

# A NAPBÓL ÉRKEZŐ ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁS NAGY PONTOSSÁGÚ MÉRÉSÉNEK PROBLÉMÁI

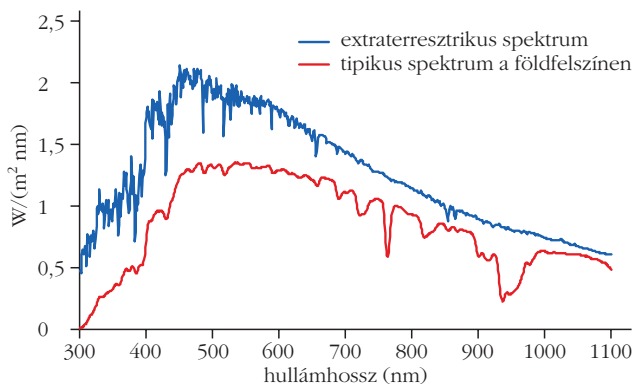
Tóth Zoltán  
Országos Meteorológiai Szolgálat  
Marczell György Főobszervatórium

## Az ultraibolya sugárzás hálózatszerű mérésének fontossága

Az ultraibolya sugárzás a földfelszínre érkező napsugárzás töredéke, következésképpen nincs számottevő szerepe a légköri energiaháztartásban (1. ábra). Ennek következtében körülbelül három évtizeddel ezelőtt még nem szerepelt a napsugárzásmérő hálózatok mérési programjában, csak egyes helyeken kísérleti, kutatási jelleggel mérték rövidebb-hosszabb ideig az UV-sugárzást. A biológiai rendszerekre való hatása viszont óriási, de nem feledkezhetünk meg a különböző anyagokra gyakorolt roncsoló hatásáról sem. A sztratoszferikus ózon csökkenésének felfedezése adott lökést a nemzeti UV-sugárzásmérő hálózatok létrejöttének. Ismeretes, hogy az ózon erősen abszorbeál az UV-tartományban, ezért a légkör ózontartalmának hatása döntő a földfelszínre érkező UV-sugárzás mennyiségének alakulásában. A mérési sorozatok feldolgozása alapján ma már biztosan állíthatjuk, hogy az ózonkárosító anyagok iparból történő kivonása sikerrel járt, megállt a légköri ózontartalom csökkenése, és megindult a regeneráció (visszanövekedés). Ebből logikusan következne, hogy az UV-sugárzás csökken. Laboratóriumban ez így is lenne. Tegyük fel, hogy egy tartályba ózont teszünk, a tartályt átvilágítjuk UV-sugárzással, és a „kijövő oldalon” mérjük az UV-sugárzást. A tartálybeli ózonkoncentráció növelésével a mért UV-sugárzásszint csökken. A természetes, földi légkörben azonban az ózontartalom növekedése ellenére az UV-sugárzás enyhe növekedését tapasztaljuk (2. ábra, 3. ábra). A légkörben, bár benne természetesen ugyanazok a fizikai törvények uralkodnak, mégsem ilyen egyszerű a hatásmechanizmus, ugyanis nagyon összetett fizikai rendszer, így bármely fizikai jellemzőjét sok tényező határozza meg. A földfelszínre érő sugárzás mennyiségét befolyásolja a légkör sugárzásátbocsátó képessége, amely döntően a légköri szennyező anyagok mennyiségétől, a felhőzet mennyiségétől



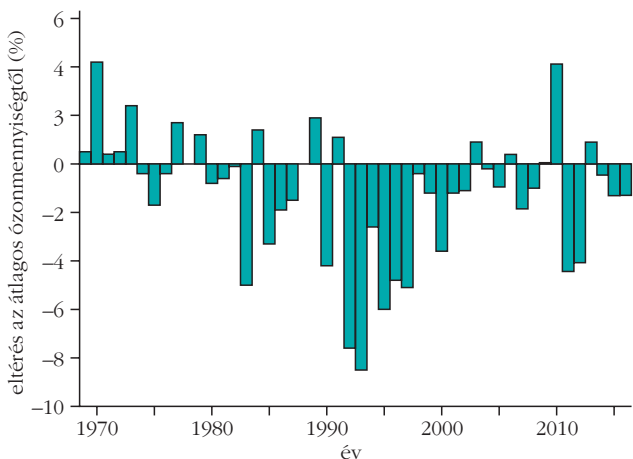
Tóth Zoltán (1961) az ELTE-n szerzett csillagász és meteorológus diplomát. Szakterülete a légköri napsugárzás-átvitel, nap-spektrofotometria, a légköri ózontartalom-mérés. Hazánkban először alkalmazta az ózontartalom zenitsugárzásból történő meghatározását. Az OMSZ hazai UV-sugárzásmérő hálózatának egyik megalapítója, fő működtetője. Nemzetközi kutatási projektek irányító testületének tagja. Az ELTE megbízott előadója, a Napsugárzás-védelmi Tudományos és Szakértői Testület elnökhelyettese.

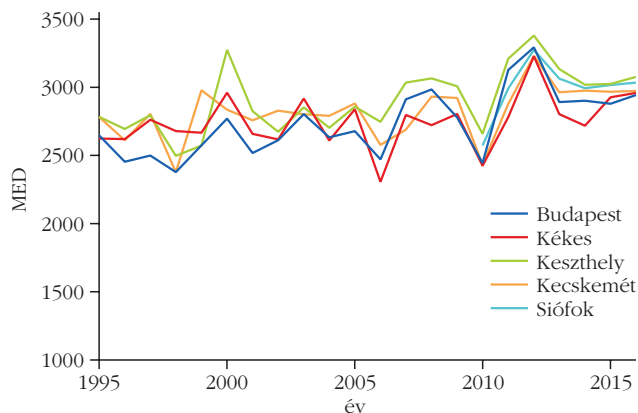


1. ábra. A Napból érkező elektromágneses sugárzás spektruma a légkörön kívül (extraterresztrikus spektrum) és a földfelszínen az OMSZ LI-1800 spektrofotométerével mérve.

és típusától, valamint a légkört alkotó gázok mennyiségétől függ [1]. Mivel ez utóbbi állandó, a felhőzet pedig ugyan erősen fluktuál rövid távon, de hosszú távú trend nem tapasztalható, így az első tényező a meghatározó. Az ipar modernizálása és a környezetvédelmi technikák bevezetése hatására csökken a légköri szennyező anyagok mennyisége, így a légkör sugárzásátbocsátó képessége növekszik (4. ábra). Ez persze csak tendenciában igaz, a nagyvárosokban felhőmentes esetekben is lehet igen alacsony a légkör átlátszó-sága [2]. A mérési adatsorok feldolgozása alapján azt állíthatjuk, hogy a légkör sugárzásátbocsátó képességének UV-sugárzásnövelő hatása túlkompenzálja az ózontartalom növekedésének UV-sugárzást csökkentő hatását, ezért tapasztaljuk az UV-sugárzás enyhe növekedését az ózommennyiség növekedése ellenére [3].

2. ábra. A teljes ózontartalom spektrofotométeres mérésekből számított éves átlagának százalékos eltérése a sokéves átlagtól Budapest fölött az 1969–2016 időszakra.





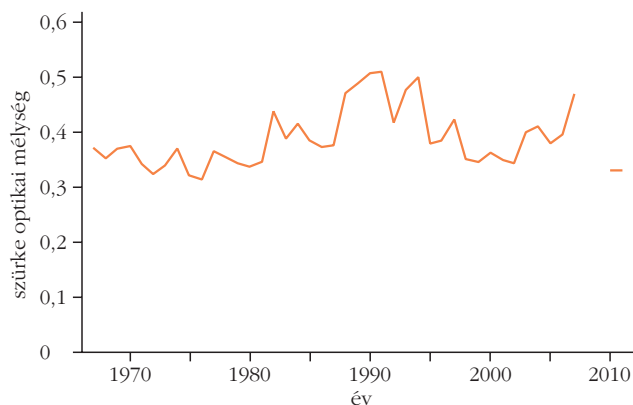
3. ábra. Az UV-sugárzás éves összegei az OMSZ mérőállomásain 1995 és 2016 között.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által hazánkban, 1994-ben indított, akkor 4 mérőállomással működő UV-mérőhálózat az első tíz között volt a világon, olyanokkal együtt, mint Spanyolországé, Lengyelországé, az Egyesült Királyságé, Ausztráliáé, az Amerikai Egyesült Államoké és Kanadáé. Manapság már majdnem minden európai országban méri az UV-sugárzás szintjét. Azonban maga a mérés, annak fizikai háttere és műszaki megvalósítása, a hálózat megfelelő pontossággal történő üzemeltetése nem egyszerű, és sok buktatóval jár, ha referenciaértékű mérésről van szó. Az UV-sugárzás pontos mérése drága, a mérőhálózat működtetése nagyon precíz és folyamatos ellenőrzést igényel, döntő fontosságú a megfelelő minőségbiztosítás (kalibráció, ellenőrzés, adatellenőrzés). Az utóbbi időkben a piacon megjelent közép- vagy alsó kategóriás UV-szenzorok megnehezítik az egész kép értelmezését, így ebben az írásban praktikus tanácsokkal is igyekszem ellátni az e témában kevésbé jártas olvasót.

## A beérkező sugárzás mértékegysége és értelmezése

A sugárzás mennyiségét az egységnyi felületre eső sugárzási teljesítményként,  $W/m^2$  adjuk meg. Ez a pillanatnyi mennyiséget jelöli, azaz hosszabb időtar-

4. ábra. A pirheliométeres mérésekből számított szürke optikai mélység éves átlagai Budapesten (nagyobb optikai mélység gyengébb átlátszóságot jelent).



míg, folyamatosan mérve a beérkező sugárzást, akkor a mérés végén az értelmezés kétféleképpen történhet: vagy az átlagot képezzük, vagy pedig a mérés időtartama alatt beérkező sugárzási energiát –  $J/m^2$  mértékegységben – számítjuk ki. Olyan laboratóriumi kísérleteknél, ahol a kísérlet alatt állandó nagyságú kibocsátott sugárzásra van szükségünk, és ennek stabilitását akarjuk ellenőrizni, nyilván célszerű az elemi mintavételek átlagolása. Természetes napsugárzásmérések esetén azonban a besugárzás napi menete van erőteljesen változik, éjszaka pedig hosszú ideig zérus, így a napi átlag nem igazán informatív, noha fizikailag nem inkorrekt. A légkörfizikai célú napsugárzás-mérési gyakorlatban alapvetően 10 perces adatokat használunk (speciális esetekben 1 perceseket), és a 10 perces érték még pillanatnyi adatot jelöl (noha a 10 percre vonatkozó érték az egyedi mintavételek átlagaként áll elő). Órás és annál hosszabb időtartamra már energiában adjuk meg a sugárzást.

## Biológiailag effektív UV-sugárzás

A Napból érkező UV-sugárzás pontos folyamatos mérése – mint említettük – élettani hatása miatt fontos. A biológiai rendszerek beérkező UV-sugárzásra adott válasza hullámhosszfüggő, ahogyan például szemünk is eltérően érzékeny a látható tartományon belüli hullámhosszakra. A biológiai rendszerek UV-érzékenységeinek spektrális eloszlását akciós spektrumnak nevezzük. Az emberi bőr akciós spektrumának külön elnevezése van: erythemaspektrum, amit a szabványosított McKinlay–Diffey-függvény ad meg [4]. Ha ismert egy biológiai rendszer akciós spektruma, az effektív dózis az alábbi módon számítható ki.

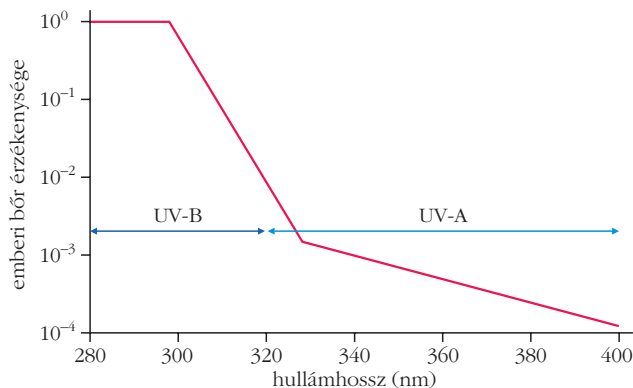
Legyen  $\lambda$  hullámhosszon a mért besugárzás teljesítménye  $I_\lambda$ , az adott biológiai rendszer spektrális válasza (az akciós spektrum  $\lambda$  hullámhosszon érvényes értéke)  $A_\lambda$ . Ekkor a biológiailag effektív besugárzás ( $I_{\text{eff},\lambda}$ ) a  $\lambda$  hullámhosszon:

$$I_{\text{eff},\lambda} = I_\lambda A_\lambda.$$

A teljes UV-tartományra vonatkozó biológiailag effektív sugárzás, azaz az effektív dózis az ezen spektrális értékek egész UV-tartományra (általában 300–400 nm) vett integrálja:

$$I_{\text{eff}} = \int_{300}^{400} I_\lambda A_\lambda d\lambda.$$

Az erythemaspektrum látható az 5. ábrán. Szembetűnő, hogy az emberi bőr érzékenysége egy szűk spektrumtartományon erősen változik: míg 300 nm-es értéke 1, addig 330 nm-en már csak 0,001, azaz az érzékenység mindössze 30 nm alatt egy ezredére esik. A 6. ábrán egy adott időpontban a Brewer-spektrofotométerünkkel felvett fizikai spektrumot, és az abból számított biológiailag effektív spektrumot tüntettük fel. Feltűnő, hogy mennyire különbözik a „biológiai” spektrum a „fizikai” spektrumtól: a görbe lefutása



5. ábra. Az emberi bőr UV-sugárzásra való érzékenysége hullámhosszfüggése (erythemaspektrum) [4].

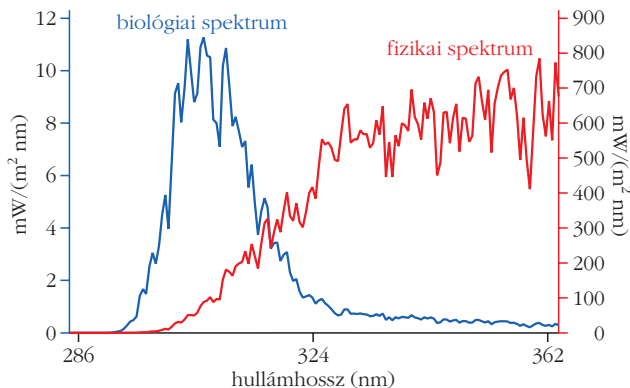
majdnem egymással ellentétes. Mivel a bőr a legrövidebb hullámhosszakra nagyon, és a hosszabbakra szinte alig érzékeny, a biológiailag effektív sugárzás azokon a hullámhosszakon lesz jelentős, ahol nagyon alacsonyan a beérkező fotonok száma. Ez jól mutatja, hogy ha az UV-sugárzás biológiai rendszerre való hatását akarjuk mérni, akkor a rendszer UV-sugárzásra adott válaszána figyelembevétele nélkül teljesen hibás eredményre jutunk, hiába mértük meg a lehető legpontosabban a sugárzást.

Az erythemával súlyozott UV-sugárzás speciális mértékegysége a MED/h (MED = Minimal Erythema Dose). Ez azt a sugárzásteljesítményt jelenti, amelynek konstans értékével egy II-es típusú bőrt [5] besugározva, a bőrön 1 óra alatt jelenik meg a bőrpír.

Ez még egy bőrtípuson belül, egyéenként is kissé változik, ezért a pontos számításokhoz és azok összehasonlíthatóságához szabványosítás szükséges. A szabványos átváltás SI mértékegysége:  $1 \text{ MED/h} = 0,058275 \text{ W m}^{-2}$ , órás és hosszabb időtartamra vonatkozó energia esetén:  $1 \text{ MED} = 210 \text{ J m}^{-2}$ .

## Az elektromágneses sugárzás detektálásának alapelve

A sugárzás kvantitatív mérésének még egy évszázados múltja sincs. Bár korábban is létezett sugárzásmérés, azonban a kalorimetrián alapuló mérések nem tekinthetők „igazán pontosoknak”. Azonban a német *Wilhelm Hallwachs*, aki *Heinrich Hertz* asszisztense volt, 1887-ben egy kísérlet során azt találta, ha UV-fotonokkal sugároz be egy negatív töltésű, elektromosan szigetelt fémlemezre, akkor az elveszíti töltését, és a hatás hullámhosszfüggő. A jelenség magyarázata, hogy a fémbe belépő fotonok hatására abból elektronok lépnek ki, ezt Hertz később fényelektromos hatásnak nevezte el, de Hallwachs-hatásként is emlegetik. A jelenséget *Albert Einstein* magyarázta meg, aki ezért 1921-ben Nobel-díjat kapott. Einstein e munkája nyomán a jelenség pontosan számíthatóvá vált: ha precízen megméri a kilépő áramot vagy feszültséget, abból ki lehet számítani a belépő fotonok mennyiségét. Ez ma is a modern sugárzásmérés alapja: olyan eszközre van szükség, amiben a belépő fotonok



6. ábra. Brewer-spektrófotométerrel mért „fizikai” és „biológiai” spektrumok.

mennyiségével arányos áram képződik. Ennek műszaki megvalósítása nem egyszerű, és igen sok megoldás kínálkozik a hullámhossztartománytól, annak szélességétől, az elvárt pontosságtól, a megvalósíthatóság anyagi vonzataitól stb. függően. Ez külön írás témája lehetne.

## Amíg a beérkező fotonokból elektromos jel lesz

Minden mérésnek, a legprecízebbnek is van valamikora hibája. A hibák elkerülhetetlenek, és a mérőberendezésen belül minden olyan eszköz, amely a fotonok útjában van, befolyásolja a végül kijövő jelet. Ezért elsődleges fontosságú arra törekedni a mérőberendezés tervezésénél, hogy minden szegmens a lehető legkisebb mértékben járjon a hibához, és pontosan ismerjük e hibákat. A megvalósítás költségei persze annál magasabbak, minél nagyobb pontosságra törekszünk. Ez az oka annak, hogy többféle árkatégoriájú mérőeszköz létezik.

A sugárzásméréseknél el kell különítenünk a széles spektrumtartományon történő mérést, amely esetén a teljes tartományra vonatkozó integrált érték áll elő, és a nagy hullámhosszfelbontású, úgynevezett spektrális mérést, ahol minden egyes hullámhosszon (spektrális felbontástól függően) előáll egy mért érték. Az UV-sugárzás mérése alapvetően drága mérés-technika, de a széles tartományú mérés kevésbé költséges, mint a spektrális. Ennek fő oka az, hogy egy spektrométer jóval összetettebb felépítésű, tele precíziós optoelektronikai alkatrészsel és mechanikai mozgó alkatrészsel, amelyek ráadásul hosszú élettartamúak kell legyenek. Hosszú távú, szabadtéri mérésekről van szó, ezért mindkét esetben nagyon fontos az „időjárás-állóság”. Természetesen mind a széles sávú, mind a spektrális mérések esetén is többféle pontossági – azaz tulajdonképpen – (ár-)kategória létezik.

A detektorként szolgáló eszköz két legfontosabb paramétere az érzékenység és a sötétáram (más néven offset). Az érzékenység a létrejövő áram és a beeső sugárzási teljesítmény hányadosa. Az érzékenység a fizikai mérés-technikában kifejezhető kvantumhatás-

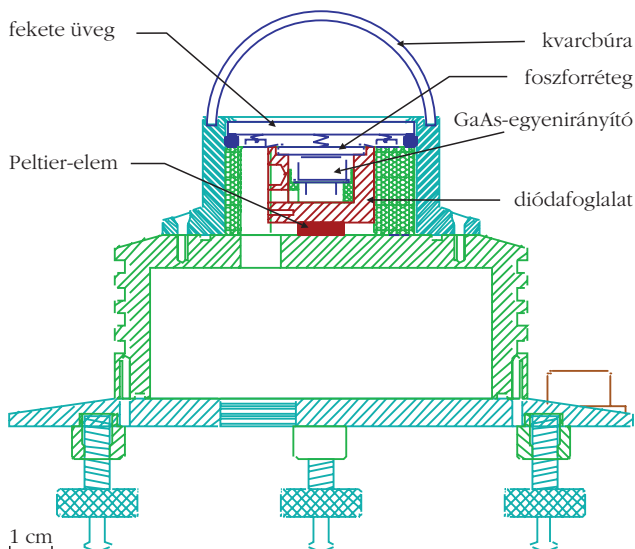
fokként, vagy a létrehozott elektronok és a beeső fotonok hányadosaként. Az érzékenységet a szaknyelv a detektor „válaszának” nevezi (response).

A sötétáram a tulajdonképpeni zaj, vagyis az eszköz valamely részében keletkező elektronok által létrehozott olyan jel, amely nem része a tényleges mérendő jelnek, így az a detektorba jutva mérési hibát okoz. Ezt pontosan ismerni kell, és a „valódi” jelnél több nagyságrenddel kisebbnek kell lennie. Legalapvetőbb forrása a berendezésben folyó áramok hőtermelése miatt létrejövő termikus elektronok. A mérési zaj feszültségben van megadva, és az annak megfelelő mért sugárzást „zajekvivalens sugárzásnak” hívjuk.

## Széles sávú („broad band”) és spektrális UV-érzékelés

Széles sávú UV-mérők esetén detektorként UV-re érzékeny egyenirányítót (diódát) alkalmaznak. A 7. ábrán egy széles sávú UV-detektor (gyártó: Solar Light [7]) felépítését láthatjuk. Az UV-fotonok egy diffúzoron keresztül lépnek a műszertestbe. A diffúzor szerepe az, hogy a különböző irányból érkező fotonokat a beesési szög koszinuszának megfelelően (Lambert-féle koszinusz-törvény) szórja az optikai rendszerbe. Ezután a fotonok egy fekete üvegen haladnak át, amely kiszűri a látható hullámhosszak túlnyomó részét, hogy minél kevesebb „felesleges”, a mérési zajt növelő foton jusson az érzékelőre. Ezután egy foszforrétegre kerülnek, amelyből a beérkező fotonok hatására látható tartományú fotonok lépnek ki. Így az érzékelés egyszerűsödik, és olcsóbbá válik: a detektornak látható fotonokat kell érzékelnie. A közbelső lépés beiktatása a fotonok elektromos jellé történő átalakítására nyilván a pontosság csökkenésével jár. A nyereség ugyanakkor az, hogy a látható fotonok érzékelése pontosabb, mint az UV-fotonoké.

7. ábra. A Solar Light széles sávú UV-detektor felépítése.



A detektor érzékenysége hőmérsékletfüggő, ezért a „komolyabb” detektorok fontos része a Peltier-elem, amely biztosítja, hogy a detektor hőmérséklete mindig a gyári kalibrációnak megfelelő értékű legyen. Az ilyen detektoroknál – a sugárzás értéke mellett – a hőmérséklet is kimenő adat, így a Peltier-elem meghibásodása esetén a gyártó által megadott formulával számítható a hőmérsékleti korrekció.

Minden széles sávú UV-mérőnél fontos a karakterizáció, azaz az összes olyan faktor meghatározása, amely befolyásolja az eszköz által mért sugárzás értékét.

A mért  $E$  sugárzásérték a következőképpen adódik:

$$E = (S - S_0) c_0 c_1(O_3, SZA) c_2(SZA) c_3(T) c_4(rH) c_5(S),$$

ahol  $S$  az eszköz által kiadott elektromos jel (leginkább feszültség, de lehet áram is),  $S_0$  a kiadott elektromos jel zérus besugárzás esetén (offset),  $O_3$  a légkör ózontartalma,  $SZA$  a Nap zenittávolsága,  $T$  a detektor hőmérséklet és  $rH$  relatív nedvesség. A  $c$  értékek a paraméterezés együtthatói, a  $c_5(S)$  tag a lineáris függéstől való eltérést jelenti (általában elhanyagolhatóan kicsi).

Az ózontartalom-függés azért van, mert az UV-tartományban az ózon erősen abszorbeál, és az ózontartalom módosítja a spektrális eloszlást, a detektor érzékenysége pedig erősen hullámhosszfüggő az erythema-függvény használata miatt.

$c_3(T) = 1$  a Peltier-elemet tartalmazó detektoroknál,  $c_4(rH) = 1$ , amelyekben nedvességszívó anyag (szilikagél) van, amit időnként cserélni kell.

A spektrális mérés kétféleképpen történhet: szűrő (filter) vagy monokromátor alkalmazásával. A szűrő a sugárzás szűk hullámhossztartományán áteresztő optikai eszköz. Az áteresztési függvény (szűrőfüggvény) ismeretében számítható a centrális hullámhosszra érvényes mért érték. Még nagyon jó filter esetén is ez a spektrális érzékelés kevésbé pontos fajtája.

A legpontosabb érzékelésfajta a monokromátor alkalmazása. A monokromátor a beérkező polikromatikus sugárzást egy nagy pontosságú diffrakciós rács segítségével szűk hullámhosszú sávokra osztja, azaz kvázi-monokromatikus sugárzássá alakítja.

## Referenciaértékű spektrális UV-sugárzásmérés – a Brewer-spektrofotométer

Az UV-sugárzás mérésére ma a legpontosabb, legmegbízhatóbb és ezáltal elsődleges referenciának minősülő berendezés a Brewer-spektrofotométer. Jelenleg alig több mint 200 ilyen működik a világon, ezek közül egy az OMSZ Marczell György Főosztályában, amelyet 1998-ban installáltunk. A Brewer-spektrofotométer igen összetett felépítésű berendezés, és itt nem lehet cél a működésének részletes ismertetése (8. ábra).

A Brewer-spektrofotométert úgy tervezték, hogy a kornak megfelelő legpontosabb mérés technikát – a napkövető mechanikát, az optikát, az elektronikát és

a belső precíziós mechanikát (nagy pontosságú mozgatómotorok, mikrométerek stb.) – alkalmazza. Továbbá alkalmas automatikus, folyamatos, operatív mérésre, és élettartama – szabadtéri működés mellett, bármilyen zord körülmények között – hosszú. Ezek mellett a folyamatos, nagy pontosságú ellenőrizhetőséget is meg kellett valósítani úgy, hogy minden egyes lényeges szegmense operatív módon automatikusan ellenőrizve legyen a működés közben, és ezt a működtető szakember programozott – és szükség szerint kézi – vezérléssel folyamatosan követni tudja. Továbbá időnkénti labortesztek elvégzésére is lehetőséget kell nyújtson.

A Brewer-spektrófotométer felépítésének elméleti alapjait kanadai fizikusok dolgozták ki az 1970-es években, majd a műszaki megvalósítást a kanadai Saskatoonban működő SCI-TEC cég szakembereivel közösen végezték el. A prototípus 1981-ben készült el, és további fejlesztések után a 80-as évek közepén kezdték gyártani. Nyilván azóta is fejlesztették, de a hagyományos optoelektronikát és mechanikát alkalmazó mérés technológiával nem lehet precízebbet kifejleszteni.

A Brewer-spektrófotométer 286,5 és 363 nm között 0,5 nm spektrális felbontással méri meg az UV-sugárzást, továbbá öt hullámhosszon történő mérésből, a Dobson-féle relatív intenzitások módszerével a légszlop teljes ózontartalmát is meghatározza, és ebben jelenleg szintén a legpontosabb a világon.

Igen komplex előoptika működik benne, amelynek első szegmensei a belépő apertúrák. A Brewer-spektrófotométernek két különböző belépő apertúrája van, az egyik a globál UV-sugárzás mérésekor használatos, a másik pedig a direkt UV-sugárzás (a napkorong térszögéből érkező UV-fotonok) mérésekor. Az előoptika következő fontos szegmense a szűrőkerék, ami az előszűrést és a szórt fény (stray light, a jel fotonjai közé szóródott egyéb fotonok) szűrését végzi. Továbbá ezzel biztosítják a zérus beérkező sugárzást a sötétáram-tesztekhez.

Ezután a belépő résen a főoptikába – amelynek „lelke” a monokromátor – jutnak a fotonok. Minél kisebb a belépő rés, annál inkább „spektrálisan tiszta” lesz a felbontott sugárzás. Az optikai rács tulajdonképpen hullámhosszfelbontó komponens a monokromátorban. A rácson történő diffrakció eredménye, hogy a különböző hullámhosszak kissé eltérő szögekben érnek a kilépő réshez. A belépő rés és a rács síkja közti szög változtatásával lehet elérni, hogy csak a kiválasztott hullámhosszak haladjanak át a kilépő résen, míg a többit a monokromátor belsejében (speciális fekete felülettel) elnyelik. A rácson a rovátkák kialakítása már évtizedek óta nem mechanikai úton történik, hanem a rovátkaszerkezetet holografikusan fotózzák az anyagra.

A fotonok a kilépő résen távoznak a monokromátorból. A kilépő rés behatárolja és definiálja a detektorba jutó hullámhosszsávot. Szélessége közvetlenül meghatározza a detektorra jutó spektrális sáv felszélességét.



8. ábra. A Budapesten működő (152-es számú) Brewer-spektrófotométer.

Minél szűkebb a rés, annál nagyobb felbontás érhető el, viszont ezzel együtt csökken a detektort érő fotonok száma, következésképpen csökken a jel/zaj viszony. Többféle rés áll rendelkezésre, és az egyes mérésfajtákhoz kiválasztható a megfelelő résméret.

A zaj további csökkentésére dupla monokromátort alkalmaznak.

A Brewer-spektrófotométer érzékelője egy fotoelektron-sokszorozó, amelynek holtideje (az az időtartam, amíg a detektor egy esemény [fotonbeérkezés] után nem képes érzékelni a következő eseményt)  $10^{-7}$  s nagyságrendű. A mérés során a holtidőt is folyamatosan, automatikusan nyomon követjük, így ha a gyári értéktől jelentős eltérés mutatkozik, meg lehet tenni a szükséges lépéseket. Nagyon fontos a fotoelektron-sokszorozó (1700-1800 V körüli) feszültségének stabilitása. E feszültség pontos meglétét is folyamatosan ellenőrizzük. A mérési és működésellenőrzési adatokat a Brewer vezérlő számítógépén – amin a vezérlőprogram is fut – rögzítjük. A végleges archiválásra az adatok feldolgozása után kerül sor.

A Brewer által mért spektrumokból bármilyen biológiai rendszerre/hatásra ki tudjuk számítani a biológiailag hatékony sugárzást. Az emberi bőrre hatékony (erythemával súlyozott) spektrumokat operatív módon számítjuk, így ezek alapján rendelkezésre állnak az adatbázisunkban.

A működés ellenőrzése több módon folyik. A kalibrálással gyárilag hiteles állapotban tartjuk a berendezést, azaz biztosítjuk a visszakövethetőséget (traceability). A tulajdonképpen hitelesítés (bár a minőségbiztosítási szaknyelv szerint ez nem hitelesítés, mert szabadtérien, természetes körülmények közötti mérési adato-

kat szolgáltató mérőeszköznél ez nem tehető meg a mérésen hivatalos definíciója szerint) legfontosabb lépése az etalonként működő elsődleges standard Brewerhez történő kalibrálás. A Brewer-spektrométerek elsődleges standard csoportja egy három Brewer-spektrofotométert tartalmazó műszer-csoport, amelyet folyamatos laboratóriumi és szabadtéri ellenőrzés alatt tartanak, és szinte alkatrészenként rendszeresen ellenőrznek. Ezt a Brewer Triádot a torontói székhelyű IOS (International Ozone Service) elnevezésű cég működteti. A háromból egyet meghatározott időközönként a 4000 m tengerszint feletti magasságban lévő Mauna Loa Observatóriumba szállítanak egy mérőszorozatra, amely magasság felett már „szinte nincs légkör”, így gyakorlatilag a Nap légkörön kívüli (műholdas) mérésekből jól ismert spektrumát mérheti, azaz ki van kizárva a légkör zavaró hatása. A világ különböző pontjain működő Brewer-spektrofotométerek kalibrálása egy utazó standard Brewerrel történik, amit szintén az IOS működtet. Az utazó standardot kalibrálják a referenciacsoporthoz, az egyes Brewerek pedig az utazó standardhoz, így adódik át a referenciaskála.

Az állomási kalibráció két részből áll. Az egyik a napi rendszerességgel futó rutintesztek, a másik a külső gyári standard sugárforrásokkal havonta végzett kalibrálások.

A napi rutintesztek két legfontosabbja a Hg-lámpa teszt és a belső standard lámpa teszt.

A higanylámpateszt célja annak ellenőrzése, hogy pontosan történik-e a hullámhosszak kiválasztása. A teszt azt vizsgálja, hogy a higany emissziós vonalainak csúcsát a megfelelő helyen találja-e meg a monokromátor. A mérési programot úgy dolgoztuk ki, hogy minden egyes mérési sorozat (ózonmérés és UV-spektrum mérés) előtt lefusson egy Hg-lámpateszt. Ha ez a teszt sikertelen, a mérés automatikusan leáll. A belső standardlámpateszt a detektor pontosságának ellenőrzésére szolgál, és a mi mérési gyakorlatunkban naponta háromszor fut le. Érdemes megemlíteni a brewer referencia-UV-mérések minőségbiztosításának legújabb nemzetközi fejlesztési munkálatait. Ezek a „COST ES1207 – EUBrewNet” (<http://www.eubrewnet.org/cost1207/>) elnevezésű, Európán kívüli résztvevőkkel együttműködő EU projekt keretében folynak, amelyben hazánk részéről e sorok írója dolgozik. Ennek célja az európai Brewer-spektrofotométeres monitoring állomások olyan koherens mérőhálózatának létrehozása, amely a berendezés optoelektronikájának minden egyes szegmense operatív nyomon követésével konzisztens minőségellenőrzési és minőségbiztosítási eljárás alapján működik, mind a spektrális UV, a teljes ózontartalom és az aeroszol optikai mélység mérésének tekintetében. Továbbá általános fejlesztések is történnek az UV-spektrofotometria területén.

Néhány fontosabbat felsorolunk az e projekt keretében végzett munkáinkból, érzékeltetésül, hogy ma-napság a modern spektrofotometriában milyen részleteket kell vizsgálni a referencia értékű mérések szinten tartása és a még nagyobb pontosság/megbízhatóság elérése érdekében.

Módszert dolgoztunk ki az UV- és látható tartományokban meghatározott spektrális sugárzásátbocsátó képesség közötti összefüggés vizsgálatára különböző sugárzásátbocsátási helyzetekre, különös tekintettel extrém esetekre (vulkáni por, szaharai homok) nap-spektrofotométeres és napfotométeres mérések alkalmazásával.

Az eddigieknél pontosabb módszereket dolgozunk ki a fotoelektron-sokszorozó és a spektrális válaszfüggvény hőmérsékletfüggésének vizsgálatára, a hőmérsékletfüggés hullámhosszfüggésének ellenőrzésére, ezek összehasonlítására a szimpla és dupla monokromátoros Brewerekre, valamint a régi és új verziójú elektronikával működő Brewerekre.

Az erre alakult munkacsoportunk egy hosszabb kísérletsorozattal kvantitatívan kimutatta, hogy mekkora a kalibráló standard lámpa melegítő hatása a teflon diffúzor hőmérsékletére. Ezt eddig senki, a gyártó sem vizsgálta, ugyanakkor hatással van a kalibrációra.

A Budapesten működő Brewert sikeresen bekötöttük a Brewerek kísérleti on-line hálózatába, amelyben az optoelektronika nyers tesztadatainak kvázi-real-time ellenőrzése operatív módon folyik egy Madridban működő központi szerveren.

## A mért adatok

A pontos mérési adat előállításához feltételezzük, hogy a spektrométerünk kalibrált. Ez azt jelenti, hogy a gyárilag ajánlott időközönként kalibráltuk az abszolút standard sugárforráshoz, vagy olyan sugárforráshoz, amelynek érvényes kalibrálási bizonyítványa van arról, hogy az abszolút standard sugárforráshoz kalibrált.

Ezek figyelembevételével egy adott  $\lambda$  hullámhosszon a mért spektrális sugárzásáram-sűrűség ( $E_{U\lambda}$ ) az alábbi módon áll elő (mivel az alábbiak egy adott  $\lambda$  hullámhosszra vonatkoznak, a  $\lambda$  nem szerepel az indexekben).

Legyen  $E_S$  az abszolút standard sugárforrás által kisugárzott sugárzásáram-sűrűség ( $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ),  $D_S$  pedig az ezzel besugárzott detektor által kiadott feszültség (mV). Ekkor a korábbiak alapján a detektor  $K$  spektrális válasza:

$$K = \frac{D_S}{E_S}$$

$K$  mértékegysége értelemszerűen:  $\text{mV m}^2 \text{nm W}^{-1}$ .

Legyen  $E_U$  az ismeretlen sugárforrásból (Nap) származó spektrális sugárzásáram-sűrűség ( $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ), a detektor által ennek hatására kiadott feszültség pedig  $D_U$  (mV). Ekkor:

$$E_U = \frac{D_U}{K}$$

Így a mért spektrumot az egyes  $\lambda$  hullámhosszon előálló  $E_U$  értékek sorozata adja.

## UV-sugárzásmérő hálózatok

Mérőhálózatok működtetésénél minden szinten fontos az egységesség. Ezért elsődleges fontosságú, hogy a mérőhálózatunk minden mérőállomásán ugyanolyan típusú eszközöket használjunk, hiszen még az azonos alapelven működő eszközök műszaki megvalósítása is kissé eltérő lehet különböző gyártóknál. Legalább egy referenciaeszközzel van szükség, amit sötétben tartanak, és csak kalibrálásra vesznek elő. A célszerű eljárás az, ha az egyes mérőállomásokon széles sávú UV-detektorok működnek, amelyek egyszerűbb felépítésük következtében nem igényelnek állandó szakmai felügyeletet. A mi hazai hálózatunk öt UV-mérőállomásból áll: Budapest, Kecskemét, Kékestető, Sármellék, Siófok. Budapesten, az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában tartjuk a referenciadetektort, amit évente egyszer a Brewer-spektrófotométerhez, mint elsődleges referenciahoz kalibrálunk, és ehhez kalibráljuk az állomási detektorokat, alapesetben évente legalább egyszer. Minden hálózati detektor kap egy szorzófaktort a kalibráció után. A szorzófaktor lehet egészen nagy, akár 2 fölötti is, ha azt stabilan tartja, akkor nem okoz problémát. Azonban, ha a detektor koszinusz-korrektúrája romlik, vagy eleve gyárilag nem elég jó, akkor a szorzószámnak jelentős napmagasságfüggése lehet. Ebben az esetben vagy napmagasságfüggő szorzófaktorot kell alkalmazni, ami csökkenti a mérés pontosságát, mert eltérő égboltviszonyok mellett különböző lehet ez a függés, vagy le kell cserélni a detektort.

Továbbá, különösen a nyári időszakban, olykor előfordulhat erős UV-sugárzás hatása miatti érzékenységsökkenés. Ha ennek gyanúja merül fel a folytonosan nyomon követett mérési adatok alapján, akkor az adott detektort úgynevezett „távkalibrálási” módszerrel ellenőrizzük. Ez nyilvánvalóan nem „igazi” kalibrálás, de általa tetten érhető a kalibrációs faktor esetleges változása. Ezt egy adott vidéki hálózati detektor esetén a következőképpen végezzük el. Minden olyan napon, amikor teljesen derült volt az égbolt mind Budapesten, mind a szóban forgó mérőhelyen, mindkét helyen mért megfelelő más napsugárzási paraméterek összehasonlításával megvizsgáljuk, hogy milyen volt a légkör sugárzásátbocsátó képessége. Ha az általunk használt kritériumok szerint a két helyen a napsugárzás-átbocsátó képesség eléggé közel volt egymáshoz, akkor a budapesti Brewer-spektrófotométeres adatok és az adott hálózati detektor adatai összehasonlíthatók egymással. Ha az eltérés nagyobb az indokoltnál, akkor detektorcserre szükséges.

Az UV-mérőhálózatokban használt készülékek közül a legerjedtebb a Solar Light, mivel ez a legrégebb óta gyártott eszköz, így hosszú távú megbízhatóság tekintetében a legtöbb tapasztalat ezzel kapcsolatban gyűlt össze. Az OMSZ mérőhálózatában is ilyen eszközöket használunk.

A fentiekből kiderül, hogy milyen fontos a minőségbiztosítási eljárás minden egyes lépése. Például, ha

a Budapesten működő Brewer-spektrófotométer résmaszkoló motorjának tápfeszültsége nem pontosan az előírt 12 V, akkor az UV-dózis Siófokon mért értékét is befolyásolja.

Az UV-sugárzásmérő hálózatok működtetésére és a kalibrálási eljárásokra egy ajánlott egységes módszert dolgoztunk ki egy korábbi EU kutatási projekt (COST 726) keretében működő munkacsoportban [7].

Fontos megjegyezni, hogy a minőségbiztosítási eljárások egy-egy mérési adat megkívánt pontosságát biztosítják, a biológiailag effektív érték azonban még így is csak tájékoztató jellegű, ha egy adott személyre, adott időszakban gyakorolt hatásról van szó. A pontosan megmért és abból számolt, például emberi bőrre hatékony UV-dózis referenciaérték az adott körülmények között, de egy adott személyre nem pontos, hiszen a hatás függ attól, hogy az illető milyen helyzetben van, mennyire takart a teste ruhával, milyen irányban mozog stb. Továbbá a szemre gyakorolt hatás speciális, hiszen nagy eséllyel álló helyzetben tartózkodunk a szabadban, így – főleg derült időben – alacsony napálláskor a szemünket érő UV-sugárzás még veszélyesebb lehet.

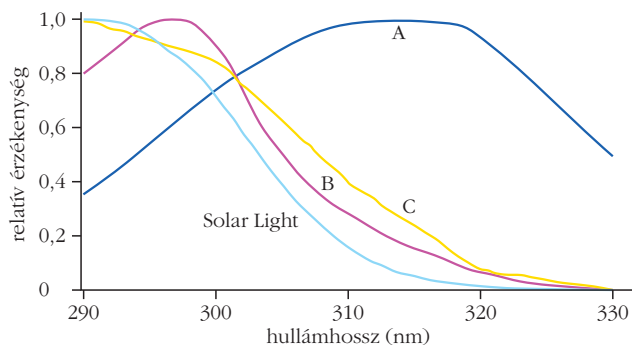
## Egyéb olcsóbb UV-detektorok

Az UV-sugárzás iránt egyre fokozódó érdeklődés hatására egy sor műszergyártó cég – meglovagolva a téma „divatossá válását” – UV-sugárzásérzékelőket kezdett gyártani. A professzionális mérés technikánál alacsonyabb árkategóriájú szenzorok pontossága elég széles sávban, és jóval a professzionális érzékelők pontossága alatti tartományban mozog.

További probléma az alkalmazott súlyfüggvény. Meglepő módon, több, konstrukciója miatt még komolyabbnak nevezhető UV-detektorban nem elég pontosan alkalmazzák a standard McKinlay–Diffey-függvényt. Ezekkel a detektorokkal úgy kerültünk „közelebbi kapcsolatba”, hogy egy hazai intézmény számára kalibráltuk azokat. A 9. ábrán három ilyen UV-detektor spektrális válaszfüggvényét tüntettük fel, nem jelezve a gyártók neveit, elkerülendő az esetleges hitelrontási vádat. Így a név helyett *A*, *B*, *C* betűkkel jelöltük azokat. Jól látható, hogy a válaszfüggvények jelentősen eltérnek a McKinlay–Diffey-spektrumtól, sőt az *A* jelű közelítőleg sem hasonlít arra. Ennek következtében az általuk mért effektív dózis jelentősen különbözne a valóditól abban az esetben is, ha a detektor amúgy igen pontos lenne. Mivel ezek nem spektrális eszközök, így az érték utólag se korrigálható.

Így a gyanútlan vásárló egy elsőre jónak tűnő, de használhatatlan mérőeszközt kap.

Manapság tendencia, hogy az oktatás számára különböző projekteket hirdetnek meg, amelyek keretében csatlakozni lehet bizonyos mérési kampányokhoz, ezzel is „testközelből” megismertette a tudományos igényű mérési tevékenységet a diákokkal. Például egy futó program keretében egy egyszerű foto-



9. ábra. Különböző „kommersz” UV-detektorok és a Solar Light 501 UV-detektor spektrális válaszfüggvénye.

méterrel aeroszol optikai mélységet mérnek a diákok. Az ilyenek esetében nagyon fontos, hogy az adott oktatási intézménynél a program koordinálásával megbízott tanár mindenképpen konzultáljon szakemberrel az esetleges műszerbeszerzéskor. A szakember általában a professzionális mérés technikát ismeri, de mivel nagy tapasztalata van, és rálát a szakterületre, az adott eszköz megadott gyári specifikációiból és egyéb esetleg rendelkezésre álló adatokból megbízható véleményt tud kialakítani a beszerzendő mérőműszerekről.

Ne felejtjük, már az gyanús, ha nem talál részletes specifikációt az érdeklődő a gyártó honlapján az adott eszközzel!

## A jövő UV-méréstechnikája

A modernizáció természetesen az UV-méréstechnikában is fontos szerepet játszik. Az utóbbi évtizedben nagy lendületet vett a töltéscsatolt detektort (CCD) alkalmazó diódasoros spektrométerek (diode-array spectrometer) fejlesztése. Ezek gyorsaságban messze túlszárnyalják a hagyományos monokromátoros spektrométereket. Összehasonlításként: míg a Brewer-spektrofotométer körülbelül 5 perc alatt állít elő egy

10. ábra. A Napsugárzási Világközpontban kifejlesztett diódasoros spektrofotométer.



UV-spektrumot a 286,5 és 363 nm hullámhosszak között, addig egy diódasoros spektrométer a másodperc tört része alatt – ha kell, jóval nagyobb spektrális felbontással is – 50 spektrumot állít elő. Előnyük továbbá az is, hogy súlyuk egy hagyományos spektrofotométer súlyának tizede, legfeljebb 2-3 kg, és mozgó alkatrészeket egyáltalán nem tartalmaznak. Azonban ezek a modern eszközök pontosságban és megbízhatóságban még jelentősen a hagyományos mérés technika alatt maradnak.

A svájci Davosban működő Napsugárzási Világközpontban (World Radiation Center) több éves munkával az addigiaknál jóval pontosabb diódasoros spektrofotométert fejlesztettek ki (10. ábra), amelynek operatív üzemben működő prototípusa 2013-ban készült el. Néhány példány több helyen hosszú távú tesztelés alatt van, de már megrendelésre is gyártanak. Ezek pontosabbak a hasonló elven működő eddigi eszközöknél, és van még néhány ígéretes típus. Az OMSZ is beszerzett egyet, amellyel a kezdeti eredmények nem is tűnnek rossznak. Valószínűleg a közeljövőben a pontosabb típusok már lassanként elkezdhetnek „beszivárogni” a mérőhálózatokba, ugyanis bizonyos körülmények között jelentőségük megnő. A gyorsan változó felhőzet idején felvett UV-spektrumok a Brewer-spektrofotométerrel vagy más UV-spektroradiométerekkel nem értelmezhetők, és így használhatatlanok. Gondoljuk csak el: vannak időjárásirányító helyzetek, például nagyon erős szél esetén, amikor akár 10-20 másodperc alatt jelentősen változik a felhőzet az égbolton. Figyelembe véve, hogy a Brewer 5 perc alatt szkenneli végig az UV-spektrumot, a spektrum 300 nm körüli tartománya egészen más felhőstruktúra alatti viszonyokat tükröz, mint mondjuk a 330 nm körüli. Azonban egy szupergyors diódasoros spektrométer gyorsabb, mint a felhőzet átrendeződésének sebessége, és a mért spektrum minden hullámhosszra egyidejűnek lesz tekinthető.

Ezen a modern eszközökben egy sor probléma még nincs megoldva, továbbá a pontosabb típusokból még egyetlenegy sem üzemel elég hosszú ideje ahhoz, hogy hosszú távú megbízhatóságukról pontos képet tudjunk alkotni. Így a nagy precizitású, dupla monokromátoros Brewer-spektrofotométer „egyeduralkodását” várhatóan még sokáig nem veszélyeztetik.

## Irodalom

- Németh, P., Tóth, Z., Nagy, Z., *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 32 (1996) 177–181.
- Giavis, G. M., Kambezidis, H. D., Sifakis, N., Tóth, Z., Adamopoulos, A. D., Zevgolis, D., *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67 (2005) 1524–1532.
- Tóth, Z., *Proceedings of the 4th International Conference on Solar Radiation & Daylighting SOLARIS 2008* (Hong Kong) (2008) 27–35.
- McKinlay, A. F., Diffey, B. L.: *CIE J.* 6 (1987) 17–22.
- COST-713, Action: *UV Index for the Public*. European Communities, Brussels, 27 (2000).
- 501 UV-Biometer Owner's Manual*. Solar Light Co. Inc. (2006)
- COST-726 Working Group 4 and WMO SAG UV: *A Practical Guide to Operating Broadband Instruments Measuring Erythemally Weighted Irradiance*. (2009)