

50 ÉVES A LÉGKÖRI ÓZONTARTALOM OPERATÍV MÉRÉSE MAGYARORSZÁGON

50 YEARS OF THE OPERATIONAL ATMOSPHERIC TOTAL OZONE OBSERVATION IN HUNGARY

Tóth Zoltán¹, Fekete Dénes²

¹Stratolab Kutató, Fejlesztő és Innovációs Kft., 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.,
zoltan.toth@stratolab.hu

²Országos Meteorológiai Szolgálat, 1675 Budapest, Pf. 39, *fekete.d@met.hu*

Összefoglalás. 50 évvel ezelőtt kezdődött meg a légkör teljes ózontartalmának operatív mérése az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában. Ez akkor még csak egy további fizikai mennyiség mérését jelentette, de mára óriási jelentőségű lett a jól ismert okok miatt. Az ózonmérés történetében a következő előrelépést a Brewer spektrofotométer beszerzése és installálása jelentette 1998-ban. A mérések történetéről, eredményeiről, és az ezzel kapcsolatos vizsgálatokról számolunk be jelen írásban.

Abstract. Routine operational observation of atmospheric total ozone content in the Marczell György Main Observatory of the Hungarian Meteorological Service was started since 50 years ago. In those years, it was only the measurement of an additional physical quantity, but by now, it has become being of immense importance for the well-known reasons. The next step in the history of ozone measurement was the purchase and installation of a Brewer spectrophotometer in 1998. The history and results of these measurements and several studies concerning it are shown in this paper.

Bevezető. Bár 1969 a civilizációnk történetében azért mérföldkő, mert abban az évben tette ember először a lábát egy másik égitestre, az Országos Meteorológiai Szolgálat szempontjából egészen más okból mérföldkő: ekkor szerezte be és installálta az első nagyprecizitású teljes ózontartalom mérő eszközt, a Dobson spektrofotométert. Abban az időben persze a „légköri ózon” kifejezésnek messze nem volt olyan kicsengése, mint ma, amikor már a lakosság számottevő része ismeri, vagy legalábbis tudja, hogy van a légkörünkben ózon, és ha többet nem is, annyit tud róla, hogy valami probléma van vele, vagy van valami jelentősége. Mivel akkor még szakmai berkekben se volt ismert az ózoncsökkenés ténye, ez a Szolgálat mérési tevékenységében is csak egy további - bár fontos - fizikai mennyiség bekerülését jelentette az operatív mérések sorába. Azzal inkább kitűnt, hogy ez a második legnagyobb értékű beruházás volt az időjárási radar után. Érdekes, hogy a múlt század 30-as éveiben azért kezdték a teljes ózontartalmat mérni, hogy az ózon változásainak ismerete segítsen jobban megismerni a sztratoszférában lezajló folyamatokat. Ez később aztán megfordult: ma már a sztratoszféra kémiai-dinamikai folyamatainak pontosabb megértése leginkább azért fontos, hogy többet megtudjunk az ózontartalom hosszú távú viselkedéséről és koncentrációjának változása esetleg előrejelezhető legyen klimatikus skálán.

Az ózonmérések kezdete és a mérés elve. A légoszlop teljes ózontartalmának pontos mérése akkor vált lehetővé, amikor a fizikusok képesek voltak nagyfelbontású színekpek előállítására,

valamint kvázi-monokromatikus sugárzás intenzitás precíz mérésére. Az előbbi már a XIX. század második felében sikerült elsősorban Kirchhoff munkásságának köszönhetően, utóbbi pedig akkor vált lehetségessé, amikor Einstein 1921-ben atomfizikailag kvantitatíve megmagyarázta a fotoelektromos effektust, amiért fizikai Nobel-díjat kapott, és lehetővé vált a precíz fotondetektálás.

A légoszlop teljes ózontartalmának kvantitatív spektrofotometrikus meghatározásának elméletét Gordon Miller Bourne Dobson (1889-1976), angol fizikus dolgozta ki, és a módszert gyakorlatban is ő alkalmazta először: megtervezte és megépítette az ehhez szükséges mérőberendezést. Dobson Cambridge-ben végezte fizikusi tanulmányait, és miután végzett, az oxfordi egyetemre került meteorológiát kutatni és oktatni. 1927-ben tagjai közé választotta a Royal Society. Érdekesség, hogy Dobson volt a Brit Királyi Meteorológiai Szolgálat elnöke is, 1947 és 1949 között.

Több „elsőség” is fűződik a nevéhez. 1913-ban ő végezte az első pilotballonos felsőlégköri méréseket, amelyekkel kimutatta, hogy a sztratoszférában a magasság függvényében változik a szél, amit korábban állandónak hittek. 1922-ben felfedezte, hogy a hőmérséklet növekszik a magassággal a sztratoszférában az 50 km körüli magasságig. Ezt ő az ózon sugárzás abszorpciójának tulajdonította, ami később bizonyítást nyert, és ma már jól ismert tény. Szintén ő volt az első, aki először végzett sztratoszférikus vízgőz mennyiség méréseket.

A 20-as években kezdett az ózommérő spektrofotométer megtervezésébe, és az évtized vége felé kezdte meg működését az első prototípus. Dobson 1931-ben publikálta írását a spektrofotométerről (*Dobson, 1931*). Ez a műszer – a róla elnevezett Dobson spektrofotométer – lett a legnagyobb precizitású ózommérő eszköz. Megkezdődött a sorozatgyártása, és a következő évtizedekben gyorsan növekedett az ezt használó mérőhelyek száma a világban. A 110-es számú 1969 nyarán Budapesten, az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában kezdte meg a működését.

Az ózon mennyiség spektrofotometrikus meghatározásának elve az ún. relatív intenzitások módszerén alapul. Az elsőre megoldhatatlannak tűnő feladatot Dobson azon felismerése tette megoldhatóvá, mely szerint az aeroszol optikai mélység viszonylag lassan változik a hullámhosszal az UV-B tartományon az ózon abszorpció optikai mélységének változásához képest. Ha kiválasztunk két hullámhosszt, és azokon megmérjük a leérkező sugárzási fluxust, akkor a csillagászati geometria, a légkör tetejére érkező fluxus, az ózon abszorpciós koefficiens, és a Rayleigh-szórás optikai mélysége ismeretében pontosan meghatározható lenne a légoszlopban lévő teljes ózontartalom, ha ismernénk az aeroszol optikai mélységet. Annak ismerete nélkül azonban bármely hullámhosszra felírt egyenletben két ismeretlenünk van. Azonban Dobson felismerte, hogy ha a két hullámhosszt egymáshoz megfelelően közel választjuk meg, annyira, hogy az aeroszol optikai mélység a két hullámhosszon már egyenlőnek tekinthető legyen, viszont az ózon abszorpció még megfelelő mértékben különbözzön, akkor az aeroszol optikai mélység kiesik, így egy hullámhossz-párt használva a feladat megoldható. Így történik az ózon számítása a mai modern Brewer spektrofotométereknél is, csak hat hullámhossz mérésével a nagyobb megbízhatóság biztosítása céljából (*Dobson, 1957, Brewer MKIII Spectrophotometer Operators' Manual, 1992*). A Dobson spektrofotométernél ez összehasonlító módszerrel valósul meg. A spektrofotométeren lévő speciális karokkal be kell állítani, hogy a műszer először azt a hullámhosszt válassza ki, amelyen erősen abszorbeál az ózon, az ehhez tartózkodó értéket fel kell jegyezni, majd ki kell választani a másik hullámhosszt, amelyen gyakorlatilag nem (vagy legalábbis alig) abszorbeál az ózon. A két

különböző fluxus áramot indukál az érzékelő fotocellán. A nagyobb intenzitású hullámhosszt két speciális optikai ék segítségével addig kell gyengíteni, míg ugyanakkora áramerősséget kapunk mindkét hullámhosszra. Azon a hullámhosszon tehát, ahol az ózon nem abszorbeál, olyan mértékben csökkentettük az érzékelőre eső fluxust az ékek használatával, amilyen mértékben az ózon csökkentette a másik hullámhosszon. Ha az optikai ékek precízen vannak kalibrálva, akkor a helyzetük megváltozása pontos összefüggésben áll a beeső fluxusok arányával, és ebből következően az ózon mennyiségével. Fényforrásként lehet használni a napkorong térszögéből érkező direkt sugárzást, a holdkorongról érkező sugárzást, illetve, ha a direkt sugárforrást felhő fedi, a zenit irányából érkező szórt sugárzást.

Az ózonmennyiség számítását gyári kalibrációs táblázatok használatával kellett elvégezni, ami elég hosszadalmas feladat volt, de egyszerűsíteni lehetett a munkát, ha a felhasználó írt egy számítógépes programot a leolvasásokra úgy, hogy a szükséges kalibrációs táblázatok is számítógépre vitte.

Dobson spektrofotométeres ózonmérés a Marczell György Főobszervatóriumban (1969-2000). A WMO Aerológiai Bizottsága 1957-ben megtartott párizsi ülésén hívta fel a figyelmet az ózonmérések fontosságára, és egy világméretű ózonmérő hálózat létrehozására (*Borbély, 1966*), amelynek alaplmszereként magától értetődő módon a Dobson spektrofotométert jelölték meg. Mivel a szocialista tábor országai számára a Dobson ára nagyon magas volt, G. P. Guscsin szovjet mérnök vezetésével a szentpétervári (akkor: leningárdi) egyetemen 1958 és 1961 között kifejlesztettek egy jóval olcsóbb szűrős spektrofotométert az ózon mérésére, amelyből az első 60-as évek elején kezdték meg működésüket. Az Országos Meteorológiai Szolgálat 1966-ban kapott egy Guscsin spektrofotométert a Szovjetuniótól (*Borbély, 1966*), amelyből akkor már jelentős számú működött a Szovjetunió területén, így a magyarországi ózonmérések már 1966-tól datálhatóak. Az eszköz pontossága és megbízhatósága azonban, szűrős műszer lévén, nem vetekedhetett a Dobson spektrofotométerével, így a Szolgálat terveiben egy Dobson műszer mielőbbi beszerzése szerepelt, amely azonban nagyságrendekkel drágább volt. A Dobson spektrofotométerek száma a 40-es és 50-es években már növekedett, és a WMO 1957-es felhívásának hatására a növekedés üteme felgyorsult. A 60-as évek közepén már közel száz Dobson műszer működött a világ különböző mérőhelyein. Végül a körülmények szerencsésen alakultak, és az OMSZ már három év múlva, 1969 későtavaszán meg tudta venni a Dobson spektrofotométert (*1. ábra*). A mérőeszköz, bár spektrofotométer, azaz sugárzásmérő műszer volt, először nem a sugárzási osztályra, hanem a levegőkémiai vizsgálatokat végző osztályra került, és ott kezdték meg vele a méréseket nyár elején. A WMO-nak ekkorra már működő minőségbiztosítási rendszere volt a világhálózat számára: 5 évenként összehasonlításokat (tulajdonképpen kalibrációkat) rendezett a Dobson spektrofotométerek számára, amelyeket a svájci Arosa-ban tartottak. A Dobson 110 1975-től vett részt ezeken a kalibrációkon.



1. ábra Dobson spektrofotométer

A magyarországi ózonmérések kezdetekor a globális ózoncsökkenés még csak sejtett jelenség volt, mert nem telt el elég hosszú idő a tendenciózusnak tűnő csökkenés körülbelüli kezdete (a 60-as évek legeleje) óta.

A Dobsonnal limitált volt az egy nap alatt gyűjthető adatok száma, hiszen kézzel kellett vezérelni a mérési folyamat minden lépését, aztán a leolvasásokból kiszámítani az ózontartalmat. Ezáltal egy mérés kb. 15 percig tartott (a számítás nélkül). A cél az volt, hogy amennyire lehet, azonos napzenittávolságoknál történjenek a mérések minden napon, és lehetőleg minimum 7-8 mérés történjen egy nap alatt a nyári időszakban – télen nyilván egy kicsit kevesebbet lehetett teljesíteni a rövidebb nappalok miatt.

A Dobsonnal minden hónapban havi rutinteszteket kellett végezni: külső standard sugárforrással az érzékelő ellenőrzése érdekében és standard higanyforrással a hullámhossz kiválasztás pontosságának ellenőrzése céljából.

A mérésfajtákból sokáig csak a direkt méréseket használták, ami azonban korlátozta a létrejött mérési adat mennyiségét, hiszen olyan időszakban nem lehetett mérni, amikor felhő takarta a napkorongot. 1992-ben egy teljes évig tartó kísérlet során kapott adatsorból kidolgozott parametrizációval és a szükséges, gyárilag meghatározott ún. zenit polinomok segítségével, kifejlesztettük azt a módszert, amivel a zenitsugárzásból is lehetett ózont meghatározni, így jelentősen növelni tudtuk a napi mérések számát.

Az első két évtizedben csak havi gyakorisággal kellett küldeni a napi átlagértékeket egy megadott távirat-formátumban a Kanadában, Toronto közelében lévő Downsview-ban működtetett WODC-be (World Ozone Data Center), amelyből a 90-es években WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Data Center) lett. Aztán a globális ózoncsökkenés felismerése, és az ózonlyuk felfedezése után létrejött a GAW keretében működő GOOS (Global Ozone Observing System – „globális ózonmegfigyelő rendszer”) a 90-es évek elején, amelynek két központja van: a már említett WOUDC, és a görögországi Thesszalonikiben található Arisztotelész Egyetem Légműfizikai

Laboratóriuma. A GOOS-ben résztvevő ózonmérő állomások minden nap végén elküldik az adott napi ózon átlagot, és másnap egy ózon eloszlás térképet kapnak az északi féltekére.

A tevékenységek egyre szélesedő köre és a Szolgálatnál a 90-es évek elején történt drasztikus létszámcsoökkentés, valamint a modern adatgyűjtéssel működő egyéb mérésekkel járó munka mellett egyre nagyobb terhet jelentettek a kézzel végzett, hosszadalmas Dobson-mérések, és ez kezdett a munkák hatékonyságának a rovására menni. A 80-as évek első felében jelent meg a modern optoelektronikus módon működő ózonmérő berendezés, a Brewer spektrofotométer, és a 80-as évek vége felé jelentősen elkezdett növekedni a számuk a nemzetközi hálózatban. Ez az eszköz ráadásul nagyfelbontású ultraibolya spektrumokat is tudott rögzíteni, és a légoszlop kén-dioxid tartalmát is mérte ugyanazon az elven és gyakorlati megvalósítással, ahogy az ózont. A volt szocialista országok közül Csehország, majd Lengyelország is beszerzett Brewer spektrofotométert a 90-es évek első felében. Végül az OMSZ pályázati pénzből tudta megtenni ezt a nagy beruházást 1998-ban. Ekkor új időszámítás kezdődött a hazai ózonmérések történetében.

A Brewer spektrofotométer. Ennek az eszköznek az elméleti alapjait Alan West Brewer (1915-2007), kanadai fizikus dolgozta ki, amelyről az első publikációt 1973-ban jelentette meg (*Brewer, 1973*). Brewer a múlt század 40-es éveiben az oxfordi egyetemen Dobsonnal dolgozott, ekkor fejlesztették ki a nevük után „Dobson-Brewer cirkuláció”-nak nevezett légköri cirkulációs modellt, amellyel meg tudták magyarázni a sztratoszféra dinamikájának és az ózon sztratoszférikus kémiaiájának a segítségével azt az elsőre paradoxonnak tűnő jelenséget, hogy az ózon abban a tartományban (trópus) van jelen a legkisebb mennyiségben, ahol a legtöbb keletkezik belőle, hiszen ott érkezik a legnagyobb mennyiségben az ózont gyártó UV-C sugárzás. Dobson 1950-ben nyugdíjba ment, Brewer pedig 1962-ben a University of Toronto-ra távozott. A 60-as évek második felében kezdett foglalkozni egy, a Dobson helyettesítő, a modern szilárdtestfizikán alapuló optoelektronikát, és modern számítástechnikát alkalmazó programvezérlésnek köszönhetően automatikusan működő ózonmérő műszer kifejlesztésén. A legapróbb részletekig kidolgozott, „papíron már működő” berendezés kifejlesztését kollégájával, David Wardle fizikussal kezdték meg a 70-es évek közepén. Brewer 1977-ben nyugdíjba ment, Wardle pedig a projekttel együtt az Environment Canada intézményhez került, és két ottani fizikus kollégájával, James Kerr-rel, és a University of Toronto-n is dolgozó Tom McElroy-jal folytatták a prototípus és a vezérlő program kifejlesztését, majd irányították a gyártás munkálatait. A Brewer spektrofotométer első prototípusa a 70-es és 80-as évek fordulójára készült el. A gyártó egy Saskatoon-ban működő cég, a SCI-TEC Instruments volt. Az első sorozatgyártott példányok 1981-ban készültek. Ezeket MKII-vel jelölték, mivel az MKI elnevezést csak a prototípus kapta.

A Brewer spektrofotométer monokromátorként motorral mozgatott holografikus diffrakciós ráccsal működő spektrofotométer, komplex precíziós előoptikával, így az ózontartalom általa nagy pontossággal meghatározható. Az UV spektrumot a 286,5 nm és 363 nm hullámhosszok közötti tartományban állítja elő, 0,5 nm spektrális felbontással. Az érzékelő egy precíz, közel 2000 V-on működő fotoelektronsokszorozó. Jelenleg is a legpontosabb ózon- és UV-mérő eszköz a világon, és ezért referenciaként szolgál mindenféle UV-ben működő spektrométer számára. Ezt a pozícióját meg is őrzi mindaddig, amíg a ma már egyre megbízhatóbb diódasoros, vagy más szóval diódatömbös (diode-array) spektrométerek le nem taszítják a trónról – de erre még feltehetőleg kell várni néhány évtizedet.

A Brewer önellenőrző, azaz egy sor (több, mint húsz) rutintesztet végez, némelyeket alapértelmezésben, némelyeket pedig a működtető szakember írja be a mérési programba. A mechanika és az optoelektronika legapróbb részleteit is operatív tesztelni lehet (és célszerű), például a fotoelektron sokszorozó dead time-ját, vagy a napkövető teljes 360 ° alatti lépésszámát. Bármely szegmens, alkatrész ellenőrizhető (és ezért ellenőrizni is kell), aminek közvetlen hatása van a kimenő jelre.

Beépített standard sugárforrással és higanyforrással az érzékelő és a hullámhossz-kiválasztás is naponta többször ellenőrzésre kerül, de rendelkezésre állnak a gyári külső standard sugárforrások, amelyekkel havonta egyszer végzünk kalibrációt. A standard lámpa a detektort, azaz a mért jelet teszteli, a higanyforrás pedig a hullámhossz kiválasztás pontosságát. A teszt során azt lehet vizsgálni, hogy az elméleti atomfizikai számítással előálló adott higany emissziós vonal alakját milyen pontossággal hozza a műszer. Ha a gyárilag meghatározott különbségnél jobban eltér, akkor valami probléma állt elő, amit orvosolni kell.

A vezérlőprogram gwbasic-ben van írva, a mai napig abban történnek a fejlesztések, a felhasználó által is bármikor módosítható. Működéséről részletesen itt olvashatunk: *Brewer operator's Manual, 1992, Tóth, 2017.*

1986-ban kezdték gyártani az MKIV verziót, amely az ózon és az UV spektrumok mellett a kén-dioxid helyett a nitrogén-dioxidot tudja mérni. 1990-ben kiterjesztették az érzékenységi tartományát, és onnan kezdve gyártott Brewer MKIV mindkettőt méri. A következő nagy lépés 1992-ben jött el, amikor elkezdtek gyártani az MKIII típust. Ez már dupla monokromátorral rendelkezik, így még jobb zajszűrése van, amelynek köszönhetően tovább csökkent az amúgy is rendkívül alacsony mérési bizonytalanság.

2004-ben nagy változás történt a Brewer gyártásában. A Kipp&Zonen megvette a Sci-Tec-et, és a Brewer gyártása átköltözött a hollandiai Delft-be, a Kipp&Zonen gyártó üzemébe.



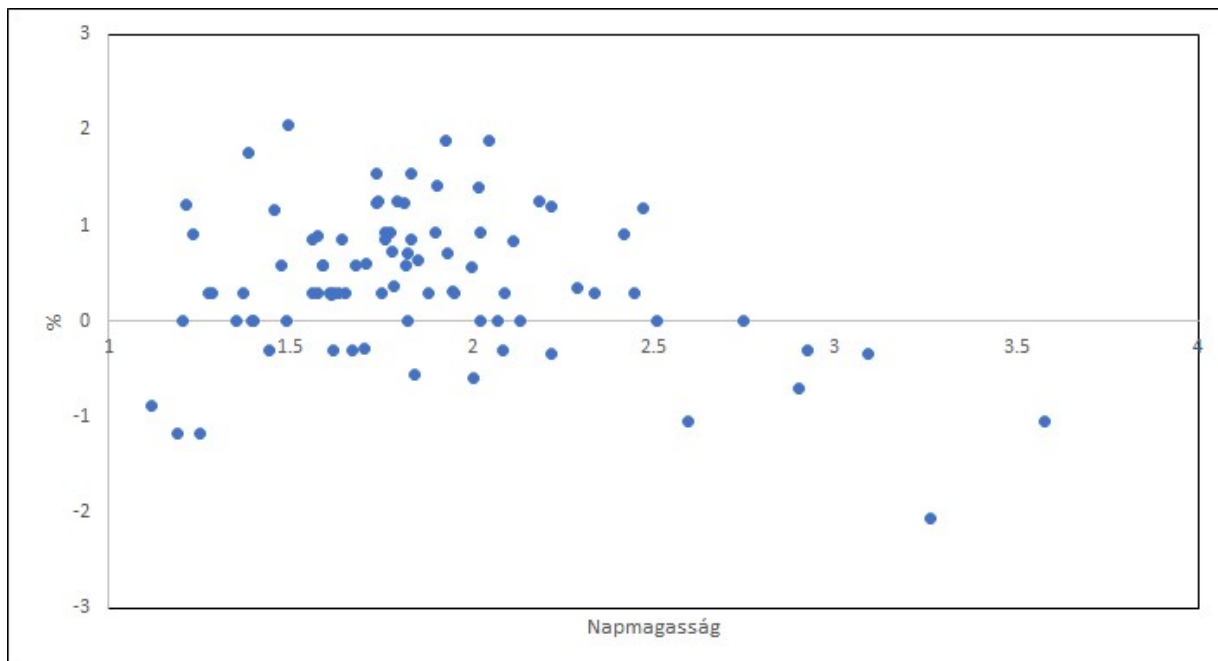
2. ábra Brewer spektrofotométer

Brewer spektrofotométeres ózonmérés a Marczell György Főobszervatóriumban (1998-). Az OMSZ 1998 nyár elején installálta a 152. sorozatszámú Brewer MKIII spektrofotométert (2. ábra). A kezdeti problémák feltárása és megoldása után az operatív mérések 1998 őszén indultak.

Mivel teljesen automatikus eszköz, a mérési programját úgy célszerű összeállítani, hogy mindenből minél többet mérjen, azaz folytonosan ki legyen használva. Minden mérési sorozat előtt szükség van egy Hg lámpa tesztre, így sok Hg teszt fut egy nap alatt. Ezért a Hg lámpa a Brewer messze leggyakrabban cserélendő alkatrésze, általában 1,5 – 2 évenként cserélni kell.

Az ózonméréseket adott napzenittávolságoknál célszerű végeztetni. A direkt és zenit méréseket is figyelembe véve 50-60 ózonmérés történik a nyári időszakban, a télben értelemszerűen valamivel kevesebb.

Az első időkben még párhuzamosan működtettük a Dobson-t és a Brewer-t, hogy lássuk, mekkora az eltérés a két műszer adatai között. Nem kell magyarázni, mennyire fontos ez minden ilyen esetben, és milyen kiemelten fontos egy ilyen fizikai mennyiség esetén, mint az ózon, amelynek trendje az egyik legnagyobb kérdés légkörünk hosszú távú viselkedésének megismerésében és megértésében. A párhuzamos mérések 1998 ősze és 2000 tavasza között, kb. másfél évig zajlottak. Az egyezés igen jó volt, ahogy azt a 3. ábrán is láthatjuk.



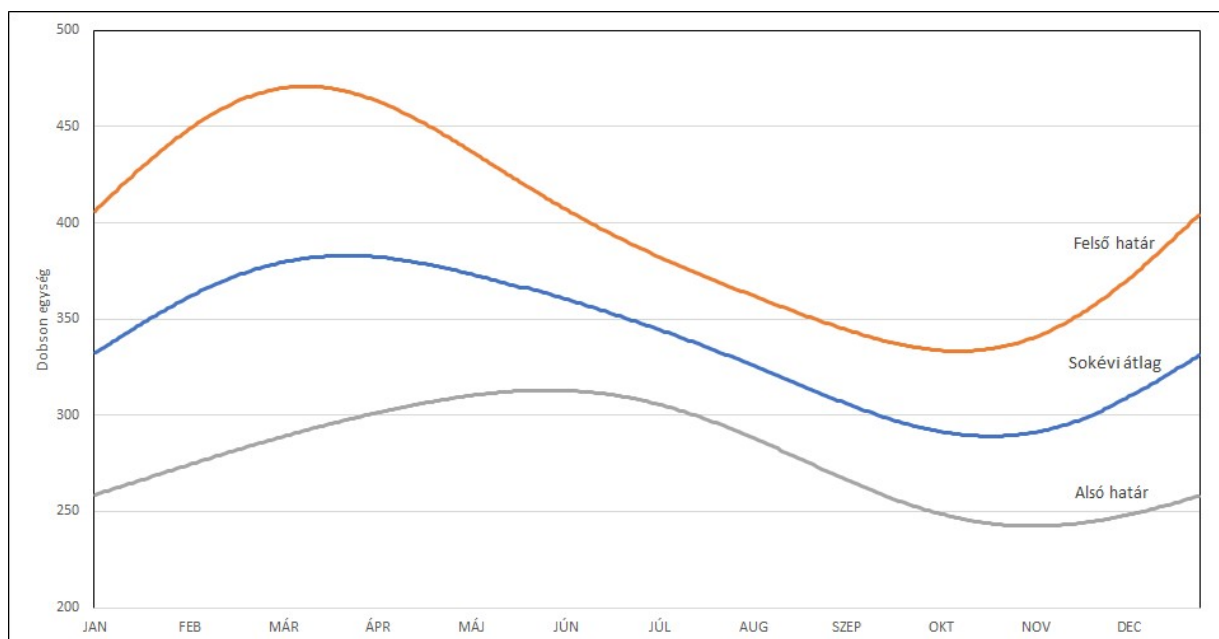
3. ábra A Brewer és Dobson spektrofotométerekkel mért adatok eltérése a napmagasság függvényében

A Dobson így „nyugdíjba vonult”, és ma is ott pihen a Marczell György Főobszervatórium sugárzási raktárában. Volt több alkalommal érdeklődés más országok részéről, hogy az OMSZ kölcsönadja, de ezek végül a kezdeti lelkesedés után nem realizálódtak.

A Brewer kalibrációja a nemzetközi utazó etalon Brewerhez (Brewer 17) két évente történik, a kalibrálást a korábban a SCI-TEC-nél és a University of Toronto-n dolgozó szakemberek által működtetett IOS (International Ozone Service) elnevezésű cég végzi. A nemzetközi etalon csoportot három Brewer spektrofotométer alkotja (Brewer Triád), ezekhez kalibrálják az utazó etalont, amellyel aztán a világ különböző helyein működő Brewereket kalibrálják.

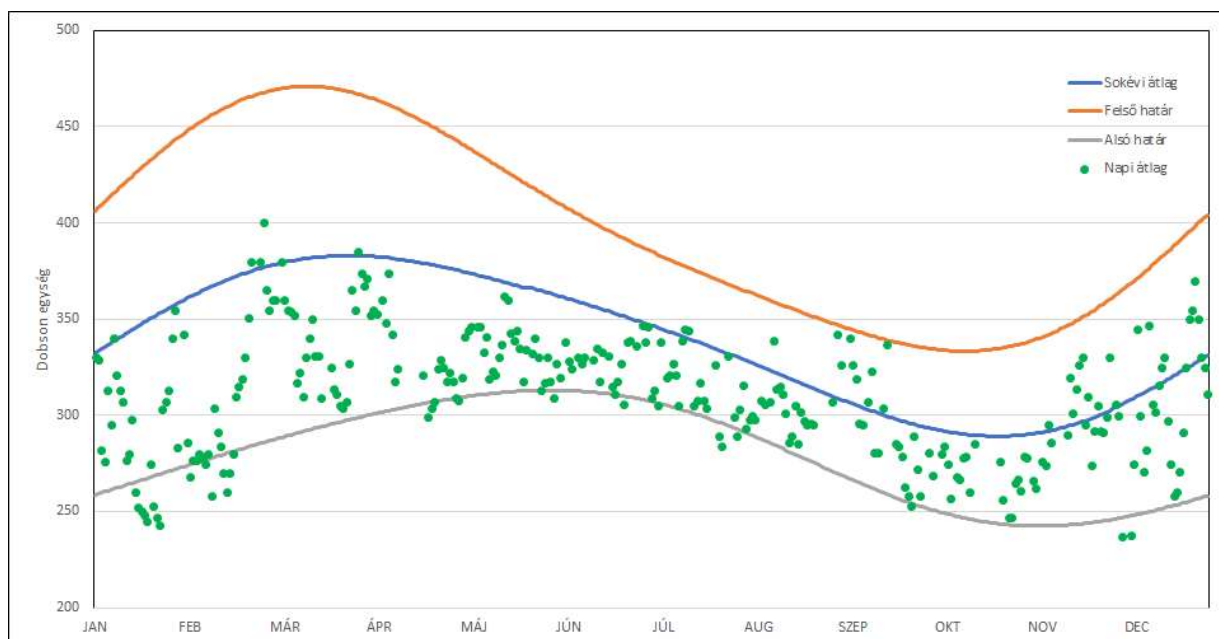
A közép-európai országok Brewert működtető intézményei összefogtak, és mindig valamelyikük rendezte a kalibrációt. Ez négy országot jelent: hazánk mellett Csehország, Szlovákia és Lengyelország. Az elsőt, amelyen részt vettünk, 2001-ben éppen mi rendeztük a Marczell György Főobszervatóriumban.

Az ózon állapota, változásai hazánk felett a mérési eredmények alapján. Ennek az írásnak nem lehet célja a szakasz címében szereplő téma részletes bemutatása, de néhány fontos tényt mindenképpen meg kell említeni az okok és a légkörfizikai kapcsolódások, magyarázatok részletezése nélkül.



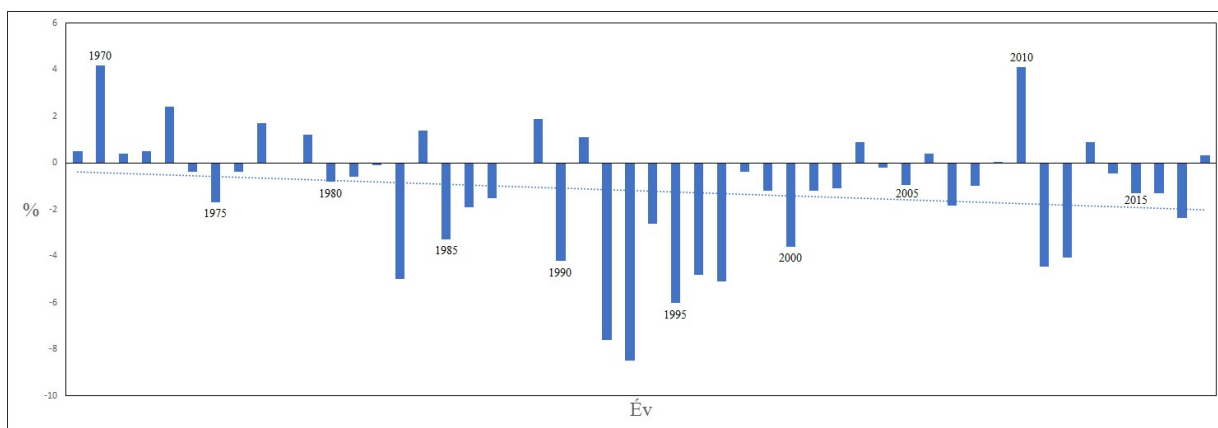
4. ábra Az ózon karakterisztikus éves menete és a természetes változékonyság alsó és felső határa.

A teljes ózontartalom sokéves átlaga Budapesten 338 DU (Dobson Unit – Dobson Egység). Az ózonnak karakterisztikus éves menete van, ahogy az a mérsékelt övben mindenütt jellemző. A 4. ábrán a simított éves menetet láthatjuk, és vele együtt feltüntettük a természetes változékonyság alsó és felső határát ($\pm$ kétszeres szórás) is. Azt tapasztaltuk, hogy olyan években, amikor nagy ózonhiány volt, a napi átlagok jelentős része a természetes változékonyság sávjának alsó határán mozgott, de viszonylag kevés napon volt alatta. Ez azt jelenti, hogy azokban az időszakokban nem volt jellemző az, hogy huzamosabb ideig extrém ózonhiány lett volna a jellemző, de szinte az egész év folyamán jelentősen átlag alatti volt az ózontartalom. Erre jó példa az 1993-as év (5. ábra).



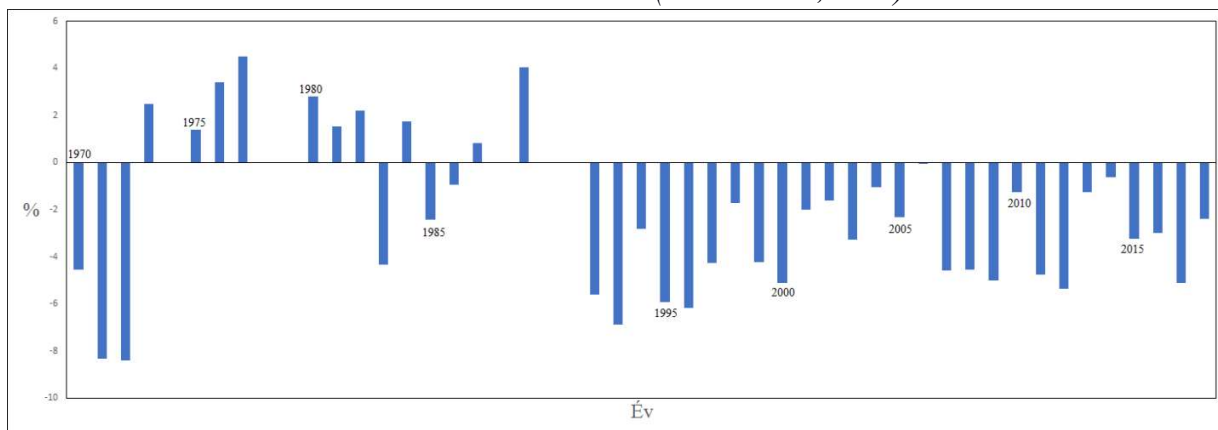
5. ábra Az 1993-as év napi ózontálagai

A 6. ábrán a teljes ózontartalom éves átlagainak a sokéves átlagtól való százalékos eltéréseit tüntettük fel Budapest felett az OMSZ mérései alapján 1969 és 2018 között. Jól érzékelhető a csökkenő trend a 90-es évek közepéig, és onnan kezdve a csökkenés megtorpanása, majd valamiféle regeneráció megindulása. A trendet egy kicsit torzítja a fülöp-szigeteki Pinatubo vulkán 1991-es kitörése, amelynek következtében olyan mennyiségű vulkáni anyag került az alsó sztratoszférába, amely már kimutatható ózoncsökkenést okozott. Ez az 1992-es és 1993-as évben hozzájárul az eleve jelenlévő „háttérscsökkenéshez”. A trendről nehéz egyértelmű megállapításokat tenni az utóbbi évtizedre vonatkozóan, de egy évtized nem is elegendő ez esetben megbízható következtetések levonására. A légkör rendkívül komplex fizikai rendszer, és a sok benne zajló folyamat, mechanizmus, és visszacsatolások stb. révén egy adott kiragadott fizikai mennyiség értékét, annak változását rengeteg tényező befolyásolja. Ezt jól mutatja a mi budapesti adatsorunk néhány részletének a szemügyre vétele. A 90-es évek közepéig tartó csökkenés az illesztett trendvonal feltüntetése nélkül is szembeütő, még a nem gyakorlott szemnek is. Nézzük most meg az ózon 80-as évtized alatti viselkedését. Jól láthatjuk, hogy abban az évtizedben egyértelműen növekedés volt tapasztalható. Akkor most ez azt jelenti, hogy hazánkban a világ más részeivel ellentétben nem is volt ózoncsökkenés? Nem, egyáltalán nem! Azt jelenti, hogy ha egy ilyen komplex fizikai rendszerben, mint a földi atmoszféra, kiválasztunk egy fizikai mennyiséget a sok közül, amire rengeteg egyéb, eleve sok minden mással kölcsönhatásban és visszacsatolásban lévő tényező hat, nem minden esetben, vagy nem minden rövidebb időszakra fogjuk a hosszú távra érvényes „fő effektust” látni. Azaz kicsit felületesen fogalmazva: a fő effektus sok esetben elveszik a sok tényező együttes hatása mellett, és csak elegendő hosszú időszak megválasztása esetén „válik láthatóvá”. Senki se kérdőjelezi meg azt, hogy a 80-as évtizedben hazánk felett ugyanúgy ózoncsökkenés volt, mint globális méretekben, pedig az évtized nagyobb részében ellenkező tendenciát tapasztaltunk.



6. ábra A teljes ózontartalom spektrofotométeres mérésekből számított éves átlagainak százalékos eltérése a sokéves átlagtól Budapest fölött az 1969-2018 időszakra

Feltűnő és már régóta tartó jelenség a nyári ózonhiány. A 90-es évek eleje óta, azaz két és fél évtizede (!) alig fordult elő, hogy a nyári hónapokban ne ózonhiány lett volna a jellemző. A nyári időszak (május-augusztus) átlagainak a sokéves nyári átlagtól való eltéréseit mutatja a 7. ábra. Szembetűnő, hogy a 90-es évek elejétől minden egyes nyáron negatív volt a sokéves nyári átlagtól való eltérés! Annyiban “vígasztaló” talán a kép, hogy az eltérésekben egy nagyon enyhe növekedő tendenciát tapasztalunk, ami az ábrán is látható, de ez nagyon kismértékű. A 1. táblázatban havi bontásban tüntettük fel az eltéréseket az utóbbi 20 évre. A négy hónapos nyári időszakokat figyelembe véve a 80 hónapból mindössze 9-ben (!) volt az átlagos eltérés pozitív, de ebből is 2 hónapot kivéve a pozitív eltérés jelentéktelenül kicsi. Az ok feltehetőleg a klíma megváltozásában keresendő. Az utóbbi évtizedekben gyakoribbá váltak a mediterrán beáramlások hazánk területére, főként nyaranként. Mivel normál esetben az ózon mennyisége az egyenlítőtől a pólusokig növekszik, a mediterrán légtömeg nagyobb eséllyel alacsonyabb ózontartalmú, mint a hazánk felett jellemző mennyiség. Ma még nem tudjuk megmondani, hogy ez az effektus, figyelembe véve az ózon folyamatainak az éghajlati rendszerrel való összetett kapcsolatát, mennyire fogja fékezni az ózon elkövetkező évtizedekben remélt növekedését (Tóth Z et al., 2019).



7. ábra A nyári időszak átlagainak eltérése a sokéves nyári átlagtól 1970 és 2018 között

Év	Május	Június	Július	Augusztus	Átlag
1999	-4.3	-6.5	-3.3	-2.8	-4.2
2000	-6.3	-7.9	-0.9	-5.3	-5.1
2001	-4.1	-1.1	0.6	-3.4	-2.0
2002	-6.3	-2.8	-1.2	3.8	-1.6
2003	-5.7	-5.9	-0.9	-0.6	-3.3
2004	1.1	-2.0	-2.7	-0.6	-1.1
2005	-6.0	-3.7	-0.3	0.6	-2.3
2006	-1.1	-0.8	-2.1	3.8	-0.1
2007	-5.3	-4.8	-5.7	-2.6	-4.6
2008	-1.4	-5.9	-4.4	-6.5	-4.6
2009	-6.8	-4.1	-5.5	-3.6	-5.0
2010	-1.3	-0.6	-0.6	-2.5	-1.3
2011	-2.0	-6.4	-4.0	-6.6	-4.8
2012	-4.6	-7.3	-5.1	-4.4	-5.4
2013	-4.5	-0.2	1.2	-1.6	-1.3
2014	-1.3	-1.6	-0.3	0.8	-0.6
2015	-2.7	-2.0	-5.1	-3.1	-3.2
2016	0.8	-5.1	-3.6	-4.1	-3.0
2017	-4.1	-6.5	-3.9	-6.0	-5.1
2018	-4.8	-2.2	0.0	-2.4	-2.4

1. táblázat A nyári időszak havi átlagainak eltérése a sokéves átlagtól az utóbbi 20 évben

Ózon adataink a nemzetközi porondon. Az ebben a témában nemzetközi projektekben történt tevékenységeink ismertetésére itt most sincs lehetőség, de megemlítjük, hogy a hazai ózonmérések jelentős szerepet játszottak több fontos nemzetközi vizsgálatban, kutatásban, és műholdas ózonmérések verifikációjában. Továbbá pl. a COST 713 akcióban az európai UV előrejelzések továbbfejlesztési és harmonizációs munkái során az ózon előrejelzési módszerek összehasonlító munkálataiban is fontos szerepük volt, valamint az elsők között vettük észre adataink segítségével a TOVS műhold ózonmérő spektrométerének egy meghibásodását a 90-es évek közepén (*Borbás et al, 1997*). Úttörőnek mondható az UV besugárzás ózontartalomtól való függésének elemzése mért ózon és UV sugárzási adatsoraink alapján (*Németh et al, 1996*). Részt vettünk abban a vizsgálatban is, amelynek során egy nagyobb létszámú nemzetközi kutató csoporttal a 2011-es, Közép-Európa feletti közel másfél hónapig fennálló mini-ózonlyuk viselkedését vizsgáltuk és elemeztük (*Petkov et al, 2014*). Adataink a WOUDC adatbázisában hozzáférhetőek az egyes országos WOUDC kapcsolattartó szakemberei számára.

Az ózonmérés jövője. Ahogy korábban említettük, ismerve a modern spektrofotometria fejlődését, a legújabb fejlesztéseket és a fejlődés tendenciáit a Brewer spektrofotométer feltehetőleg még sokáig az elsődleges eszköz lesz. Jelenleg kicsivel több, mint 230 Brewer működik szerte a világban, de a területi eloszlás sajnos nagyon nem homogén, mert ezek jelentős része Európában és Észak-Amerikában van, a többi kontinens részaránya nagyon kicsi, bár Ázsia kezd előretörni. A spektrofotometriában a jövő egyértelműen a diódasort alkalmazó eszközöké, mivel lényegesen kisebb méretűek és tömegűek a robusztus Brewereknél, és a napkövető kivételével gyakorlatilag nem tartalmaznak mozgó alkatrészt. Ezek pontossága és megbízhatósága azonban ma még nem éri el a hagyományos monokromátoros spektrofotométerekét, különösen a Brewerét.

Irodalom:

Borbás, É., Csiszár, I., Szenyán, I., Tóth, Z., Zsoldos, E., 1997: Operational use and evaluation of ITPP5 products at the Hungarian Meteorological Service. *Proc. IX. International TOVS Study*

Conference, Igls, Austria, 20-26 February 1997

Borbély E., 1966: Ózonmérések megindulása Magyarországon. *Légekör XI.* 4. 79-82.

Brewer, A. W., 1973: A replacement for the Dobson spectrophotometer? *Purer and Appl. Geophys.* 106-108, 919.

Brewer MKIII Spectrophotometer (Double Spectrophotometer), Operators' Manual. SCI-TEC Instruments, Inc., 1992.

Dobson, G. M. B., 1931: A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone. *P. Phys. Soc.*, 43, 324–339

Dobson, G. M. B., 1957, Observers' Handbook for the Dobson Spectrophotometer. *Produced from the annals of the International Geophysical Year – Vols. V and XVI, by permission of the Pergamon Press Ltd.*

Németh, P., Tóth, Z., Nagy, Z., 1996: Effect of weather conditions on UV-B radiation reaching the earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 32 (1996), 177-181.

Petkov, B., Vitale, V., Tomasi, C., Siani, A. M., Seckmeyer, G., Webb, A., Smedley, A., Lanconelli, C., Mazzola, M., Lupi, A., Busetto, M., Diémoz, H., Casale, G., Goutail, F., Köhler, U., Mendeva, B. T., Werner, R., Josefsson, W., Moore, D., Bartolomé, M. R., Moreta Gonzalez, J. R., Misaga, O., Dahlback, A., Tóth, Z., Varghese, S., De Backer, H., Stübi, R., Vaniček, K., 2014: Response of the ozone column over Europe to the 2011 Arctic ozone depletion event according to ground-based observations and assessment of the consequent variations in surface UV irradiance. *Atmospheric Environment, Volume 85, March 2014*, 169–178.

Tóth Z., 2017.: A Napból érkező ultraibolya-sugárzás nagy pontosságú mérésének problémái. *Fizikai Szemle, LXVII. évf.*, 7-8., 232-239.

Tóth Z., Páldy A., Antal Z. L., 2019: A földfelszínre érkező szoláris UV-besugárzás és a légköri ózon kapcsolata az éghajlati rendszerrel – fizikai háttér és társadalmi, egészségügyi vonatkozások. *Magyar Tudomány, 2019. 9. szám*, 1356-1375.