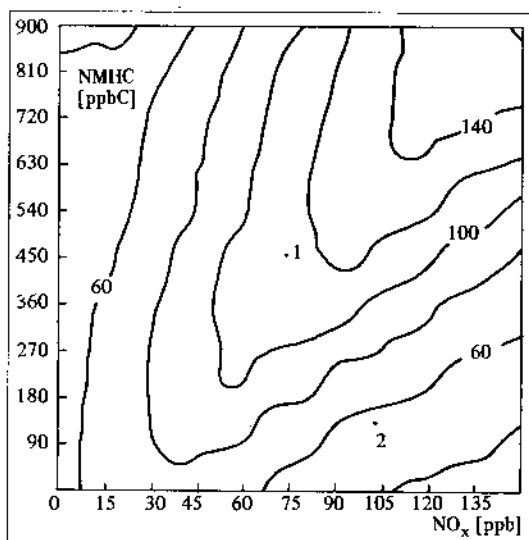
A számítógépes levegőminőségi modellek felhasználása lehetővé teszi azt, hogy különféle lehetséges környezetvédelmi stratégiák várható hatásait lemérhessük. Az ózonszennyezés korlátozására vonatkozó stratégiai döntések egyik eszköze az ún. ózon felület.

Amint azt amerikai kutatók a hatvanas években kimutatták, azonos meteorológiai feltételek mellett a másodlagos szennyezőanyagok koncentrációja az emisszió erősségétől és az említett szénhidrogének és nitrogén-oxidok arányától függ. Ha az ózon koncentrációját egy adott időpontban a szénhidrogén és a nitrogén-oxid emisszió függvényében ábrázoljuk, ózon felületet kapunk. Ilyen ózon felületeken az Egyesült Államok városainak (elsősorban Los Angeles) szennyezettségi körülményeire számoltak. Azért, hogy segítséget nyújtsunk hatékony magyar emisszió korlátozási stratégia kialakításához Budapest viszonyaira is elvégeztük ezeket a számításokat.

Az előzőekben leírtak alapján látszik, hogy az elsődleges szennyezőanyagok (pl. NO_x , NMHC) budapesti emissziójának korlátozása a másodlagos szennyezőanyagok (pl. O_3 , PAN) koncentráció maximumának értékét viszonylag kevésbé változtatja meg Budapesten, mivel Budapest légtérében viszonylag kevés másodlagos szennyezőanyag keletkezik. Ennek az az oka, hogy a légcella a szokásos szélsőségek mellett viszonylag rövid ideig tartózkodik Budapest légtérében. Láttuk ugyanakkor azt is, hogy a budapesti szennyezőforrások jelentős mennyiségű szennyezőanyagot juttatnak a levegőbe és ebből a Budapestet elhagyó levegőben a napsugárzás hatására jelentős mennyiségű másodlagos szennyezőanyag keletkezhet. Ezek a másodlagos szennyezőanyagok Budapest szennyezettségi fáklyájában, Budapesttől szélirányban több tíz kilométerre károsítják a környezetet.

Annak a légcellának a sorsát fogjuk megvizsgálni, amely reggel 7 órakor az ELTE Természettudományi Karán lévő mérőállomás felett, tehát Budapest központjában tartózkodik. A légcellából szennyezőanyagok távoznak turbulens diffúzióval. Ezt úgy vesszük figyelembe, hogy feltételezzük a légcellában levő szennyezőanyagok koncentrációja óránként 10 %-kal hígul. Korábbi számolásainkból tudjuk, hogy ebben a légcellában a másodlagos szennyezőanyagok koncentrációja késő délután éri el a maximális értéket. Ezért az ózon koncentrációját az NMHC és NO_x emissziója függvényében 16 órakor fogjuk megvizsgálni. Az NO_x és az NMHC emisszió megváltozását 0–150 tonna/nap, illetve 0–920 tonna/nap határok között vizsgáltuk.

A 7. ábra az ózon koncentrációját az emisszió összetétele függvényében mutatja be. A jelenlegi arány az 1-essel jelölt pont az ábrán. Az ábráról leolvasható, hogy ez az arány



7. ábra:
A Budapest környéki levegő ózon koncentrációja a budapesti NMHC és NO_x koncentráció függvényében

igen kedvező az ózon keletkezése szempontjából. (És igen kedvezőtlen a lakosságra és a környezetre.)

A kipufogó gáz mérésekből és a gépjármű statisztikákból kiszámítható, hogy ha valamennyi kétütemű gépjárművet négyüteművel váltanák fel (például szervezett motorcserre útján), a szénhidrogén emisszió a jelenlegi 30 %-ára csökkenne, míg az NO_x emisszió 30 %-kal nőne. Azt az állapotot, amikor a gépjárművek száma változatlan, de csak négyüteműekből áll, a 2-essel jelölt pont reprezentálja az ábrán. Látható, hogy a kétüteműek számának csökkentése jelentősen csökkentené az ózon koncentrációját a vidéki városi levegőben.

Az ózon felületek közös jellegzetessége, hogy átlósan egy gerincvonal húzódik rajtuk keresztül. Amennyiben egy adott szennyezőforrás helyzetét a gerincvonaltól jobbra eső pont képviseli, a változatlan szénhidrogén emisszió melletti NO_x csökkentésnek az a következménye, hogy a szennyezőforrástól szélirányban az ózon koncentrációja növekszik.

És valóban Kaliforniában az 1960–1970-es években a valóságban is tapasztalták azt, hogy az NO_x emissziót korlátozó intézkedések hatására egyes helyeken megnövekedett ózon szinteket mértek. A jelenség kémiai magyarázata az, hogy az NO_x csökkentés lecsökkenti a nitrogén-monoxid koncentrációt és ezzel visszaszorítja az NO és O₃ között lejátszódó reakciót, amely hatékonyan képes csökkenteni az ózon koncentrációját. Ez a példa jól illusztrálja, hogy a légköri folyamatok bonyolultak és a beavatkozás következményei gyakran nehezen előreláthatóak. Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy a környezetvédelmet érintő intézkedések és változtatások igen alapos előkészítést igényelnek.

IRODALOM

Middleton, J. T., Kendrick, J. B. Jr., and Schwalm, H. W., 1950: Injury to herbaceous plants by smog or air pollution, *Plants Dis. Rep.*, 34, 245–248.

Haagen-Smit, A. J., Darley, E. F., Zaitlin, M., Hull, H., and Noble, W., 1951: Investigation on injury to plants from air pollution in the Los Angeles area, *Plant Physiol.*, 27, 18–42.

Haszpra, L., Molnár, Á., Nyitrai, L., Bérces, T., Demetres A., Szilágyi I. és Turányi, T., 1988: *Lokális levegőminőségi vizsgálatok*. Kutatási jelentés, KVM szám: 11–01007–K/87/15/A, Budapest

Burwal, 1989: *Ozon in der Schweiz*. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 101, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1989