

A felszínközeli ózon háttér-koncentrációjának trendje Magyarországon

Debreczeni Viktória

V. éves meteorológus szakos hallgató

Témavezetők:

dr. Haszpra László

címzetes egyetemi docens

dr. Mészáros Róbert

tudományos munkatárs

Eötvös Loránd Tudományegyetem,

Meteorológiai Tanszék

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.



Budapest, 2006.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	3
2. A troposzférikus ózon	6
2.1. A troposzférikus ózon képződése	6
2.2. A troposzférikus ózon-koncentráció alakulása a világon	9
2.3. A troposzférikus ózon-koncentráció meghatározása a kezdetektől napjainkig	10
3. Nemzetközi intézkedések	13
4. A felszínközeli ózon-koncentráció trendje Magyarországon	16
4.1. Magyarországi ózommérő hálózat	16
4.2. Statisztikai vizsgálatok	17
4.3. Határérték-vizsgálatok	25
4.4. Az ózon-koncentráció alakulása az időjárási helyzet függvényében	27
4.5. Az ózon-koncentráció szélirány függése	38
4.6. Trajektória analízis	42
5. Összefoglalás	47
6. Irodalomjegyzék	49
7. Mellékletek	53

A felszínközeli ózon háttér-koncentrációjának trendje Magyarországon

Bevezetés

A Föld légkörének körülbelül 21 térfogatszázaléka oxigén. Döntő része kétatomos molekula (O_2) formájában van jelen. Kisebb mennyiségben megtalálható egy sokkal reaktívabb, háromatomos változata is, az *ózon* (O_3), amely megvédi a felszínt és a bioszférát a Nap ultraibolya (UV) sugárzásától, üvegházhatása kihat az éghajlat alakítására, reaktivitása révén meghatározó szerepe van számos légkörkémiaili folyamatban.

Az ózon magasabb koncentrációban roncsolja a szerves anyagokat, az élővilágot, illetve az épített környezetet. Az ózon vízben csak mérsékelten oldódik, ezért belélegzéskor mélyen lekerülhet a tüdőbe, és a tüdőkapacitás csökkenését okozhatja, illetve gyengítheti a baktérium- és vírusfertőzésekkel szembeni ellenálló-képességet. Különösen veszélyesek – egészségkárosítók, rákkeltők – az ózonnal párhuzamosan képződő anyagok (pl. PAN (peroxiacetil-nitrát), aldehidek). Kísérletileg kimutatták, hogy 80 ppb (parts per billion: milliárdod térfogatrész)¹ ózon-koncentrációnak már káros hatásai lehetnek az emberi szervezetre. Az ózon a növényeket is károsítja, oxidáló hatása révén pusztítja azok leveleit, virágait. Gátolja a fotoszintézist és a gyökérlégzést, ami a növény pusztulásához vezethet. Már 60 ppb ózon a felére csökkentheti a fotoszintézis mértékét egyes növényeknél (<http://www.tiszta.levego.hu/>).

A troposzférikus ózon másodlagos szennyezőanyag, azaz nem közvetlenül kerül a légkörbe, hanem a különböző légköri nyomanyagok fotokémiai reakciói során keletkezik. A képződésben résztvevő nyomanyagok a *szén-monoxid* (CO), a *nitrogén-oxidok* (NO_x) és a különféle *illékony szerves anyagok* (VOC). (Kisebb mennyiségben elektromos kisülések hatására, a levegő oxigénjéből is létrejöhet ózon, pl. villámláskor.) Az ózon-koncentráció értékét a fotokémiai folyamatok mellett az ózonképződésben résztvevő anyagok mennyisége, a transzport folyamatok és az ülepedés együttesen határozzák meg. Az emberi tevékenység – közlekedés, biomassza égetés stb. – szennyezőanyag kibocsátása révén döntő tényező a magas ózonszint kialakulásában (Haszpra, 1993; Ferenczi és Haszpra, 1998).

Az ózonképződésben résztvevő anyagok kibocsátásának növekedésével az egész világon emelkedett az ózon-koncentráció, és ezáltal nőttek a károk is. A probléma az, hogy

¹ ppb= 10^{-9} mol/mol

mind az ózonképződésben résztvevő anyagok, mind maga az ózon a forrás területéről elszállítódnak és országhatárokat átlépve más területek levegőjét szennyezik, illetve növelik az ózonképződést. Ezért a helyi koncentráció csökkentését csak nemzetközi egyezményekkel lehet elérni. Mivel az ózon másodlagos szennyezőanyag, azaz kizárólag kémiai úton keletkezik, ezért csak az ózonképző anyagok kibocsátásán keresztül szabályozható a képződése, koncentrációja. Így az ózonképző *prekurzorokra* vagy előanyagokra (melyekből az ózon keletkezik) kellett nemzetközi korlátozásokat hozni. Európában a nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátását már 1988-ben szabályozták, elsősorban a környezet savasodásának mérséklése érdekében. 1991-ben az illékony szerves anyagok (VOC) kibocsátásának csökkentése érdekében írtak alá nemzetközi megállapodást.

A nemzetközi intézkedések ellenére az ózon-koncentrációban általános csökkenés nem tapasztalható, illetve a megfigyelt trendek ellentmondásosak. Világszerte számos országban foglalkoznak a koncentráció-változás alakulásával, valamint a követendő stratégia kidolgozásával.

A magyarországi ózon-koncentráció mérések elemzése (*Bozó and Weidinger, 1995; Ferenczi és Haszpra, 1998*) eddig csak 1997-ig történt meg. Ezen vizsgálatok során az derült ki, hogy a magyarországi troposzférikus ózon koncentrációja igen magas értékeket ér el. Ezek főleg a nyári hónapokban kiugróak (átlagosan 55 ppb), télen valamivel alacsonyabbak (átlagosan 25 ppb). Összességében azonban folyamatos koncentrációbeli emelkedés tapasztalható. A legfrissebb magyarországi mérések részletesebb értékelése eddig még nem történt meg.

Munkám célja az, hogy a felszínközeli ózon háttér-koncentráció hazai menetének utóbbi években történő változását felmérjem és elemezzem. Dolgozatomban a rendelkezésemre álló K-pusztai ózonmérő (EMEP) állomás 16 éves adatsorát FORTRAN nyelven írt program segítségével dolgoztam fel, és a kapott értékeket különböző statisztikai vizsgálatoknak vettem alá. Elsősorban trendvizsgálatokat végeztem, majd a Magyarországon, illetve az Európai Unióban hatályban lévő egészségügyi és ökológiai határértékekkel vettem össze az adatokat. Az eddigi eredmények azt mutatják, hogy jelentős ózon-koncentrációbeli változás nem tapasztalható, a határérték túllépések igen gyakoriak a mérőállomáson. A Péczy-féle makroszinoptikus kategóriák segítségével megvizsgáltam, hogy melyek azok a jellemző időjárási helyzetek, amelyek magas ózon-koncentrációt idézhetnek elő K-pusztán. A kiértékelések alapján magas ózon-koncentráció, illetve határérték-túllépések azon anticiklonális időjárási helyzetekben fordulnak elő, amikor egy

magas nyomású képződmény a Kárpát-medence felett helyezkedik el, illetve keletről vagy nyugatról nyomul be. Végül elemeztem az ózon-koncentráció és a szélirány korrelációját, valamint a HYSPLIT_4 modell segítségével végzett trajektória vizsgálatok eredményeit.

A kutatások eredményeképp megállapítható, hogy a K-pusztai állomáson az utóbbi években az ózon-koncentráció trendjében a korábbi növekedés mértéke lelassult, sőt a 2004. és 2005. években tapasztalt alacsony koncentráció értékek miatt gyenge csökkenő tendencia mutatható ki. Ez utóbbi két év alacsony értékeinek elemzése további vizsgálatokat igényel, de feltételezhetően szerepet játszik benne a felhőzet növekedésével magyarázhatóan a fotokémiai reakciók intenzitásának csökkenése. A trajektória vizsgálatok alapján elmondhatjuk, hogy a magas ózon-koncentráció értékekért nem csak a budapesti szennyezőanyag csóva a felelős, hanem más nagyobb városok, ipari területek, esetleg forgalmasabb közlekedési útvonalak kibocsátása is nagymértékben hozzájárul.

Az új eredmények további ózon-koncentrációval kapcsolatos elemzések alapjául szolgálhatnak, illetve mezőgazdasági szempontból egyfajta tájékoztatást adhatnak a jelenlegi állapotokról, mivel a magas ózon-koncentráció komoly károkat okoz a kultúrnövényekben, illetve az erdőségekben.

A további kutatási tervek között szerepel, hogy a többi ózommérő állomást is bevonjunk vizsgálatainkba.

A dolgozat **2. fejezetében** bemutatom a troposzférikus ózon képződését és légköri szerepét, továbbá a koncentráció alakulását. A **3. fejezetben** a veszélyesen magas ózon-koncentráció miatt hozott különböző nemzetközi intézkedéseket mutatom be, majd a **4. fejezetben** a K-pusztai adatsor feldolgozása történik meg. Itt elemzem a legújabb eredményeket (**4.2. és 4.3. fejezet**), miszerint az elmúlt két évben csökkenés tapasztalható az ózon-koncentráció alakulásában, de ennek ellenére a határérték-túllépések még mindig igen magasak. A **4.4. fejezetben** a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek és az ózon-koncentráció kapcsolatát vizsgálom meg. Majd megnézem a szélirány és az ózon-koncentráció összefüggését is (**4.5. fejezet**). Az utolsó fejezetben (**4.6. fejezet**) trajektória vizsgálatokat végzek a magas koncentráció értékek értelmezése érdekében.

2. A troposzférikus ózon

2. 1. A troposzférikus ózon képződése

A légköri ózon legnagyobb része a közép sztratoszférában található – erre Chapman 1930-ban adott magyarázatot (Mészáros, 1997) – és innen keveredik le az alsó légrétegbe egy kis hányada. A sztratoszféra-troposzféra légcseréje legaktívabb területe a troposzféra azon része, ahol ciklontevékenység megy végbe, pl. (légköri) teknők, jet streamek közelében és ún. tropopauza törések. Ez az átkeveredés késő télen és tavasszal a legerőteljesebb (Danielsen, 1968; Danielsen és Mohnen, 1977; Mahlman és Moxim, 1978).

Az 1950-es években kiderült, hogy ózon – elsősorban az antropogén légszennyezésnek köszönhetően – a felszínközeli is képződik. A troposzférikus ózon koncentrációjának alakulása nem csak a sztratoszférikus ózon lekeveredésétől, hanem az elsődleges ózonképző anyagok koncentrációjától is függ.

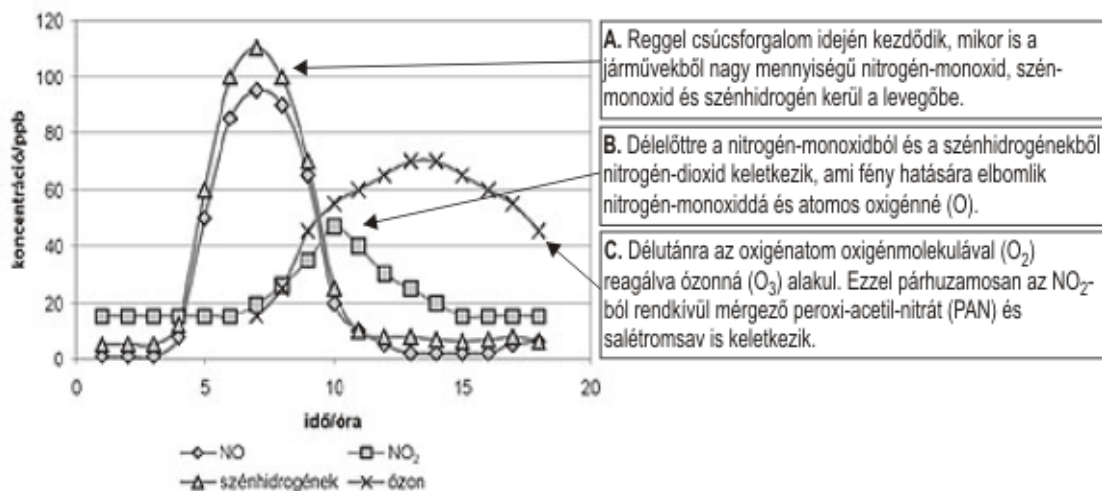
A felszínközeli ózon gyarapodásához alapvetően hozzájárul, hogy – az emberi tevékenység hatására – folyamatosan növekszik azon szennyezőanyagok kibocsátása, melyek részt vesznek az ózon képződésében. Az utóbbi évtizedekben a talajközeli ózonkoncentrációja, elsősorban a nyári félévben a XX. század eleji értékek kétszeresére növekedett. Emiatt részletesebb vizsgálatokat kezdtek folytatni a növekedést előidéző folyamatok megismerésére. Mivel nagy gépjárműforgalom esetén mértek magas ózonkoncentrációt, a gépkocsik által kibocsátott gázok átalakulásait kezdték nyomon követni. Az ózon keletkezésének magyarázata céljából Arie Haagen-Smit 1952-ben a következő kísérletet végezte el (Mészáros, 1997): Megfelelő kamrába nitrogén-dioxidot és reaktív szerves vegyületeket vezetett. Ha a kamrát (nap)fénnyel világította meg, akkor a kamrában ózon keletkezett. Ezek után feltételezte, hogy az atomos oxigén a nitrogén-dioxid fotokémiai bomlásakor keletkezik. A probléma már csak az volt, hogy a kipufogógázokból nem nitrogén-dioxid (NO₂), hanem döntő részben nitrogén-monoxid (NO) kerül a levegőbe. A további kutatások ezért a nitrogén-monoxid oxidációjának megmagyarázására irányultak (Warneck, 1988; Mészáros, 1997; Jacobson, 2002). Azonban a kipufogógázokból nem csak az NO₂ és NO, hanem CO és VOC is keletkezik, amelyek szintén ózon prekursorok.

Nitrogén-monoxid keletkezhet magas hőmérsékleten a levegő oxigénjéből és nitrogénjéből, illetve nitrogén tartalmú vegyületek elégetésekor. Ezek a folyamatok belső égésű motorokban játszódnak le, de jelentős NO-forrás az ipar és a biomassza-égetés is. A szén-monoxid széntartalmú anyagok (pl.: fosszilis tüzelőanyagok, szerves anyagok) égése alkalmával keletkezik. A szénhidrogének elsődleges forrásai ugyancsak a gépkocsik

belsőégésű motorjai, de ide tartozik még a petrokémia, oldószeripar és az üzemanyagok, oldószerek párolgása is.

Az erőteljes besugárzás és a napokon keresztül halmozódó, magas koncentrációt elérő légszennyezők hatására délutánra *fotokémiai szmog* alakulhat ki, amelyhez több folyamat vezethet. A folyamat reggel, csúcsgalamban idején kezdődik, mikor a járművekből nagy mennyiségű nitrogén-monoxid, szén-monoxid és reaktív szénhidrogén(ek) kerül(nek) a levegőbe. A sekély kora reggeli határrétegben ezek a gázok felhalmozódnak. A napsugárzás intenzívebbé válásával megindul az OH gyökök termelődése, amelyek a szén-monoxiddal és a reaktív szénhidrogénekkal reagálva peroxil-gyököket képeznek. A keletkező szerves és szervetlen peroxil-gyökök nitrogén-dioxiddá oxidálják a nitrogén-monoxidot. Az így képződő, illetve a közvetlenül a légkörbe kerülő nitrogén-dioxid fény hatására nitrogén-monoxidra és atomos oxigénné bomlik.

Az oxigénatom oxigénmolekulával (O_2) reagálva ózonná (O_3) alakul. Az ózonkoncentráció legnagyobb értéke dél után, a fotokémiai aktivitás maximuma után lép fel, amikor a csökkenő ózontermelődés és a fotokémiai folyamatoktól független ózonfogyás



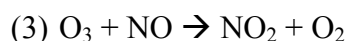
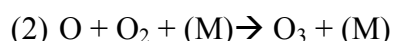
2.1.1. ábra: A légszennyező anyagok koncentrációjának változása fotokémiai szmog esetén

egyensúlyba kerül. Párhuzamosan az NO_2 -ből rendkívül mérgező peroxi-acetil-nitrát (PAN) és salétromsavgőz (HNO_3) is keletkezik.

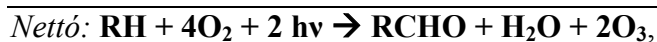
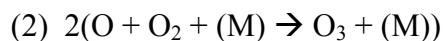
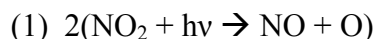
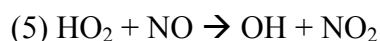
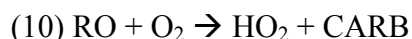
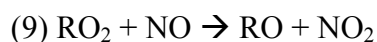
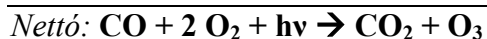
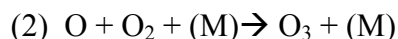
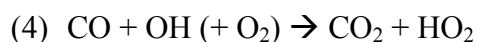
Az egésznapos fotokémiai szmog általában ritka. Jellemzőbb, hogy a több napon át felhalmozódott légszennyező anyagok erős napfény hatására reakciókba lépnek egymással. Ezzel a halmozódással párhuzamosan a másodlagos szennyezőanyagok (pl. ózon) is gyűlnek, és, ha éjszakára vissza is esik a koncentrációjuk, minden nap egy kicsit több lesz belőlük. A

magas koncentrációk és reakciók hatására délutáni órákban aztán szmogot okozhatnak, azaz nagyon erős, az emberi szervezetre káros légszennyezettségi szintet (2.1.1 ábra).

Az ózonnépződéshez vezető folyamat meghatározó része a nitrogén-monoxid (NO) nitrogén-dioxiddá (NO₂) alakulása. Ezen molekulák koncentrációjának arányától függ, hogy a levegőben mennyi ózon van jelen. Ha az NO molekulák száma jelentős, akkor csökken az ózon mennyisége (Mészáros, 1991).



Ebben a reakció-ciklusban még *nincs nettó ózontermelés*, ugyanis ahhoz szükség van CO, metán és/vagy egyéb reaktív szerves anyagok jelenlétére:



ahol R egy alkil csoportot jelöl, CARB egy aldehid (RCHO) vagy egy keton (RCRO) molekula lehet és M olyan atom vagy molekula (kémiailag indifferent anyag), amely közreműködik a reakcióban.

Mindkettő reakcióláncban *van nettó ózontermelés*. A reakciókban kulcsszerepet játszanak a szerves RO₂ gyökök, illetve a szerves HO₂ peroxi gyökök. Az NO + HO₂, illetve az NO +

RO₂ reakciók elvonják a nitrogén-monoxidot az NO + O₃ reakció elől. Mivel így kevesebb O₃ fogy a kémiai reakciókban, magasabb ózon-koncentráció alakul ki.

Fontos tényező a troposzférikus ózon kémiai átalakulásai során az ultraibolya sugárzás. Mivel az elmúlt évtizedek alatt a sztratoszférában található ózon mennyiség csökkent, a Földet érő közeli-UV besugárzás megnövekedett. Ennek köszönhető a felszínközeli ózonképződés, illetve -lebomlás felgyorsulása főleg azokon a területeken, ahol NO_x többlet alakul ki.

Brühl and Crutzen (1988) megfelelő matematikai modell segítségével kiszámította az UV sugárzás elnyelődését a légkör különböző rétegeiben. Azt az eredményt kapták, hogy a troposzférikus ózon növekedése miatt, különösen nyáron, csökken a talajon mérhető UV-sugárzás, még akkor is, ha a teljes ózontartalom csökken. Ebben az is szerepet játszik, hogy a troposzférában a diffúz UV sugárzást a levegőmolekulák, a felhőcseppek és az aeroszol részecskék igen hatékonyan szórják. Minden bizonnyal az emberi tevékenység a légköri ózonra nem azért veszélyes, mert növeli az UV sugárzás intenzitását (az természetesen nem vonatkozik a Déli-, esetleg az Északi-sark fölött kialakuló ózonlyuk időszakára), hanem azért, mert a sztratoszférában csökkenti, a troposzférában emeli a levegő átlagos hőmérsékletét. Ez viszont bolygónk éghajlatára gyakorolhat hatást (*Mészáros, 1997*).

Ezen kívül globális szinten hatással van az ózonképződésre a trópusi erdők égése, égetése, a felszabaduló prekursor anyagok miatt. Kimutatható, hogy az erdők égéséből származó előanyagokból képződő ózon globálisan nagyjából megegyezik a sztratoszférából származó mennyiséggel (*Guicherit and Roemer, 2000*).

2. 2. A troposzférikus ózonkoncentráció alakulása a világon

Az ózon-koncentráció tér- és időbeli eloszlása változatos. Jellemző évszakos menetek figyelhetők meg a szélességi és hosszúsági körök függvényében (*Logan, 1985, 1999; Monks, 2000*). A legmagasabb értékek az északi hemiszférán tavasszal fordulnak elő. Itt átlagosan a téli hónapokban 15 ppb, nyár alkalmával 45 ppb az ózon-koncentráció. Tavasztól kora nyárig az ózon-koncentrációban maximum lép fel, feltehetően az ózonképző előanyagok téli felhalmozódása miatt. Néhol azonban a nyári maximumok erőteljesebbek, mint a tavasziak, mivel előfordulhat, hogy a prekursorok emissziója nagyobb és jobban befolyásolja a helyi fotokémiai ózonképződést (*Hough and Derwent, 1990*). Európában északnyugatról délkeletre, míg az Amerikai Egyesült Államokban (USA) a koncentráció-

növekedés nyugatról keletre figyelhető meg. A déli félgömbön a tavaszi maximumok (szeptembertől novemberig tartó időszak) a közepes szélességek fölött jelentkeznek. A két félgömb ózommennyiségbeli eloszlása tehát nem fedi egymást. Az egyenlítő környékén az értékek alacsonyak, annak ellenére, hogy a fotokémiai folyamatok itt a leghatékonyabbak. Ennek oka az, hogy az ózon eloszlását nem csak a kémiai reakciók sebessége határozza meg, hanem a sztratoszféra légáramlási rendszere és a sztratoszféra-troposzféra közti légcseré is.

Egy tanulmány (*Monks, 2000*) arra hívta fel a figyelmet, hogy a tavaszi csúcspont-jelenség kimondottan az északi féltekére jellemző, illetve a tavaszi felszínközeli ózonmaximum értékek az elmúlt évszázadban megnövekedtek. Jelenleg még nem ismeretes az a mechanizmus, ami a tavaszi maximumhoz vezet. Korábbi vizsgálatokból azonban tudjuk, hogy a tavaszi csúcshoz hozzájárul a sztratoszféra-troposzféra légcseréjekor történő ózon-leáramlás, ugyanis a sztratoszférában az ózon-koncentráció maximum tavasszal fordul elő és a diszkontinuitási felületek mentén ekkor több sztratoszférikus ózon lekeveredés történik.

Észak-Amerika sarkvidéke felett – az US NSF TOPSE által végzett – legújabb mérések eredményei (*Dibb et al., 2003*) azt mutatják, hogy troposzférában felgyülemlő ózon elsődleges forrása a sztratoszféra-troposzféra légcseré során lejutó mennyiség. A tavaszi maximumokat azonban mégsem ez okozza, hanem a téli időszak NO_x és szénhidrogén felhalmozódása, amely az erősebb besugárzás miatt intenzívebb fotokémiai reakcióknak a következménye.

Az eddigi eredmények azt mutatják, hogy az 1970-es évektől mostanáig az ózonszint az északi félteke közepes szélességein folyamatosan emelkedik, és ez az emelkedés körülbelül 0,5–2%/év-es tendenciát mutatott. A növekedés mértéke nem egyenletes, ugyanis az 1970-es és 1980-as évek erősen emelkedő trendje után jóval mérsékeltebb növekedést észleltek egészen a 1990-es évekig (*Oltmans et al., 1998; Logan, 1994*). A növekedés alacsonyabb mértéke, vagy néhány esetben akár hiánya is azt mutatja, hogy az 1990-es évektől csökkenés következett be az ózon-perkurzorok kibocsátásában Európában, illetve Észak-Amerikában.

A déli féltekére vonatkozó ózon adatok igen ritkák, ezért az ózon-koncentráció eloszlása kevésbé ismert, mint az északi félgömbön (*Vingarzan, 2004*).

2. 3. A troposzférikus ózon-koncentráció meghatározása a kezdetektől napjainkig

Az ózon felfedezése *Schönbein* nevéhez fűződik (*Warneck, 1988; Wayne, 1994*). A német professzor 1840-ben észrevette, hogy elektromos kisülések alkalmával jellegzetes szagú anyag keletkezik, amelyet ózonnak nevezett el. *Schönbein* az ózon kimutatására egyszerű kémiai eljárást is kidolgozott. Egy káliumjodid-keményítős reagenspapírt vízzel

benedvesített és egy közvetlen napfénytől védett, de a szabad légáramlásnak kitett helyre függesztett. Az expozíció során a levegőben lévő ózon a káliumot oxidálta, s az így szabaddá váló jód a megadott észlelési idő eltelte után a reagenspapír desztillált vízbe merítésekor a keményítővel reagált. A megjelenő kék színt egy színskálához hasonlítva, megkapta az adott minta 0 (fehér) és 10 (sötét ibolyakék) közötti „Schönbein-számát”. A reagenspapír nem csak ózonra reagált, ezért ez a módszer nem biztosított kellő pontosságot az ózommennyiség meghatározására. Ennek ellenére azonban megállapította, hogy a légkörben természetes körülmények között is megtalálható az ózon. A Schönbein-módszert egészen az 1850-es évek végéig alkalmazták. 1858-tól Franciaországban egy pontosabb, 24 órás átlagot adó arzenitos mérési módszert kezdtek használni. Igazán torzítatlan ózonadatok a Lewy és Allaire által 1875-től végzett Montsouris-i arzenites mérésekből származnak (*Divéky, 2003*). Ezen módszereknek köszönhetően vannak adataink, illetve sejtésünk az ózon-koncentráció múltbeli alakulásáról: Európában 1870–1910 között az átlagos ózon-koncentráció *20 ppb* körül mozgott.

Az ózonomolekulák légköri jelentőségére elsőnek *Hartley* hívta föl a figyelmet, amikor megállapította, hogy az ózon elnyeli az UV sugárzást. Az 1920-as évek közepén *Dobson* megmérte a légkör teljes ózontartamát. Méréseivel rávilágított, hogy az ózon zöme nem a felszín közelében található. A harmincas években spektrofotométerekkel végzett vizsgálatok kimutatták, hogy a maximális ózon-koncentráció a 20–25 km-es magasság környezetében (*Götz et al., 1934*), a sztratoszférában található. Ennek elméleti magyarázatát *Chapman* adta meg az 1930-as években. Sokáig úgy gondolták, hogy a troposzférában jelen lévő ózon teljes egészében a sztratoszférából származik. Ugyanis *Chapman* reakciómechanizmusa szerint az ózon képződéséhez $\lambda < 240$ nm hullámhosszúságú napsugárzás szükséges. Mivel ez éppen a sztratoszférikus ózon miatt a troposzférába már nem jut le, úgy vélték, a troposzférában nincs ózon keletkezés, így az itt lévő ózon a sztratoszférából származik.

Az 1940-es években, Los Angelesben új környezeti problémával szembesült az emberiség. Ebben a kaliforniai városban a légszennyezettség egy addig ismeretlen, új formája alakult ki. Azt tapasztalták, hogy a jelenség a londoni szmogtól eltérően nem télen, hanem nyáron, napsütéses időben, nagy gépkocsiforgalom esetén erőteljes. Jellemzője, hogy a levegő sárgásbarna színűvé válik, és a látástávolság csökken. A mérések kimutatták, hogy mindezek okozója az NO_2 felhalmozódás és az ebből keletkező nitrát. Ezen anyagokból (ún. prekursorokból) fotokémiai reakció során keletkező ózon pedig egészségügyi panaszokat és növénykárokat okoz. Ezt az erőteljes besugárzás hatására kialakuló jelenséget *fotokémiai szmog*nak nevezték el. Az ún. Los Angeles-i típusú szmog hatásainak vizsgálata során váltak

világossá a felszínközeli ózon környezetkárosító hatásai. Az ózon izgatja az emberek szemét és nyálkahártyáját, károsítja a növényi sejteket. Arie Haagen-Smit, Kaliforniában élő holland biokémikus 1948-ban mutatta ki (*Jacobson, 2002*), hogy a laboratóriumban magas ózon-koncentrációnak kitett növények pontosan olyan károkat szenvednek, mint a szabad téri vegetáció magas légszennyezettség esetén. Azt is kimutatta, hogy a magas ózon-koncentráció irritálja a szemet, légzési zavarokat okoz és roncsolja a különböző anyagokat (például gumicsöveket). Ekkor azonban még úgy vélték, hogy az ózonképződés lokális jelenség. Ez a nézet a hetvenes évek elején változott meg, amikor *Crutzen (1974)* kimutatta, hogy a troposzférában kémiai úton globális léptékben is jelentős mennyiségű ózon keletkezik, illetve bomlik el.

1970-től (nedves kémiai úton folyamatosan regisztráló) ózonmérőket használtak, amelyek hasonlóan az előzőkhöz a káliumjodid-pufferoldat és a légköri oxidánsok reakciója alapján működtek. 1976-tól kemilumineszcenciás, majd 1978-tól UV-fotométeres mérési módszereket alkalmaztak. Az egyre pontosabb mérőmódszerek sokkal megbízhatóbb adatsort nyújtottak az 1970-es évektől.

Európában az 1930-as és 1950-es évek között az átlagos ózonkoncentráció érték kissé megnövekedett, *20–25 ppb-re*. Az 1950-es években elérte az átlagos *30 ppb-s* értéket. Az 1970-es években az ózon-koncentráció még mindig folyamatosan emelkedett és manapság a *40–50 ppb-s* éves átlagértékek sem szokatlanok annak ellenére, hogy 1990-től a növekedés lelassult. Télen az ózon mennyisége keletről nyugat felé, míg nyáron északnyugat-délkeleti irányban növekszik. A nyári ózon-koncentráció legmagasabb értékei Közép-Európa délkeleti területére tehetőek (*Scheel et al., 1997*).

Míg az 1990-es évek elején 15–20 ppb körüli volt az átlagos ózonmennyiség, addig a XX. század végén, a XXI. század elején Európában 50 ppb körül mozog; azaz több mint a duplájára növekedett az elmúlt száz évben. Ez 1,5–1,6%/éves átlagos növekedést jelent, és statisztikailag szignifikánsnak tekinthető (*Guicherit and Roemer, 2000*).

Az 1990 óta mért változások kisebbek és sokkal nehezebben detektálhatóak, mint az elmúlt évszázadban mértek. Európában az elmúlt 20 évben az ózon-koncentráció változásainak vizsgálati során igen eltérő és ellentmondásos tapasztalatok születtek.

3. Nemzetközi intézkedések az ózonerhelés csökkentésére

Az ózon előanyagai forrásuk területén és onnan elszállítódva, országhatárokat átlépve légszennyeződést okozhatnak. Önmagában a kibocsátás csökkentéséről dönthetne minden ország maga. Azonban az előanyagok és az ózon nagy távolságú transzportja miatt az ózon-koncentráció mérséklését csak nemzetközi összefogással és intézkedésekkel lehet elérni.

Az elmúlt években a környezetvédelem egyre nagyobb hangsúlyt kap az Európai Unióban. Az intenzív gazdasági-ipari fejlődés, a növekvő energiafelhasználás az 1970-es évekre egyre nagyobb mértékű környezeti szennyezést eredményezett Európa egész területén. Ezért az 1972-es *párizsi* csúcson közösségi szintre emelték a környezetvédelmi politikát.

Ezt követően több akcióprogramot dolgoztak ki a környezetvédelem érdekében (1973-ban, 1977-ben és 1983-ban). A legutóbbi hozott nagy változást, mivel a problémák kezelése helyett a megelőzésre helyezte a hangsúlyt. Az Unió környezetpolitikájának célja az erőforrások pazarló fogyasztásának csökkentése, illetve a termelékenység, az energiahatékonyság növelése.

A nagy távolságra jutó, országhatárokon átterjedő légszennyező anyagok kibocsátásának csökkentése csak nemzetközi összefogással lehet eredményes. Ezt fölismerve hozták létre a **Genfi Egyezményt** (Egyezmény a nagy távolságra jutó, országhatárokon átterjedő levegőszennyezésről – Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) 1979-ben, mely utóbb csatolt jegyzőkönyvekben rögzített kötelezettségekkel igyekszik mérsékelni a káros kibocsátást az észak-atlanti régió (USA, Kanada, Európa) területén.

Az alapegyezményt az ENSZ Európai Gazdasági Bizottságának keretében készítették elő, 1979-ben *Genfben* fogadták el, és 1983-ban lépett hatályba. Az egyezményhez az Európai Gazdasági Bizottság tagországi mellett Kanada és az Egyesült Államok csatlakozott.

A keretjellelű egyezményhez a későbbiek során több jegyzőkönyv készült, amelyek egyrészt a megfigyelési és kutatási együttműködés feltételeit pontosították, másrészt konkrét kibocsátási korlátokat szabtak meg a kén-dioxid, a nitrogén-oxidok és az illékony szerves vegyületek, továbbá a nehézfémekre és a lassan lebomló szerves anyagok vonatkozásában a csatlakozó országok számára.

3.1. táblázat: *A légköri szennyezőanyagok kibocsátásának csökkentésére irányuló legfontosabb nemzetközi európai egyezmények*

<i>jegyzőkönyvek</i>	<i>elfogadás</i>	<i>helyszín</i>	<i>hatálybalépés</i>	<i>magyar csatlakozás</i>
1.	1979	Genf	1983	1980
2.	1984	Genf	1980	1985
3.	1985	Helsinki	1987	1986
4.	1988	Szófia	1991	1991
5.	1991	Genf	1995	1991
6.	1999	Göteborg	2004	1999

Az egyezmények címei:

1. Egyezmény a nagy távolságra jutó, országhatárokon áterjedő levegőszennyezésről.
2. Jegyzőkönyv a levegőszennyező anyagok nagy távolságra való eljutásának megfigyelésére és értékelésére kidolgozott európai együttműködési program hosszú távú finanszírozásáról.
3. Első jegyzőkönyv a kénkibocsátás vagy annak országhatárokon való átáramlásának legalább 30%-kal való csökkentéséről.
4. Jegyzőkönyv a nitrogén-oxidok kibocsátásának vagy azok országhatárokon való átáramlásának szabályozásáról.
5. Jegyzőkönyv az illékony szerves vegyületek kibocsátásának és azok országhatárokon való átáramlásának korlátozásáról.
6. Jegyzőkönyv a savasodás, az eutrofizáció és a talajközeli ózon csökkentéséről.

1984-re készült el a Genfi egyezmény első kiegészítő jegyzőkönyve, „A levegőszennyező anyagok nagy távolságra való eljutásának megfigyelésére és értékelésére kidolgozott európai együttműködési program hosszú távú finanszírozásáról”.

Nyilvánvalóvá vált, hogy a környezetszennyező anyagok kibocsátása és a káros hatások miatti felelősség és kötelezettség megfelelő meghatározásához a korábbiaknál sokkal részletesebb adatokra, azaz rendszeres mérésekre van szükség. Ezért hoztak létre „Levegőszennyező anyagok nagy távolságra való eljutásának megfigyelésére és értékelésére kidolgozott európai együttműködési program” (EMEP²) néven egy egységes mérőhálózatot. A jegyzőkönyv rendelkezései e program fejlesztésének és végrehajtásának elősegítésére

²EMEP: Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe

irányulnak. A felszínközeli ózon folyamatos mérése 1990 óta szerepel az EMEP mérési programjában (<http://www.emep.int>).

Az ózontépződésben résztvevő anyagok közül először a nitrogén-oxidok kibocsátásának korlátozásáról született nemzetközi egyezmény. Ennek elsődleges célja nem az ózon-koncentráció mérséklése, hanem a nitrogén-oxidokból képződő salétromsavgőz okozta károk (környezetsavasodás) csökkentése volt. Az egyezményt 1988-ban írták alá és 1991-ben lépett hatályba.

Az ózontépződésben résztvevő másik anyagcsoport, az illékony szénhidrogének kibocsátásának korlátozására 1991-ben született megállapodás.

Világossá vált, hogy bizonyos vegyületek többféle környezeti probléma kialakulásában is szerepet játszanak (pl. nitrogén-oxidok a savasodásban, az eurofizációban és az ózontépzésben), ugyanakkor bizonyos problémák mérséklése több anyag kibocsátásának összehangolt korlátozását igényli (pl. az ózon visszaszorításához a nitrogén-oxidok, illékony szerves anyagok kibocsátásának csökkentése szükséges). Ez a felismerés vezetett az 1999-es *göteborgi* egyezmény létrehozásához, amely a savasodás, az eutrofizáció, illetve a felszínközeli ózon csökkentéséről szövegezt, és egy átfogó rendeletet hozott az eddigi és a jövőbeli intézkedésekről.

Magyarországon az 1990-es évektől kezdve jelentős gazdasági változások mentek végbe. Az utóbbi évtizedben a környezetszennyezés nagymértékben csökkent. Hazánkban az ipari szennyezés területén számottevő javulás tapasztalható, mely elsősorban a klasszikus nehézipar eltűnésének és a struktúra-váltásnak köszönhető.

4. A felszínközeli ózon-koncentráció trendje Magyarországon

4.1. Magyarországi ózommérő hálózat

Az 1853-ban az Osztrák Magyar Monarchia területén hat állomáson kezdtek ózomméréssel foglalkozni (Krakkó, Kremsmünster, Senftenberg, Stanislau, Bécs és Szeged). Az állomások számát fokozatosan növelték, így a Monarchia területén 1854-ben 9, 1855-ben 17 és 1856-ban már 24 ózon-koncentrációt is mérő állomás működött. Az akkori Magyarországon Szeged mellett 1855-től Besztercebányán és Selmecebányán, 1856-tól Budán folytattak ózonnal kapcsolatos megfigyeléseket, azonban az 1880-as évek végétől egészen 1990-ig nem végeztek ózommérést (*Divéky, 2003; Ádám et al., 2006*).

Az Országos Meteorológiai Szolgálat légköri háttérszennyezettség megfigyelésével kapcsolatos tevékenysége a hatvanas évek elején indult és 1990-től az ország négy pontján végez folyamatos felszínközeli ózomméréseket. A négy mérőállomás földrajzi elhelyezkedését a 4.1.1. ábra mutatja.

A K-pusztai állomás Kecskeméttől (kb. 110 ezer lakos) mintegy 15 km-re északnyugatra található ($\varphi = 46^{\circ}58'E$, $\lambda = 19^{\circ}33'K$, $h = 125$ m), a Kiskunság egy erdős területtel határolt tisztásán. Távolabbi környezetében mezőgazdasági területek vannak. Az állomástól nyugati irányban kb. 10 km-re fut az M5-ös autópálya. A mérőállomást, közeli fekvése miatt elérheti Budapest (70 km, északnyugat) szennyezőanyag-csövája.

A hortobágyi mérőállomás a Hortobágy szigorúan védett területén helyezkedik el ($\varphi = 47^{\circ}29'E$, $\lambda = 20^{\circ}56'K$, $h = 91$ m). Ennek megfelelően környezetében említésre méltó antropogén légszennyező forrás nem található.

A farkasfai mérőállomás ($\varphi = 46^{\circ}54'E$, $\lambda = 16^{\circ}18'K$, $h = 312$ m) Magyarország nyugati országrészében található.

A negyedik mérőállomás (Nyírjes) a Mátra hegységben, Galyatető déli oldalán található ($\varphi = 47^{\circ}52'E$, $\lambda = 19^{\circ}57'K$, $h = 560$ m). Ez a mérőpont gyakran a felszíni határréteg felett van, így az itteni mérések nem annyira a felszínközeli, inkább a valamivel magasabban elhelyezkedő légréteg ózon-viszonyait reprezentálják.

Az OMSZ állomásokon mért ózon-koncentráció értékeket az adatokat ellenőrzése után archiválják, illetve továbbítják a felhasználók felé. Ezen kívül mindegyik állomáson mérik a legfontosabb meteorológiai állapotváltozók, a hőmérséklet, a szélirány, a szélesség és a légnedvesség értékeit (*Országos Meteorológiai Szolgálat, 1998*).

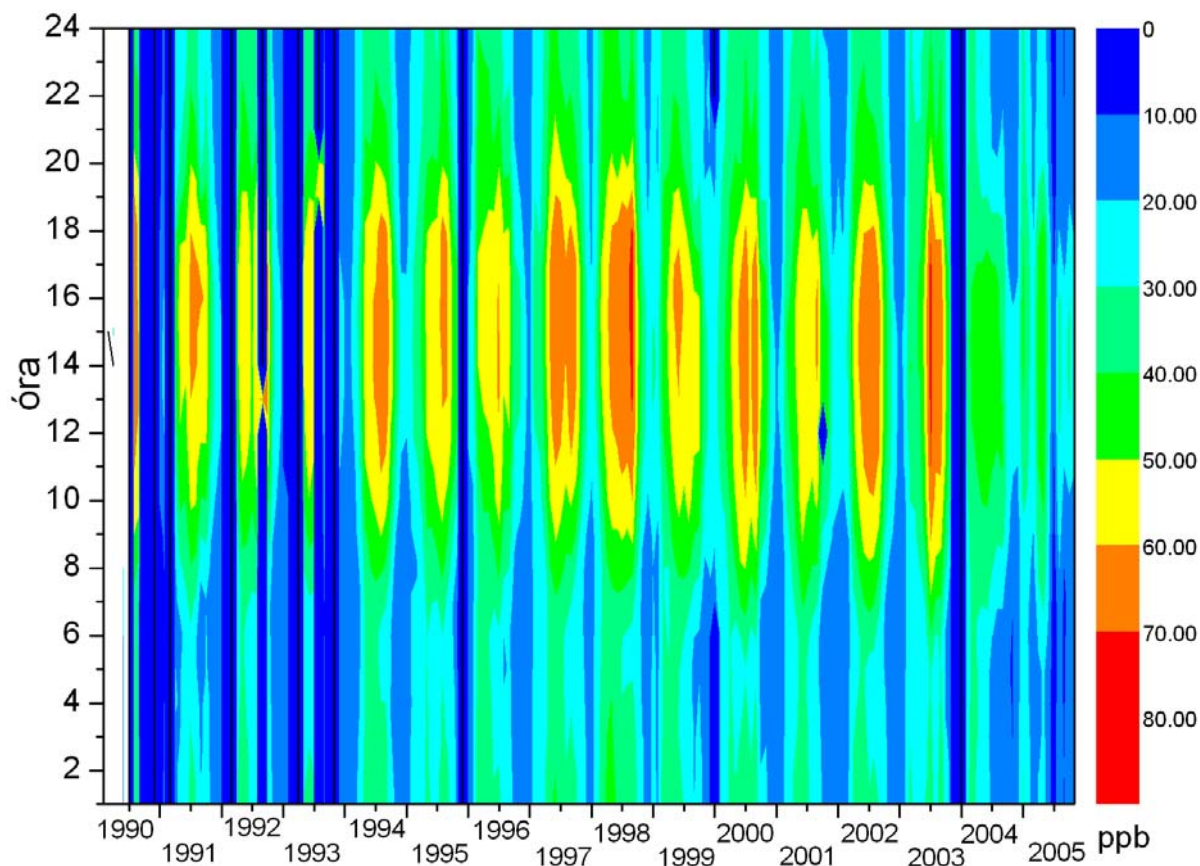


4.1.1. ábra: Az ózommérő állomások elhelyezkedése Magyarországon

A rendelkezésemre álló adatsor a K-pusztai EMEP/GAW állomás 1990. január 1. – 2005. december 31. közötti mérési sora, amely órás ózon-koncentráció értékeket tartalmaz. Azért csak ezt az egy állomás adatait dolgoztam fel, mert innen származik a leghosszabb adatsor, ami ráadásul a nemzetközi előírásoknak megfelelő minőségbiztosításon és minőségellenőrzésen esik át. Az adatsor utolsó hétéves időszakának koncentráció adatsorát statisztikailag még nem dolgozták föl. Az új eredmények további ózon-koncentrációval kapcsolatos elemzések alapjául szolgálhatnak, illetve mezőgazdasági szempontból egyfajta tájékoztatást adhatnak a jelenlegi állapotokról, trendekről.

4. 2. Statisztikai vizsgálatok

A 4.2.1. ábra az 1990–2005-ig tartó, 16 éves adatsor átlagos órás ózon-koncentráció eloszlását mutatja be. Jól kivehető, hogy a legmagasabb értékek (70 ppb feletti) elsősorban nyaranta a déli és késő délutáni órákban jelennek meg, mivel ekkor a legerősebb a besugárzás. A legalacsonyabbak (3–4 ppb) a hajnali órák időszakára, illetve a téli időszakra esnek. Az adathiány miatt 1990-től 1994-ig nem adható megfelelő/szignifikáns ózon-koncentráció eloszlás.

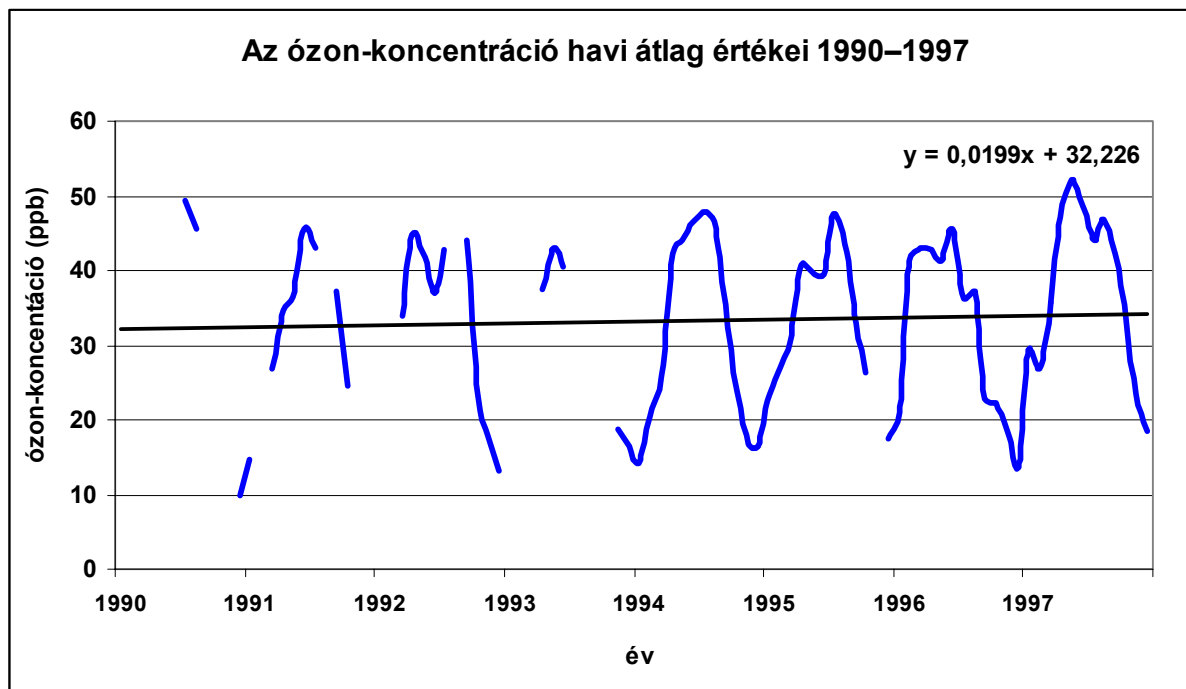


4.2.1. ábra: Az ózon-koncentráció havi és napi menetének alakulása 1990–2005 között

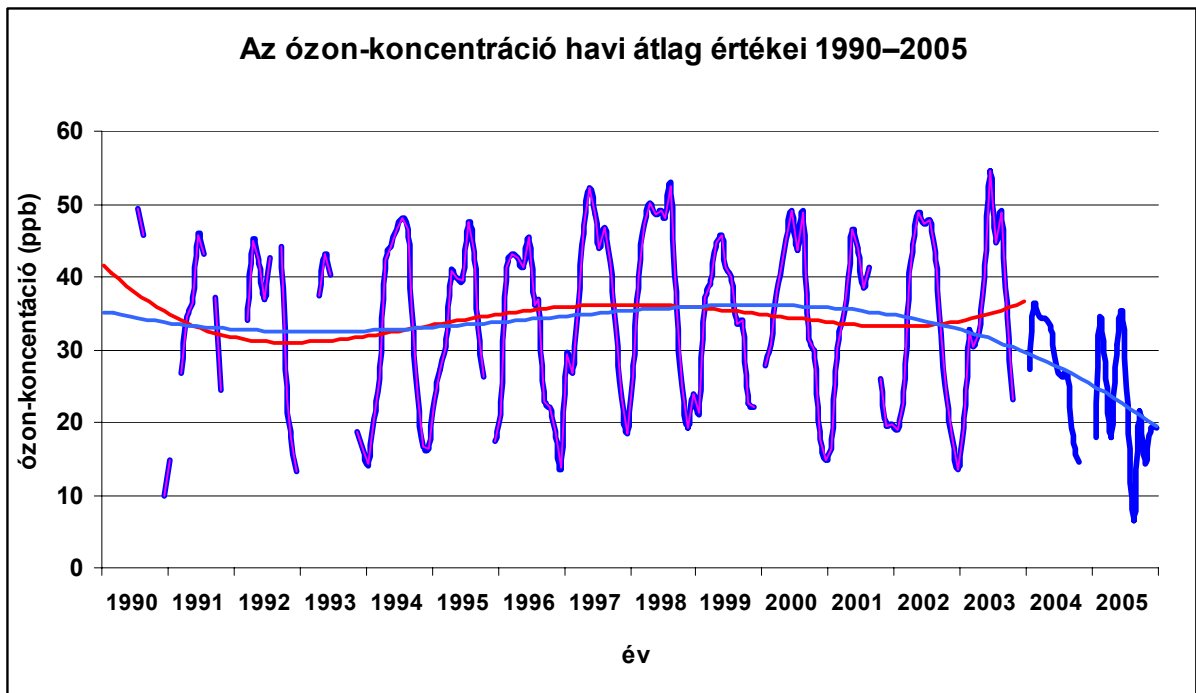
A hazai ózon-koncentráció menetek vizsgálatával már korábban is foglalkoztak (Ferenczi és Haszpra, 1998). E tanulmányban nyolcéves időszakot (1990–1997) dolgoztak fel és az adott periódusban az ózon-koncentráció folyamatos emelkedésére mutattak rá (4.2.2. ábra). A havi átlagok maximumai nyáron (kb. 45 ppb), míg a minimumok (kb. 15 ppb) télen figyelhetők meg. Az éves átlag kb. 33 ppb körül mozgott 1990-től 1997-ig.

A 4.2.3. ábra a K-pusztán észlelt ózon-koncentráció változását mutatja be 1990-től 2005-ig. Jól látható a nyári hónapokra jellemző még mindig magas havi átlag (kb. 45 ppb) és a téli hónapok alacsony koncentrációja (kb. 15 ppb). Az éves átlag 34 ppb körül mozgott ebben a 16 éves időszakban. Az ábráról leolvasható a trend is, amely nem mutat jelentős változást az említett időszak alatt. Ezt összevetve a 4.2.2-es ábrával, látható, hogy az 1997-ig tartó folyamatos emelkedés lelassult, ez mégsem jelent szignifikáns változást az ózon-koncentráció trendjében. Jól kivehető azonban egy erős csökkenés a 2004-es és 2005-ös évben. Az elemzések alapján ennek két oka is lehet. Egyrészt az említett évek borultabb időjárása, ami gátolhatta a fotokémiai reakciókat, befolyásolva ezzel az ózonzásóképződési folyamatokat. Másrészt a minőségbiztosítás ellenére nem zárhatjuk ki a mérési hibát sem. Ez

utóbbi esetben a két utolsó év alacsony koncentrációi nagymértékben torzíthatják a trendet. Emiatt az adatok újbóli ellenőrzése szükséges. Fontos annak tisztázása is, hogy a 2005. évben még az ózon-koncentráció jellemző éves menetét sem tapasztaltuk a K-pusztai mérések alapján (februárban pl. 34 ppb, míg augusztusban csak 6 ppb körül volt a havi átlagos ózon-koncentráció, holott a nyári értékek általában jóval magasabbak, mint a téliek). A bizonytalanságok miatt a 4.2.3. ábrán két trendvonalat is ábrázoltunk. Az egyik a teljes vizsgált időszak (1990–2005) változását mutatja, míg a másik csak a 2003-ig terjedő periódusét. Az ábráról jól látszik, hogy az 1990-es éves elején tapasztalt csökkenő tendenciát növekedés váltotta fel az évtized során. Ez a növekvő trend jelentkezik a korábbi vizsgálatoknál (Ferenczi és Haszpra, 1998). Az 1997-es és 1998-as évek magasabb értékei után újból csökkenő tendencia figyelhető meg. Innentől kezdve kétfelé válik a trendvonal. Ha a legutóbbi két év alacsony koncentrációit is figyelembe vesszük, akkor markáns csökkenés mutatkozik. Ha viszont csak 2003-ig vizsgáljuk a menetet, akkor a változások növekvő tendenciát mutatnak. A kutatások folytatásaként ennek a bizonytalanságnak a feloldása a legfontosabb feladat.



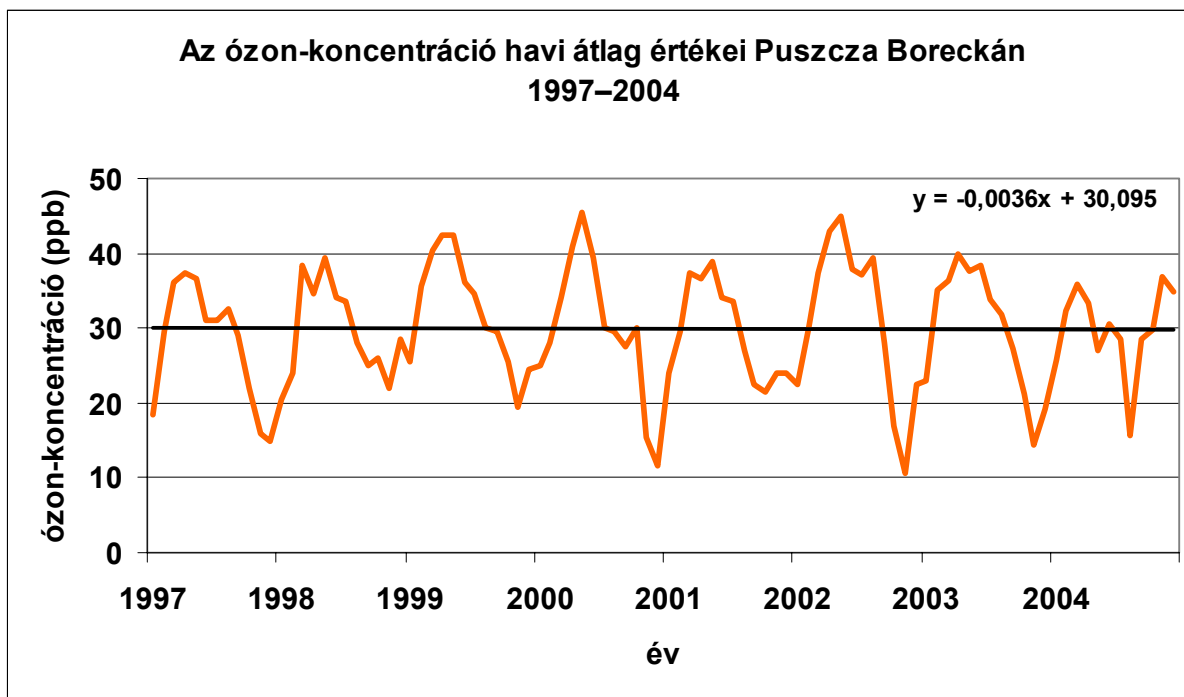
4.2.2. ábra: Az ózon-koncentráció trendje K-pusztán (1990–1997)



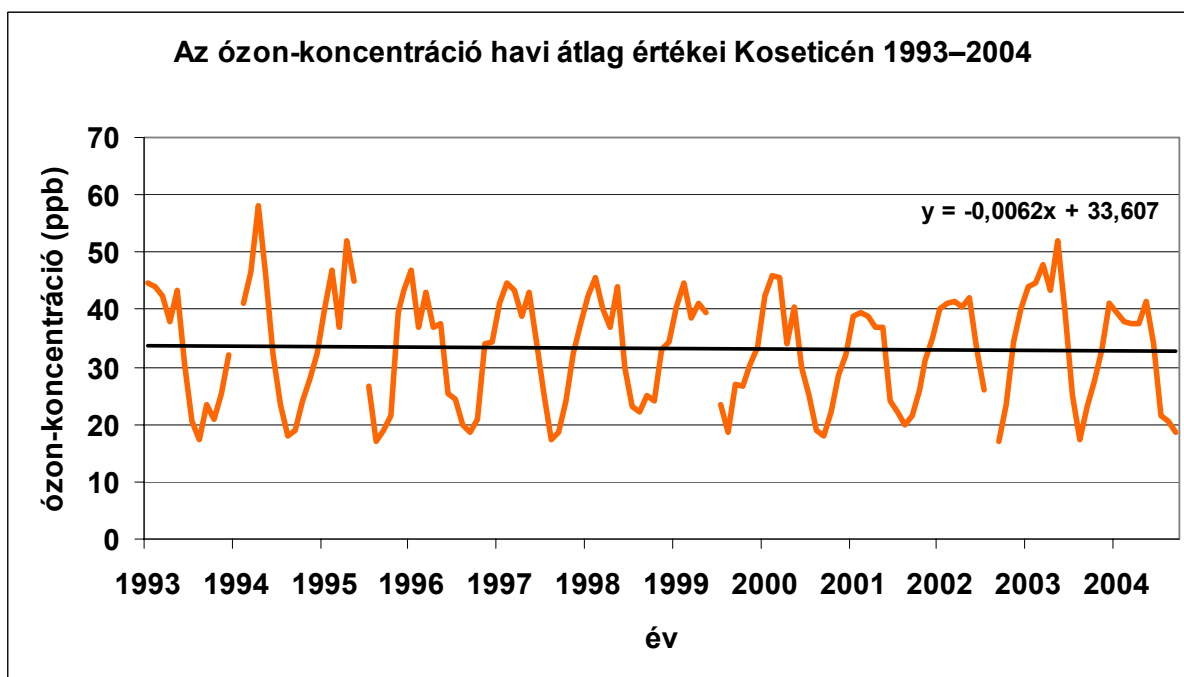
4.2.3. ábra: Az ózon-koncentráció időbeli változása és negyedfokú polinomiális trendje K-pusztán (1990–2005). A kék trendvonal az 1990–2005 közötti időszakra, a piros trendvonal csak a 2003-ig tartó időszakra vonatkozik.

Az utóbbi években K-pusztán tapasztalt alacsony értékek vizsgálata során megnéztük a hozzáférhető adatok alapján (<http://gaw.kishou.go.jp>), hogy vajon más, környező ózonmérő állomások adatsorában is megjelenik-e a csökkenő trend. Olyan környező állomásokat választottunk, amelyek adatsora legalább 2004-ig rendelkezésre állt.

Az elemzések során *Puszcza Borecka*, Lengyelország ($\varphi = 54^{\circ}09'E$, $\lambda = 22^{\circ}04'K$, $h = 157$ m) 1997–2004-ig tartó, 8 éves (4.2.4 ábra), és *Kosetice*, Csehország ($\varphi = 49^{\circ}35'E$, $\lambda = 15^{\circ}05'K$, $h = 534$ m) 1993–2004 közötti 12 éves havi ózon-koncentráció értékeit vizsgáltuk (4.2.5. ábra). A 2005-re vonatkozó adatok még nem állnak rendelkezésre.



4.2.4. ábra: Az ózon-koncentráció trendje Puszcza Boreckán (Lengyelország) 1997–2004

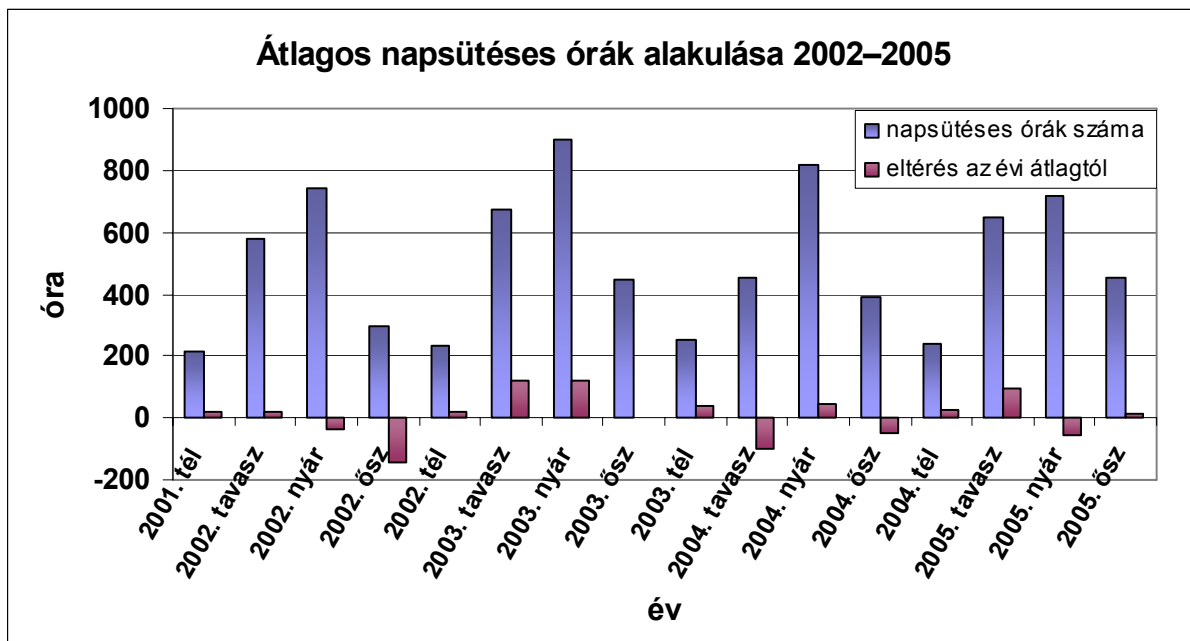


4.2.5. ábra: Az ózon-koncentráció trendje Koseticén (Csehország) 1993–2004

A két állomáson a vizsgált időszakra gyenge ózonsökkenési trendet tapasztaltunk és azt, hogy a 2004-es esztendőben az ózonképződés nem volt olyan intenzív, mint a korábbi években. Ezt főleg a lengyelországi mérések támasztják alá, mivel ez az állomás is hasonló tengerszinti magasságban helyezkedik el, és az ózonértékek korrelálnak K-pusztáéval.

Kosetice már magasabban fekszik (534 m). Ez a mérőpont a felszíni határréteg felett van, ezért alacsonyabb értékek jelennek meg és az itteni mérések így nem annyira a felszínközeli, hanem a valamivel magasabban elhelyezkedő légréteg ózon-viszonyait reprezentálják. Mindenesetre mindkét állomás esetén kimutatható a 2004. évi ózon-koncentráció csökkenése a 2003. évihez képest. Ugyanakkor a csökkenés mértéke egyik esetben sem éri el a K-pusztán tapasztaltat.

A további vizsgálatok során megvizsgáltuk 2002 és 2005 között a napsütéses órák alakulását. Pontos képet akkor kapnánk, ha a K-pusztán, vagy környezetében ismernénk a borultság, vagy globálsugárzás értékét, de ezek az adatok nem álltak rendelkezésünkre. Ezért a tágabb környezetből hozzáférhető adatokat (Budapest, Szolnok és Szeged évszakos átlagértékeit) használtuk (*Léggör*, XLVII. évfolyam; *Léggör*, XLVIII. évfolyam; *Léggör*, XLIX. évfolyam; *Léggör*, 50. évfolyam). Az évszakos átlagokat és az átlagtól való eltéréseket a 4.2.6. ábrán mutatjuk be.



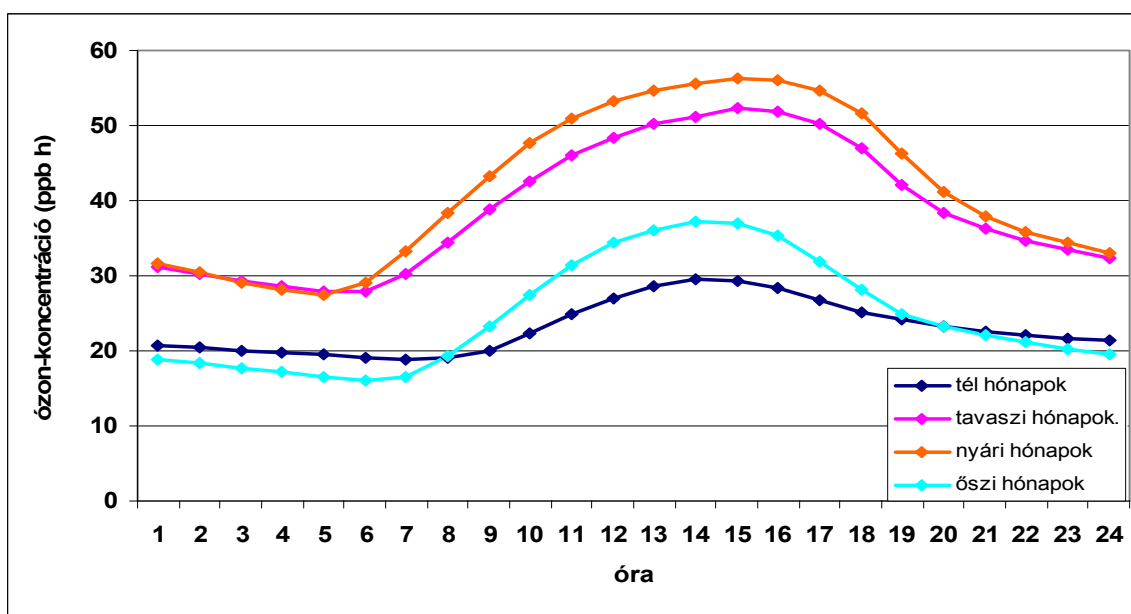
4.2.6. ábra: Az átlagos napsütéses órák alakulása és eltérése az évi átlagtól a keleti ország részben 2002–2005

Leolvasható az ábráról, hogy 2002-ben, illetve 2003-ban a nyári hónapokban a napsütéses órák száma elérte a 750 és 850 órát, illetve csak 2002 őszén volt nagyobb eltérés (–143 óra) az évszakos besugárzási átlagtól. 2004-ben az előző évhez képest kevesebb napos óra volt (810 óra) és 2005-ben is csak 780 órát sütött a Nap nyár folyamán. 2004-ben tavasszal és

ősszel, míg 2005-ben nyáron érte kevesebb napsugárzás hazánk középső részét. Ezek az adatok magyarázhatják az ózoncsökkenés mértékét a 2004-es és 2005-ös évben. Ennek ellenére a rendelkezésre álló adatok alapján nem jelenthetjük ki egyértelműen, hogy a csökkenő trend csak az időjárási helyzet változásával magyarázható.

Érdeemes megvizsgálni az egyes statisztikai jellemzők menetét is, hiszen a prekursor anyagok kibocsátásának a csökkenése olyan módon is befolyásolja az ózonképződést, hogy mérséklődik az igen magas, illetve igen alacsony ózon-koncentrációk előfordulása, miközben az átlagérték közel változatlan marad.

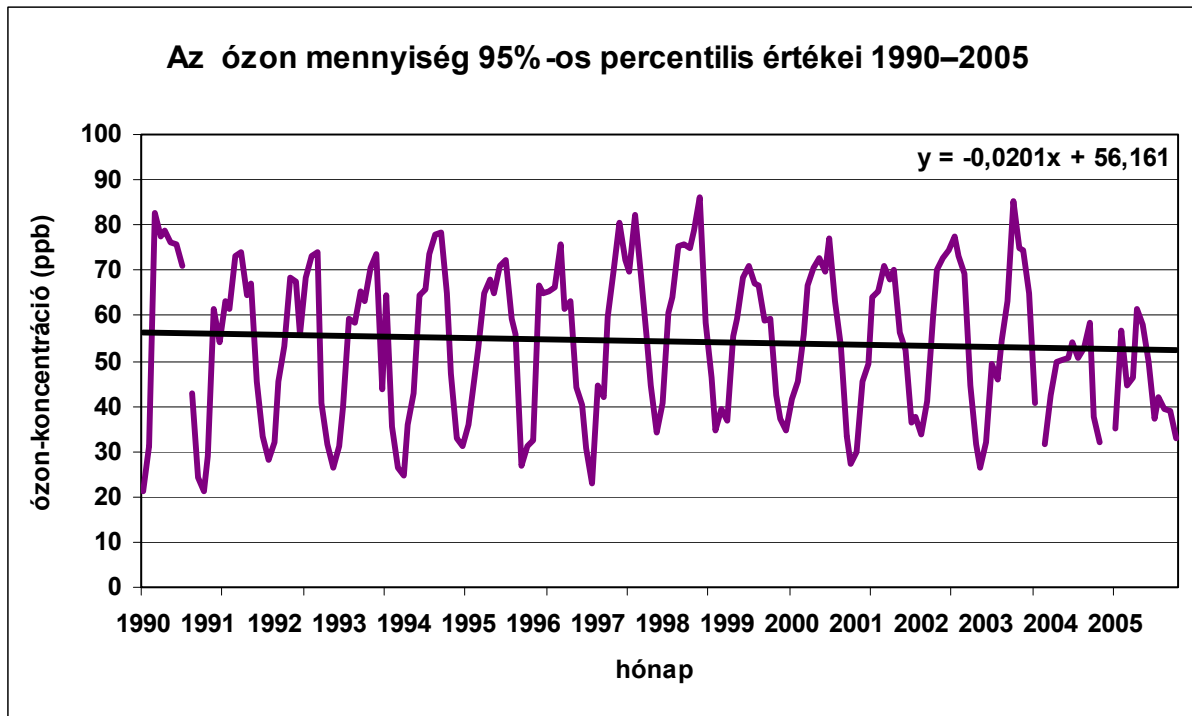
Ennek megfelelően megvizsgáltuk a különböző évszakokban (*tavas:* március, április és május, *nyár:* június, július és augusztus, *ősz:* szeptember, október és november, illetve *tél:* december, január és február) az ózon-koncentráció menetét. A 4.2.7. ábra a négy évszak átlagos napi ózon-koncentráció menetét mutatja be 1990-től 2005-ig. Az ózon koncentrációja a nyári hónapokban éri el a maximumát (60 ppb) a kora délutáni órákban, télen pedig a minimumát (15 ppb) a kora reggeli órákban. Az átmeneti évszakok (tavasz, ősz) ózon-koncentrációja maximuma rendre 52 és 38 ppb. A tavaszi magasabb koncentráció azzal magyarázható, hogy a sztratoszférában az ózon-koncentráció maximum tavasszal fordul elő és a diszkontinuitási felületek mentén ekkor több sztratoszférikus ózon lekeveredés történik. Mind a négy évszakra jellemző, hogy az ózon-koncentráció átlagos napi menete hullámhoz hasonlít: hajnali minimummal és délutáni maximummal.



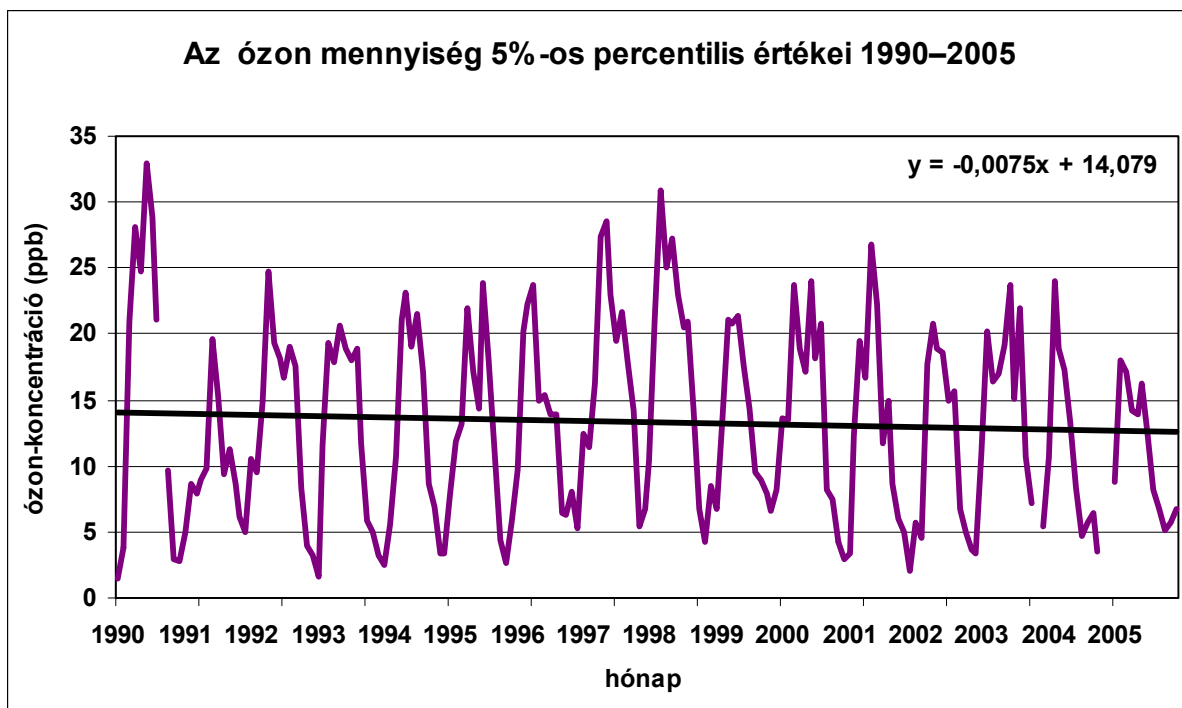
4.2.7. ábra: Az ózon-koncentráció évszakai menetei 1990–2005

Jól reprezentálja a maximum és minimum értékek trendjét a 95%-os és 5%-os percentilis érték. A 4.2.8. ábra a maximum értékek, míg a 4.2.9. ábra a minimum értékek

változását mutatja be 1990–2005 között. A 95%-os ózon-koncentráció adatok elérik egy-egy nyári hónap alkalmával a 80 ppb feletti, télen a 25–30 ppb-s értékeket. Az 5%-os percentilis ózon-mennyiségek legmagasabb értékei szintén nyaranta, a 25–30 ppb, télen a 3–5 ppb. Egyik ábra trendvonala sem mutat azonban jelentős változást a maximum és minimum értékek alakulásában. A 2004. és 2005. év alacsony értékei miatt azonban mindkét esetben gyenge csökkenés mutatkozik.



4.2.8. ábra: Az ózon mennyiség 95%-os percentilis értékei



4.2.9. ábra: Az ózon mennyiség 5%-os percentilis értékei

4. 3. Határérték-vizsgálatok

A felszínközeli légréteg ózon-koncentrációjára vonatkozóan számos határértéket állapítottak meg. Ezek a következők:

Magyarországon a 14/2001. (V. 9.) KöM-EüM-FVM együttes rendelete határozza meg az ózon-koncentrációra vonatkozó küszöbértékeket. Ez alapján a napi 8 órás mozgóátlag-koncentrációk maximuma $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kb. 60 ppb) lehet, amelyet hároméves vizsgálati időszak átlagában 80 napnál többször nem szabad túllépni.

Az 1999-es Götebörgi Jegyzőkönyv (I. melléklete) a talajközeli ózon csökkentésével kapcsolatban határértékként jelöli ki a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t (kb. 60 ppb) 8 órás (9–16 óráig) átlagkoncentrációban. A 4.3.1. táblázat az 1990. január és 2005. december közötti időszakban tapasztalt 8 órás átlagos 60 ppb-s határérték túllépéseinek számát mutatja be az egyes hónapokban K-pusztán.

Mind a magyarországi 14/2001. (V. 9.) KöM-EüM-FVM együttes rendelet, mind az Európai Unió (2002/3/EK irányelv) előírásai szerint tájékoztatni kell a lakosságot, ha az órás ózon-koncentráció meghaladja a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, illetve riasztást kell kiadni, ha eléri a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t.

Az Európai Gazdasági Bizottság a vegetáció szempontjából azt is kritikusnak tekinti, ha áprilistól szeptemberig (a tenyészidőszakban) a nappali órák (9–16 óráig) átlagkoncentrációja meghaladja az 50 µg/m³-t (kb. 25 ppb).

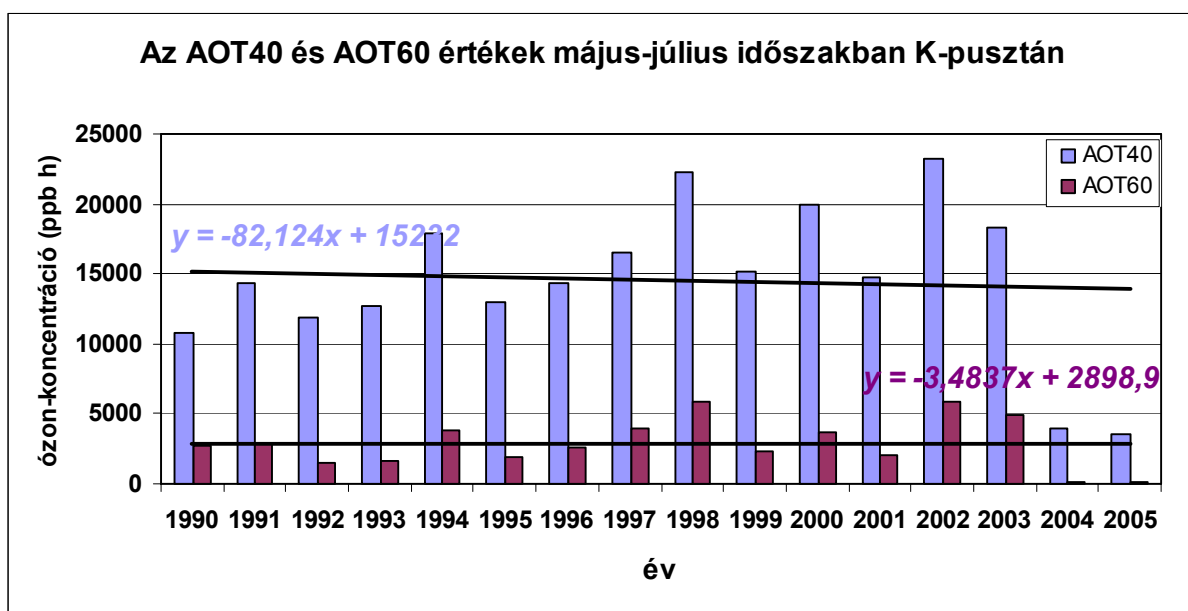
4.3.1. táblázat: 60 ppb-s határérték túllépéseinek száma K-pusztán 1990–2005

	jan.	febr.	márc.	ápr.	máj.	jún.	júl.	aug.	szept.	okt.	nov.	dec.
1990	-	-	1	-	-	-	9	2	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	4	4	1	-	-	-	-
1992	-	-	-	1	-	-	-	1	5	-	-	-
1993	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-
1994	-	-	-	-	-	4	8	7	-	-	-	-
1995	-	-	-	-	-	-	6	4	-	-	-	-
1996	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-
1997	-	-	-	3	8	7	3	7	4	-	-	-
1998	-	-	-	6	7	8	7	10	-	-	-	-
1999	-	-	-	1	4	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	4	8	-	7	-	-	-	-
2001	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
2002	-	-	-	1	6	8	8	5	-	-	-	-
2003	-	-	-	-	-	11	7	7	-	-	-	-
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Az állomáson leginkább áprilistól augusztusig tartó időszakban haladja meg a 60 ppb-t a napi átlagkoncentráció. A legveszélyesebb három hónap a június, július és augusztus. Október, november, december, január és február hónapban egyszer sem fordult elő, hogy a napi átlag meghaladta volna a 60 ppb-s határértéket. Az éveket külön-külön vizsgálva 2004-ben, illetve 2005-ben volt a legkevesebb olyan nap, amikor határérték-túllépés fordult elő, míg 1998-ben volt a legtöbb. A határérték-túllépések magas száma K-pusztán a lokális fotokémiai folyamatok mellett a közeli nagyobb ipari városok, illetve az M5-ös autópálya hatásával is magyarázható.

A vegetáció bizonyos koncentráció-határ alatt nem érzékeny az ózonkoncentrációra, e felett viszont a káros hatások elsősorban az expozícióval kapcsolatosak. Így a koncentráció-határérték túllépések száma nem megfelelő jellemző a környezeti károk becsléséhez. Ezért vezették be a 14/2001. (V. 9.) KöM-EüM-FVM együttes rendeletben is szereplő ún. *AOT_{xx}* (accumulated amount of ozone over the threshold value of xx ppb) értékeket, ahol xx helyén általában 40 (mezőgazdasági területek esetén) vagy 60 ppb (erdők esetén) áll (Musselman *et al.*, 2006).

A kísérleti tapasztalatok szerint 3000 ppb h-s AOT40 érték a májustól júliusig tartó intenzív növekedés idején kb. 5%-os csökkenést okoz a búzatermésben. Az áprilistól szeptemberig tartó időszakra vonatkozó kritikus érték 10000 ppb h. Ez utóbbi határérték elsősorban az erdők szempontjából fontos. A 4.3.1. ábra K-puszta mérőállomásra vonatkozó AOT40 és AOT60 értékeket tüntették fel. Az ábrán látható, hogy mind a mezőgazdasági termelés, mind az erdőgazdálkodás szempontjából az ózon-terhelés az ország középső részén a kritikus terhelés felett van, az ózon által okozott gazdasági károk jelentősek lehetnek annak ellenére, hogy a 2004 és 2005-ös évek ózonértékei jóval alacsonyabbak a 1990–2003-ig tartó időszakhoz képest.



4.3.1. ábra: Az AOT40 és AOT60 értékek a K-pusztai mérőállomáson a május-július időszakban (ppb h)

4. 4. Az ózon-koncentráció alakulása az időjárási helyzet függvényében

Az ózon fotokémiai folyamat eredményeként keletkezik, tehát az időjárás egésze komolyan befolyásolja a keletkezésének intenzitását. K-puszta esetében 16 éves adatsor áll rendelkezésre, hogy megvizsgáljuk, milyen szinoptikus helyzetek kedveznek az ózon keletkezésének. A vizsgálatokhoz a Péczely-féle makroszinoptikus típusokat használtuk. Mivel a Péczely-féle makroszinoptikus kódok 1990–2001-ig állnak a rendelkezésemre, ezért csak 11 év adatsorát tudtam feldolgozni.

Korábbi vizsgálatok alapján (Sándor *et al.*, 1997) megállapították, hogy kapcsolat fedezhető fel a szinoptikus helyzetek és a kialakult ózon-koncentráció között. Egyes időjárási

helyzetek kedvezőbb feltételt biztosítanak az ózon keletkezéséhez, mint mások. Ismert, hogy anticiklonok esetén magasabb koncentráció várható, mint ciklonális helyzetben. Ezen vizsgálatok arra is rámutattak, hogy a nyári hónapokban ritkán előforduló délies anticiklonális helyzet nagy valószínűséggel kiugróan magas ózon-koncentrációt eredményez K-pusztán.

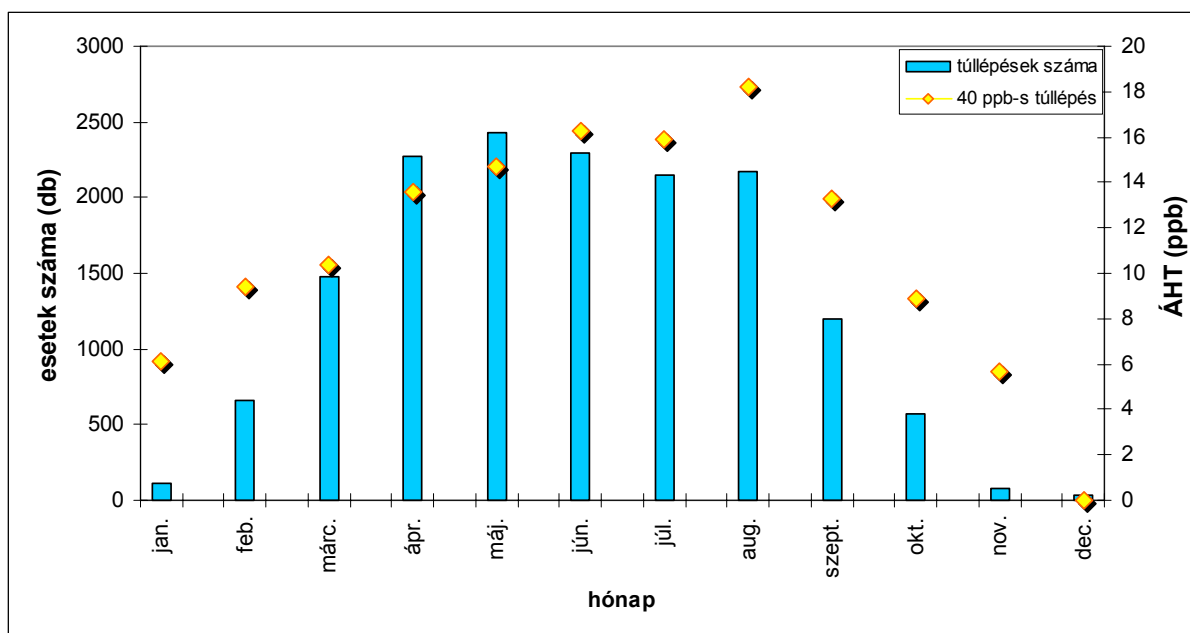
A vizsgálatokhoz azért a Péczy-féle osztályozás 13 makroszinoptikus típusát használtuk fel (4.4.1. táblázat), mert ezen kategóriák elsősorban a Kárpát-medence időjárási helyzeteinek típusait reprezentálják.

4.4.1. táblázat: Péczy-féle makroszinoptikus kategóriák

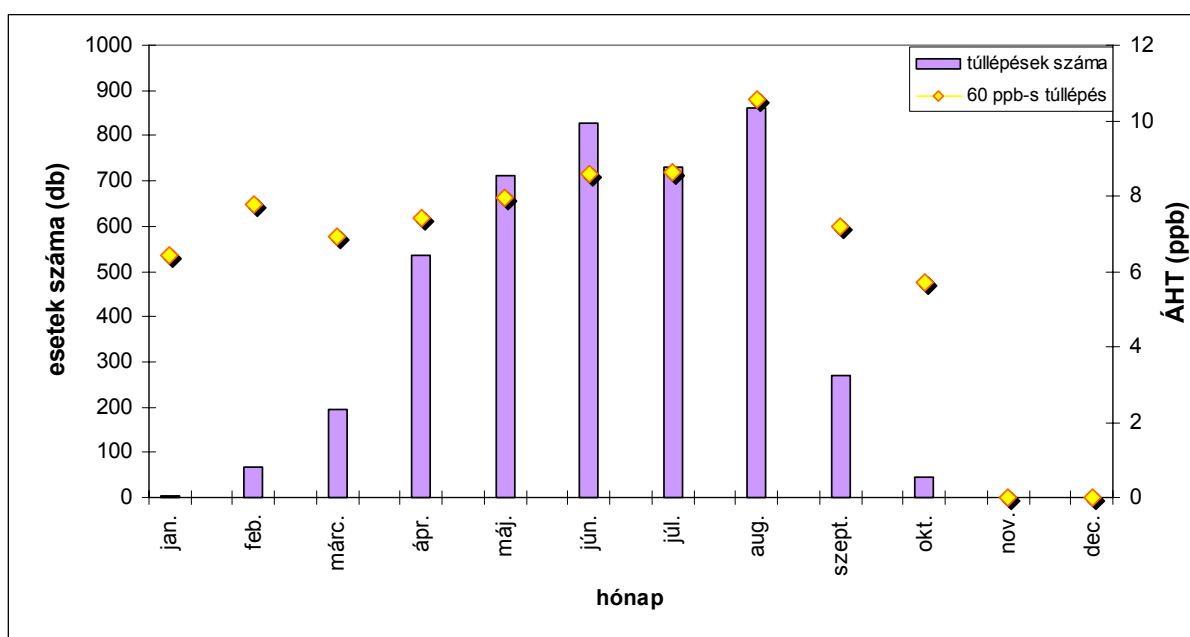
Kódszám	1	2	3	4	5	6
Megnevezés	Ciklon hátoldali áramrendszere (mCc)	Anticiklon a Brit-szigetek térségében (AB)	Mediterrán ciklon hátoldali áramrendszere (CMw)	Ciklon előoldali áramrendszere (mCw)	Anticiklon Magyarországtól keletre (Ae)	Mediterrán ciklon előoldali áramrendszere (CMw)
7	8	9	10	11	12	13
Zonális ciklonális (zC)	Nyugatról benyomuló anticiklon (Aw)	Anticiklon Magyarországtól délre (As)	Anticiklon Magyarországtól északra (An)	Anticiklon Fennoskandinávia térségében (AF)	Anticiklon a Kárpát-medence fölött (A)	Cikloncentrum a Kárpát-medence fölött (C)

A vegetáció bizonyos koncentráció-határ felett érzékeny az ózon mennyiségére, ezért megnéztük, hogy a magas ózon-koncentráció értékek milyen makroszinoptikus helyzetek fennállásakor jelentkeztek. Így megvizsgáltuk az óras ózon-koncentráció értékekből a 40 és 60 ppb feletti túllépés gyakoriságát. Vizsgálatainkat a teljes időszakra és a nap minden órájára elvégeztük.

Első lépésként megnéztük az óras ózon-koncentráció határérték-túllépéseket az 1990–2001 közötti időszakban (4.4.1. és 4.4.2. ábra). Mindkét ábrán feltüntettük az átlagos határérték-túllépéseket (*ÁHT*) (sárga rombuszok) – amelyek az adott időszakra vonatkozó összes óras 40 ppb (illetve 60 ppb) fölötti ózon-koncentráció értékek átlagát jelentik, illetve a túllépések számát (kék oszlopok). Látható, hogy 40 és 60 ppb feletti túllépéses esetek száma a tavaszi és nyári időszakban fordultak elő legtöbbször (április–augusztus), télen szinte nincs is vagy igen kevésszer. (Ebből is látszik, hogy az ózon elsősorban fotokémiai folyamat eredményeként keletkezik.)

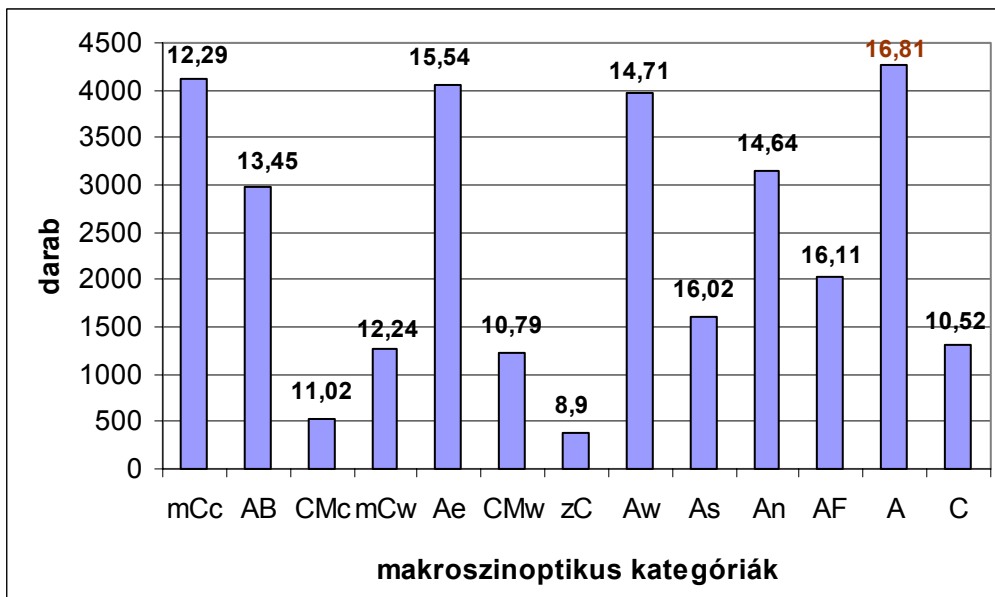


4.4.1. ábra: 40 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között



4.4.2. ábra: 60 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között

Ezek után megvizsgáltuk a makroszinoptikus helyzetek és az ózon-koncentráció kapcsolatát, amelyet a 4.4.3.-es és 4.4.4.-es ábrák szemléltetnek.

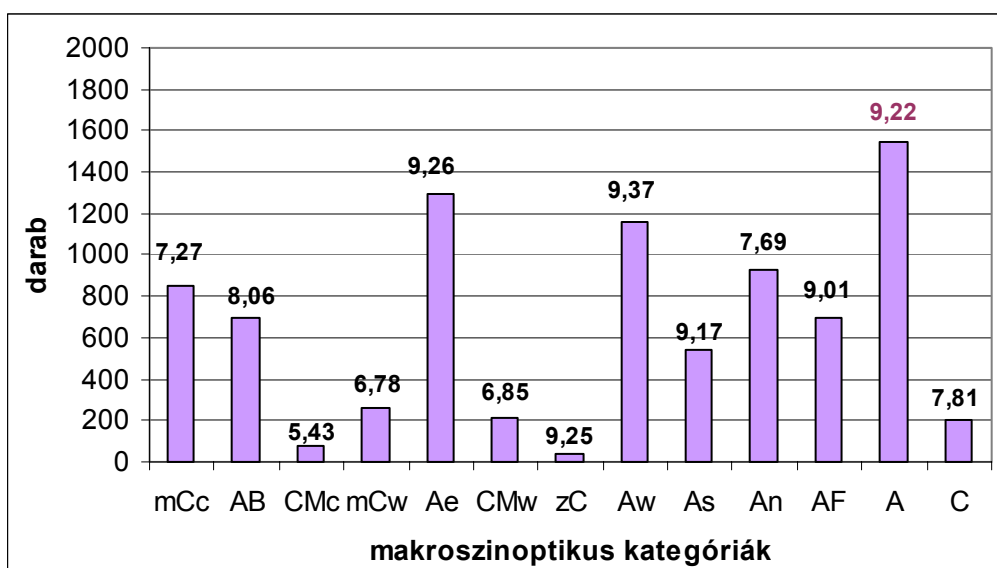


4.4.3. ábra: 40 ppb-s órás határérték túllépések száma a Péczy-féle makroszinoptikus helyzetekben 1990 és 2001 között³. Az oszlopok tetején a 40 ppb feletti átlagos órás ózon-koncentrációk értékei szerepelnek.

A 4.4.3. és 4.4.4. ábrán a makroszinoptikus kategóriákhoz tartozó oszlopok tetején feltüntettük a hozzájuk tartozó összes 40, illetve 60 ppb feletti átlagos órás ózon-koncentráció értékeket. Mindkét esetben a három leggyakrabban előforduló makroszinoptikus helyzet az **1.** (*mCc* – ciklon hátoldali áramrendszere), **5.** (*Ae* – anticiklon Magyarországtól keletre), a **8.** (*Aw* – nyugatról benyomuló anticklon) és a **12.** (*A* – anticiklon a Kárpát-medence felett) Péczy-féle makroszinoptikus helyzet volt és ezekhez tartoztak magas határérték-túllépések is.

A legkevésbé meghatározó a **3.** (*CMc* – mediterrán ciklon hátoldali áramrendszere) és **7.** (*zC* – zonális ciklonális) típusok voltak. Magyarországot ritkán érintik olyan mediterrán ciklonok (*CMc*), amelyek Európa délkeleti térsége felé mozdulnak el, úgy hogy hazánk ezen ciklonok hátoldali hidegfronti áramrendszerébe kerüljön. Ezen eredmények alapján, az sem jellemző, hogy zonális ciklonális (*zC*) hatás (Ny-K-i) érvényesüljön.

³ Az egyes makroszinoptikus helyzetek leírását a 4.4.1. táblázat tartalmazza.



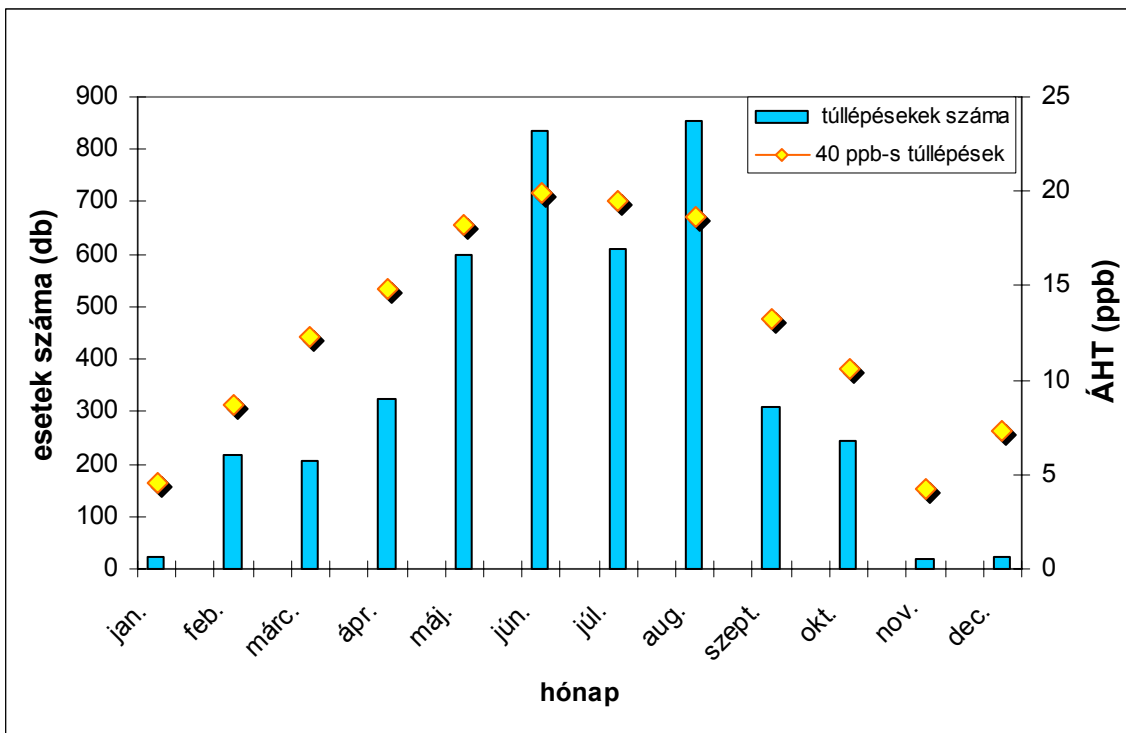
4.4.4. ábra: 60 ppb-s órás határérték-túllépések száma a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetekben 1990 és 2001 között⁴. Az oszlopok tetején a 60 ppb feletti átlagos órás ózonkoncentrációk értékei szerepelnek.

Az 5. (anticiklon Magyarországtól keletre), a 8. (nyugatról benyomuló anticiklon) és a 12. (anticiklon a Kárpát-medence felett.) Péczely-féle makroszinoptikus kategóriák mindegyike az *anticiklonális* típushoz tartozik. Az 1. (ciklon hátoldali áramrendszere) azonban ciklonális típusú. Ezek közül mindkét esetben a 12. helyzet fordult elő legtöbbször. A 60 ppb-t meghaladó túllépések esetén is a 12. makroszinoptikus helyzet fordul elő legtöbbször (1542-szer), de a legmagasabb átlagos órás koncentráció a 8. (Aw) helyzetben volt. Ez utóbbi is az anticiklonális típushoz tartozik.

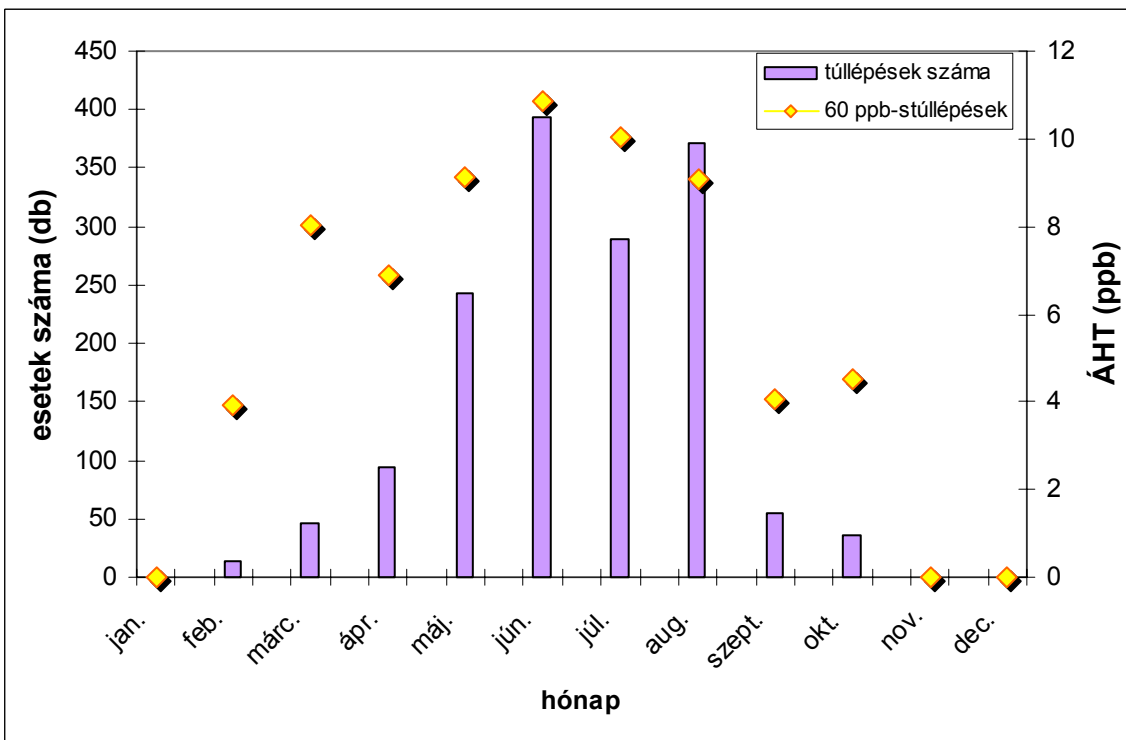
Tovább vizsgálódva megnéztük külön-külön a három leggyakrabban előforduló makroszinoptikus helyzet 40 és 60 ppb-s értékeinek alakulását.

Leggyakrabban a 12. Péczely-féle makroszinoptikus helyzet fordult elő. Mindazokat az anticiklonális helyzeteket ide soroljuk, amikor az anticiklon középponti része a Kárpát-medence területére esik. Ezek lehetnek ciklon-rendszereket elválasztó gyors mozgású ún. köztes anticiklonok, az esetek nagyobb részében azonban hosszabb ideig tartózkodnak a Kárpát-medence fölött. Tartózkodási idejüket télen meghosszabbítja a medence alján megrekedő hideg légtömeg (hideg légréteg) fennmaradását. Tartós fennállása zavartalan sugárzási időjárást biztosít, télen erős lehűléssel, jelentős hőmérsékleti inverziókkal, nyáron nagy melegekkel.

⁴ Az egyes makroszinoptikus helyzetek leírását a 4.4.1. táblázat tartalmazza.



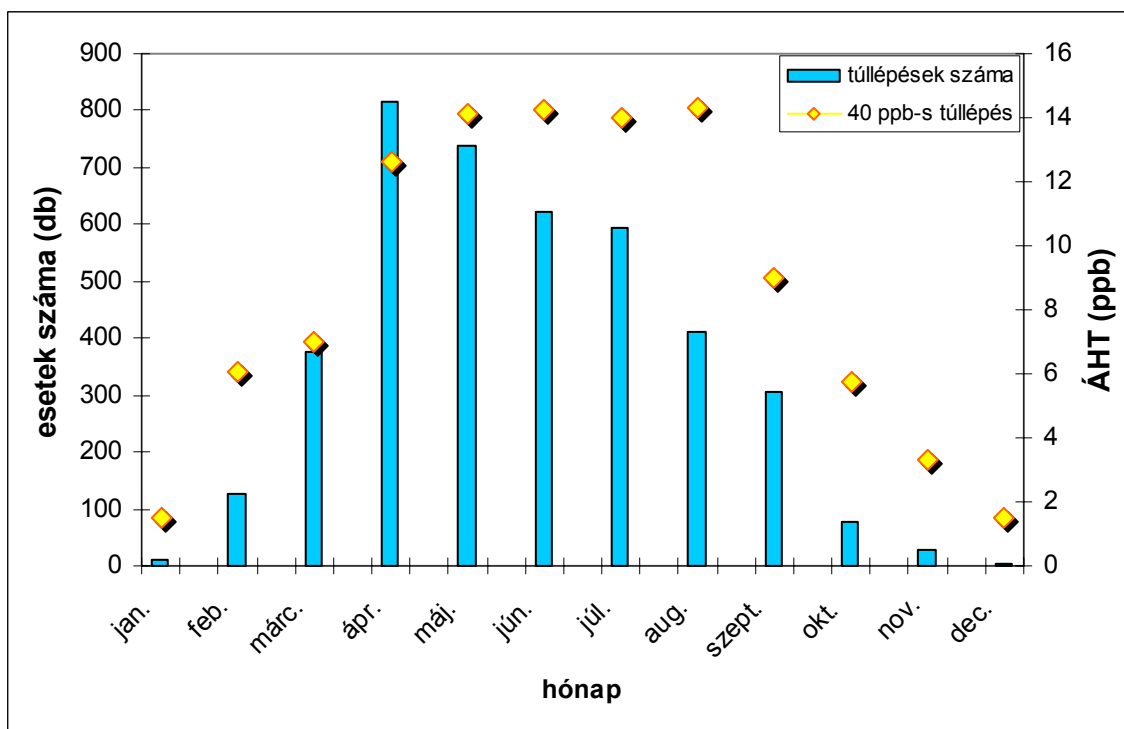
4.4.5. ábra: 40 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczy-féle 12. makroszinoptikus helyzetben



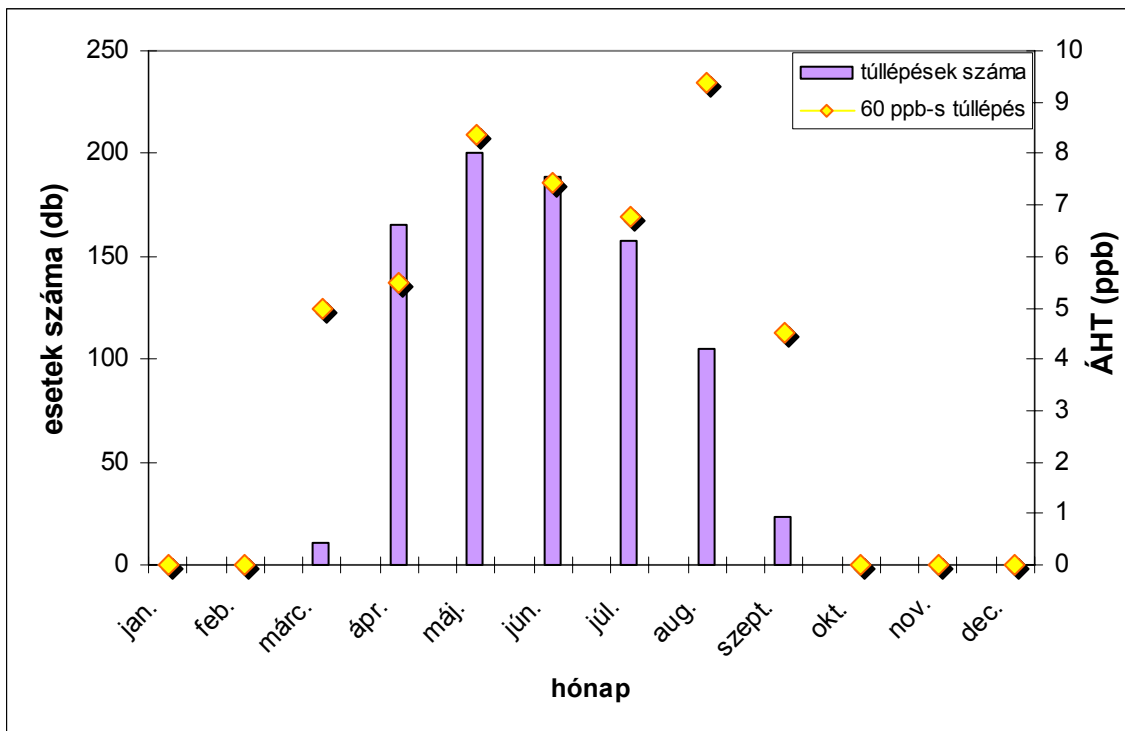
4.4.6. ábra: 60 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczy-féle 12. makroszinoptikus helyzetben

A Péczely-féle 12. makroszinoptikus helyzetre a 4.4.5. és 4.4.6. ábrán a túllépések, illetve az esetek számát is felrajzoltuk. Mindkét ábrán – 40 és 60 ppb-s túllépésnél is – a nyári időszakban (május–augusztus) voltak magas értékek, 10–20 ppb-vel haladták meg a 40, illetve 60 ppb-t. A 40 ppb-s túllépések mintegy kétszer gyakrabban fordultak elő (kb. 800-szor) és ez esetben még télen is megjelent néhány túllépés.

Az ország időjárására második leginkább jellemző makroszinoptikus helyzet az 1. Péczely-féle makroszinoptikus kategória volt. Ilyenkor Magyarország a tőle kelet-északkeletre, a Baltikum vagy Ukrajna fölött tartózkodó ciklon hátoldali, hidegfronti áramrendszerébe esik. A helyzet változékony, szeles, csapadékos időjárást okoz a Kárpát-medencében. Nyáron hidegfront nélküli változata is kialakulhat olyankor, amikor Dél-Kelet-Európa fölé kiterjeszkedik a dél-nyugat ázsiai depressziós terület, ám ilyenkor a bárikus gradiens jóval kisebb, az időjárás kedvez a helyi záporok, zivatarok kialakulásának.



4.4.7. ábra: 40 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczely-féle 1. makroszinoptikus helyzetben



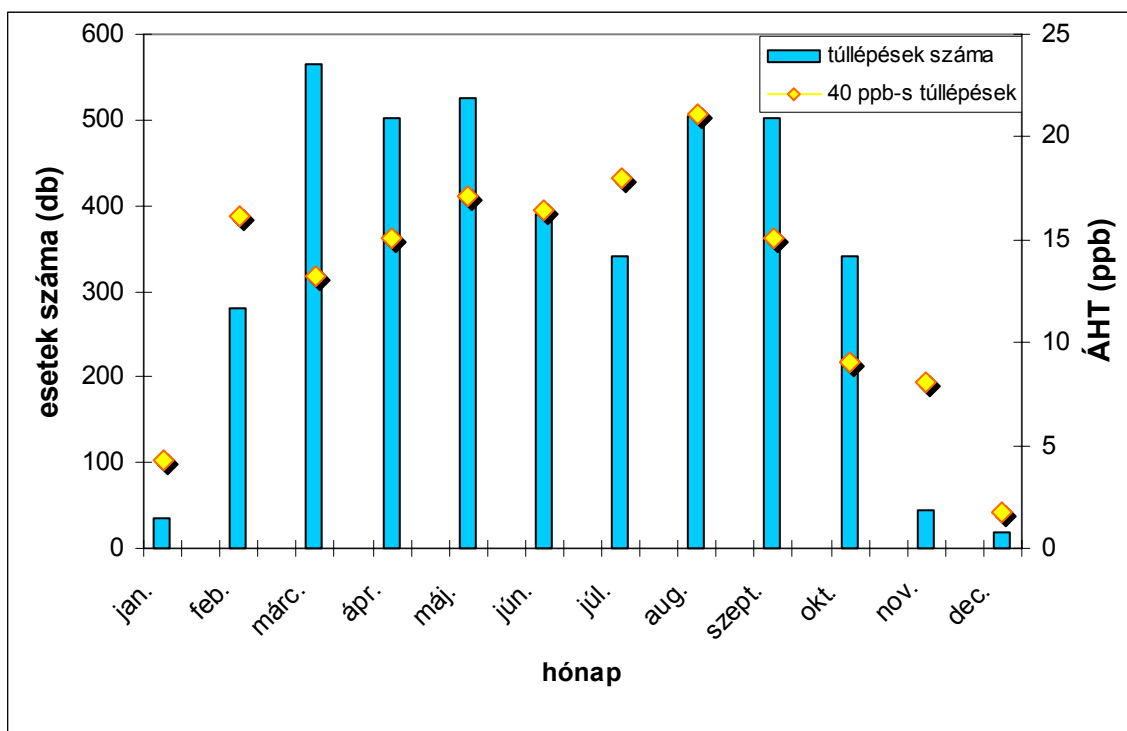
4.4.8. ábra: 60 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczely-féle 1. makroszinoptikus helyzetben

A Péczely-féle 1. makroszinoptikus helyzet ciklonális típushoz (meridionális irányítású helyzetek északias áramlással) tartozik. A 4.4.7. és 4.4.8. ábrán látható, hogy magas értékek már a tavaszi hónapban (április, május) is előfordultak. A túllépések száma a 40 ppb-s túllépések esetében a 820-as, a 60 ppb-s túllépéseknél a 200-as esetszámot is elérték. A határérték-túllépések átlagos értéke mindkét esetben nyáron voltak a legmagasabbak 9–14 ppb-vel.

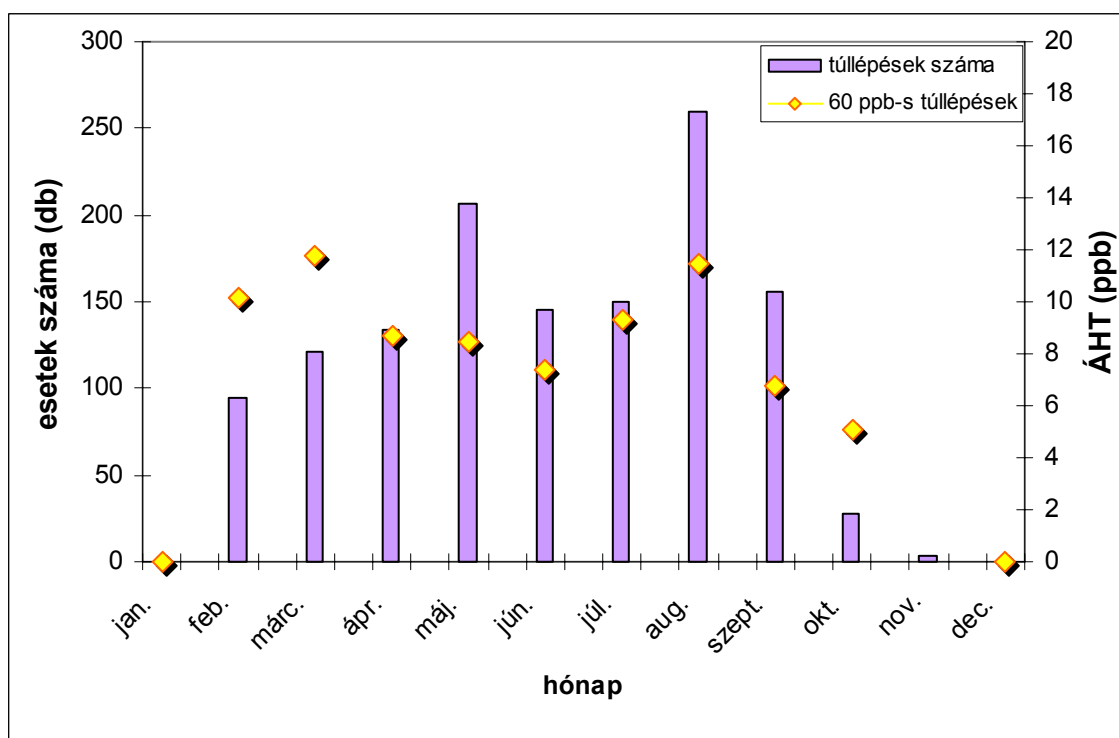
Valószínűleg elsősorban ez a makroszinoptikus helyzet okozza a Budapesten kialakuló K-pusztá felé áramló szennyezett levegőt. Mivel az ózon másodlagos szennyező anyag, így ez a főváros felől érkező, prekursor anyagokkal teli légtömeg megfelelő forrásnak bizonyul az ózonkeletkezéshez.

A harmadik leggyakrabban előforduló szinotikus helyzet az 5. Péczely-féle makroszinoptikus szituáció volt. Ekkor a tőlünk keletre, központjával Ukrajna fölött elhelyezkedő anticiklon déli-délkeleti áramlása érvényesül. Az időjárási frontok csapadékzónái hazánktól nyugatra esnek. A helyzet fennállásakor nyáron meleg, száraz, derült időjárás, télen gyakori köd és zúzmaraképződés jellemző. A hideg évszakban a Keleti-

Kárpátok vonulata módosítja az izobárok futását és az anticiklonon talajközeli hideg légtömegei a Déli-Kárpátokat megkerülve áramlanak be a medencébe (Kossava-helyzet).



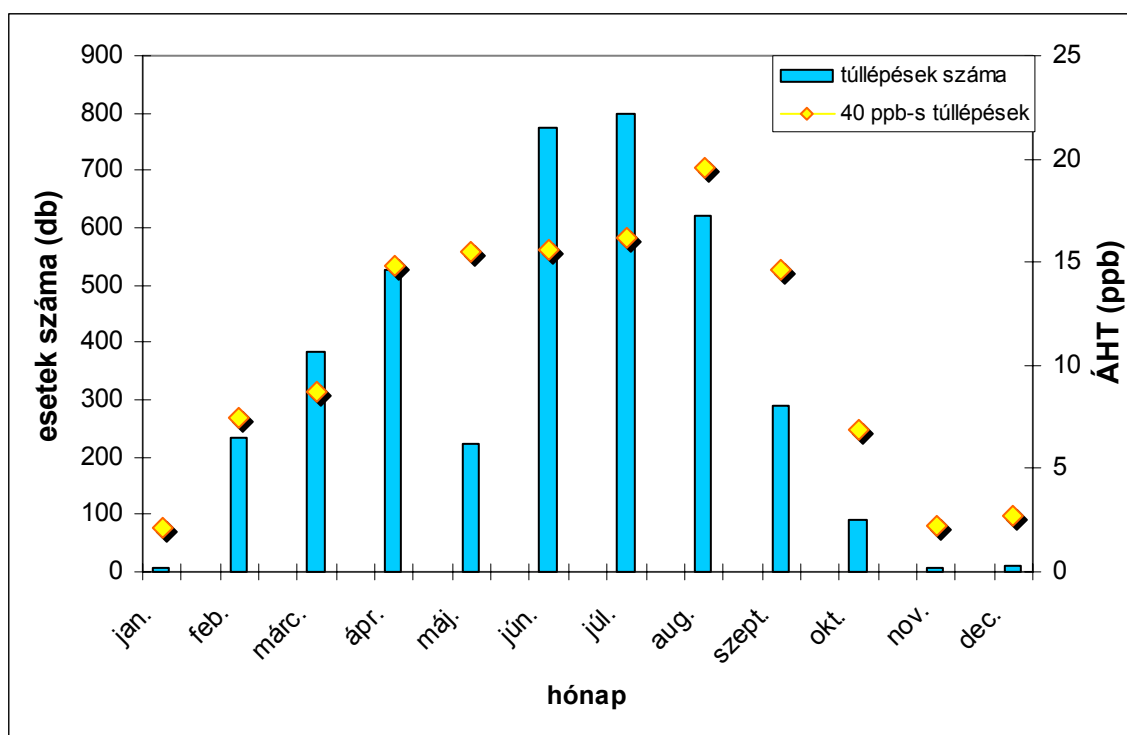
4.4.9. ábra: 40 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczely-féle 5. makroszinoptikus helyzetben



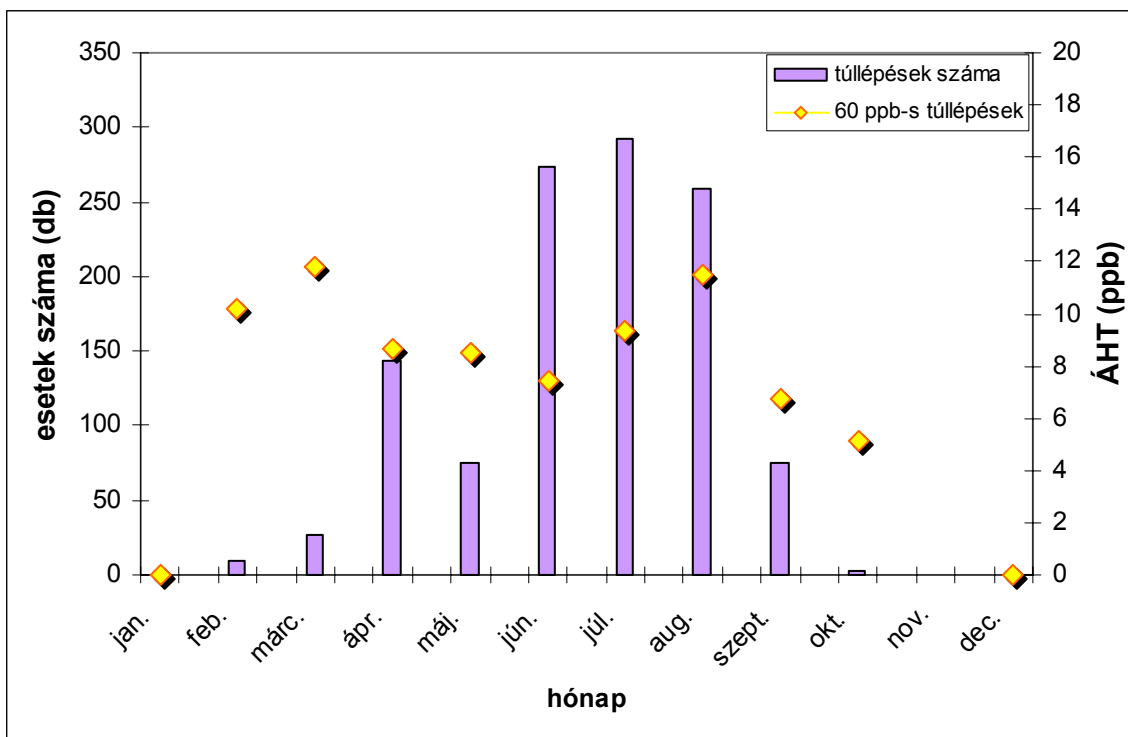
4.4.10. ábra: 60 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczely-féle 5. makroszinoptikus helyzetben

A Péczy-féle 5. makroszinoptikus helyzetben a 4.4.9. és 4.4.10. ábrán a túllépések, illetve az esetek számánál hasonlóan az előzőhöz, elsősorban a nyári időszakban (május–augusztus) voltak magas értékek. A 40 ppb-s túllépések már tavasz és kora nyár alkalmával jelentősen megnöttek (kb. 10–15 ppb). Úgy tűnik, ez az anticiklonális helyzet az átmeneti évszakokban (tavasz, ősz) gyakrabban fordul elő (500–550-szer) és okoz magasabb ózon-koncentráció értékeket.

A negyedik leggyakrabban előforduló helyzet a 8. Péczy-féle makroszinoptikus szituáció volt. Ez olyan módon jön létre, hogy az azori anticiklon északabbra húzódásakor (elsősorban nyáron) annak nyúlványa egészen Közép-Európa térségéig hatol előre. Megjelenése általában hidegfront átvonulásával kapcsolatos, élénk észak-nyugati áramlást eredményez a Kárpát-medence térségében.



4.4.11. ábra: 40 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczy-féle 8. makroszinoptikus helyzetben



4.4.12. ábra: 60 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentrációk előfordulási száma (db) és óras átlagos határérték-túllépések (ppb) 1990–2001 között a Péczely-féle 8. makroszinoptikus helyzetben

A Péczely-féle 8. makroszinoptikus helyzetben a túllépések és az esetek száma hasonló menetet mutat mindkét – 4.4.11. és 4.4.12. – ábrán. Itt szintén a legmagasabb értékek nyáron fordulnak elő, akár a 12–20 ppb határérték-túllépések is megesnek és a túllépések száma is igen magas (800).

Úgy tűnik ez a makroszinoptikus helyzet is hozzájárul a főváros felől K-puszta felé sodródó szennyezőanyag csóvához.

A Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek megvizsgálása azt az eredményt mutatja, hogy Magyarországon elsősorban anticiklonok esetén magasabb az ózon-koncentráció, mivel ilyenkor általában hosszabb ideig hazánk felett tartózkodik egy magas nyomású, felhőoszlató hatású képződmény és ekkor erősebb a besugárzás, amely elengedhetetlen az ózon képződéséhez.

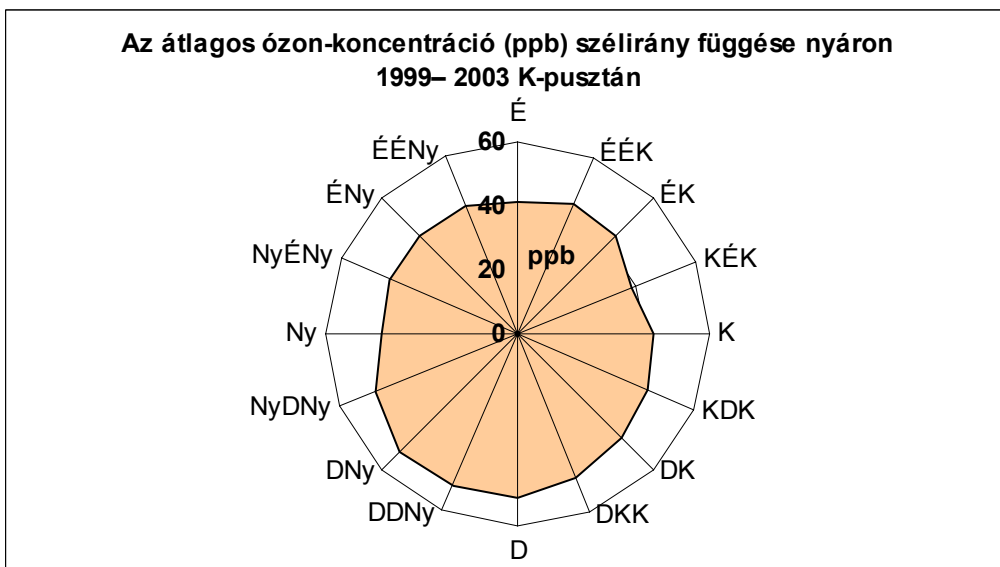
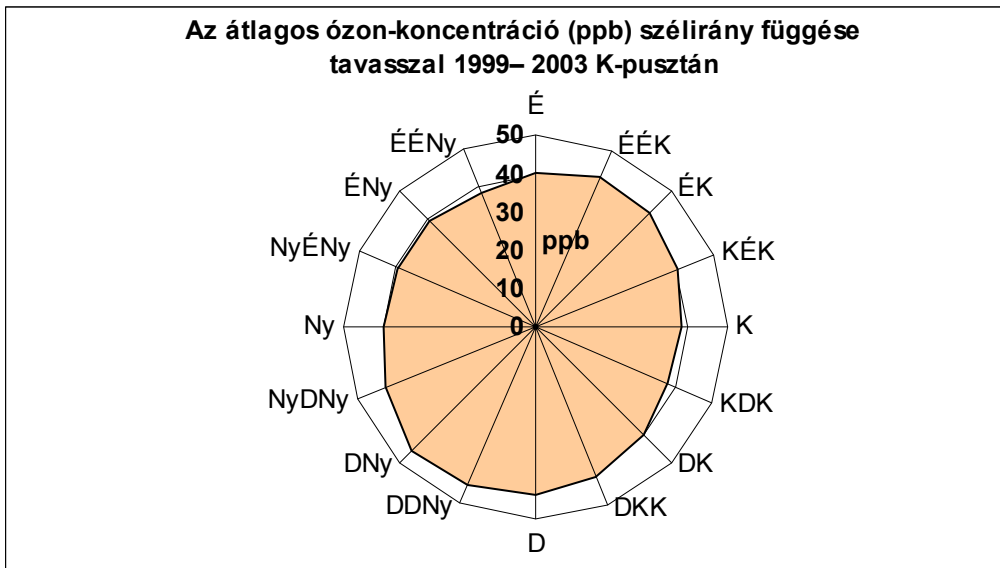
4.5. Az ózon-koncentráció szélirány függése

További vizsgálatok végeztünk azzal kapcsolatban, hogy az ózon-koncentráció magas értékei milyen szélirányokhoz tartoznak, azaz melyek azok a főbb irányok amelyek megjelenésével magas vagy magasabb (60 vagy akár 80 ppb) koncentráció értékek várhatók. Kiválasztottuk öt év mérési adatsorát (1999–2003), mivel ebben az időszakban tavasz és nyár idején magas volt az átlagos ózon-koncentráció (45–52 ppb), illetve, mert erre az időszakra állt rendelkezésünkre folyamatos szélirány adatsor. Az öt év órás szélirány értékeiből készített szélrózsát a 4.5.1. ábra mutatja be. Jól kivehető, hogy a nyugat-északnyugati, illetve a kelet, kelet-északkeleti irányítottság a meghatározó K-pusztán.

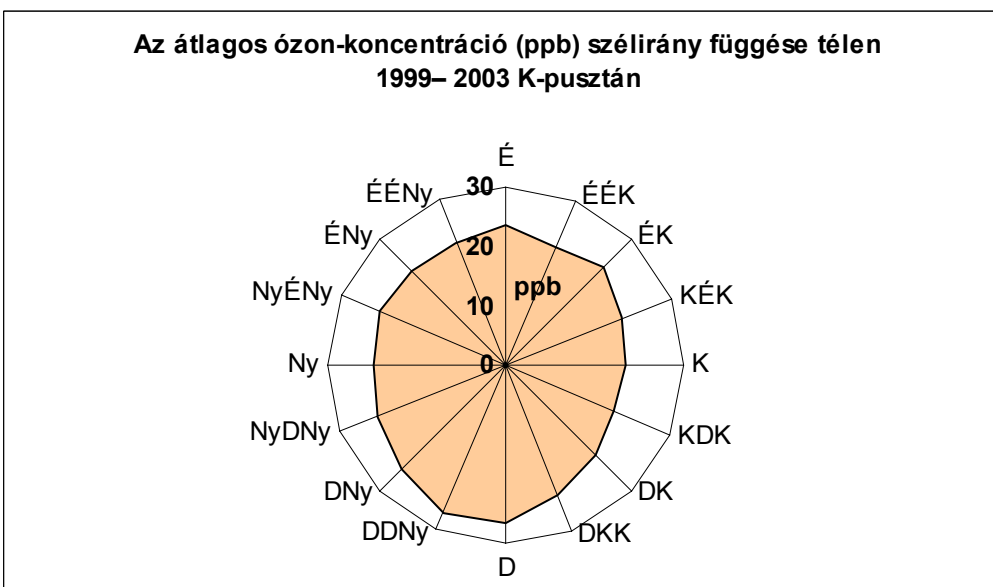
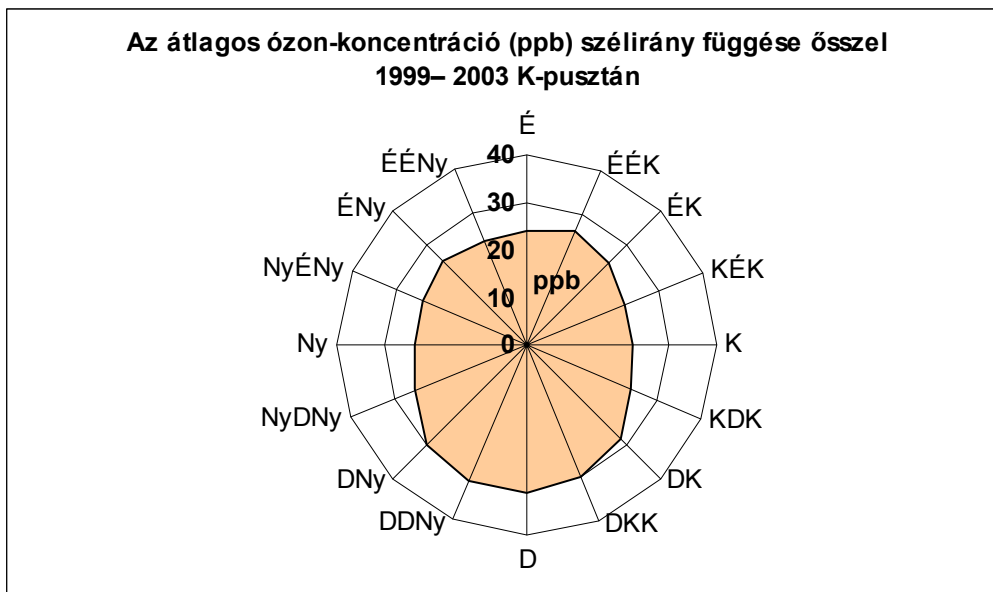


4.5.1 ábra: A szélirány gyakoriság-eloszlása K-pusztán, 1999–2003

Mivel az ózon-koncentráció átlagos szintje jelentősen függ attól, hogy az év melyik (év)szakában vagyunk, a négy évszakot választottuk ki: *tavasz* (március, április és május), *nyár* (június, július és augusztus), *ősz* (szeptember, október és november), illetve *tél* (december, január és február). E négy évszak esetében meghatároztuk a különböző irányokhoz tartozó átlagos ózon-koncentrációkat K-pusztán (4.5.2. a) és b) ábrák).



4.5.2. a) ábra: Az óras átlagos ózon-koncentráció szélirány függése tavasszal és nyáron K-pusztán, 1999–2003



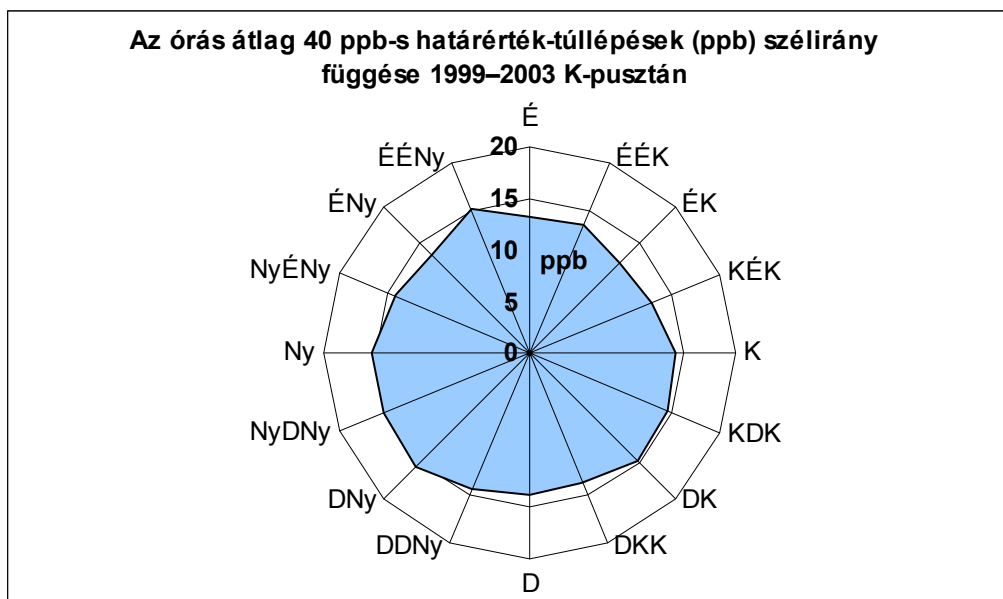
4.5.2. b) ábra: Az átlagos óráos ózon-koncentráció szélirány függése ősszel és télen K-pusztán, 1999–2003

Tavasszal és nyáron egy gyenge északkelet-délnyugati irányítottság fedezhető fel, de minden irányban magasak a koncentráció értékek (40–45 ppb). Hasonló kép tárul elénk az őszi és téli ábrákon is. Ősszel inkább déli, míg télen a déli áramlás mellett megjelenik egy északi komponens is, azonban nagy eltérések itt sincsenek. Az ózon-mennyiség mindkét esetben jóval alacsonyabb (20–25 ppb) a tavaszi és nyári évszakhoz képest.

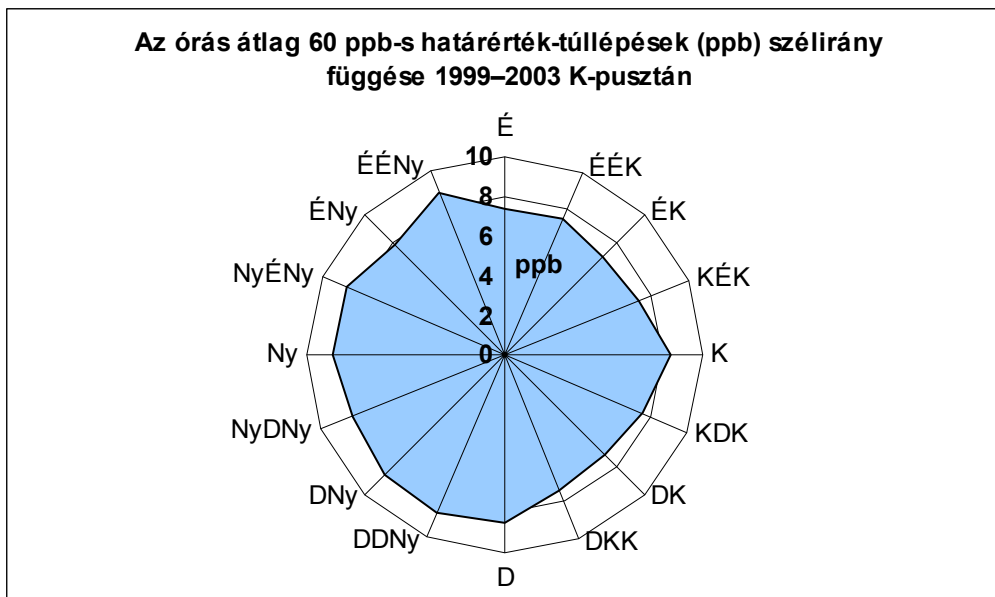
Már korábbi feltételezték (Haszpra, 1994), hogy K-pusztá magas ózon-koncentráció értékeiben kimutatható Budapest szennyezőanyag csóvájá. Ugyanakkor az ózon-koncentráció és szélirány kapcsolatának összevetésénél, az általunk vizsgált öt éves időszakban nem

mutatható ki Budapest kiemelt hatása. A budapesti hatásnak magasabb délutáni, esetleg alacsonyabb éjszakai koncentrációt kellene okoznia, így elképzelhető, hogy a napi átlagon nem látszik a hatás.

Ezek után megvizsgáltuk az 40 és 60 ppb-s órás átlagérték-túllépések és a szélirány kapcsoltságát. A 4.5.3 és 4.5.4. ábrákon az előbb említett összes órás határérték-túllépéseket tüntettük fel. A órás átlagos 40 ppb-s határérték-túllépésnél két irányítottság látható: észak-északnyugati, illetve nyugati-délnyugati, de egyik sem tér el különösebben a többitől.



4.5.3. ábra: Az órás átlag 40 ppb-s határérték-túllépés (ppb) szélirány függése K-pusztán, 1999–2003



4.5.4. ábra: Az óras átlag 60 ppb-s határérték-túllépés (ppb) szélirány függése K-pusztán, 1999–2003

A második ábrán (4.5.4. ábra) az óras átlagos 60 ppb-s határérték-túllépéseknél szintén elmosódott képet kapunk. Megjelenik egy keleti és észak-északnyugati kiugrás, de jelen van egy déli és nyugati áramlási hatás is. Azaz ezeknél a vizsgálatoknál sem lehet egyértelmű képet kapni arról, hogy melyek azok irányok, amik magas ózon-koncentrációt okoznak K-pusztán. Úgy tűnik, az ország több területéről, több városából érkeznek azok a szennyezőanyagok, amelyek hatással vannak a K-pusztai magas ózon-koncentráció kialakulására.

4.6. Trajektória analízis

Trajektóriának nevezzük azt a görbét, amelyet egy adott levegőelem a mozgása során leír. A trajektória vizsgálatokat a **HYSPLIT_4** modell segítségével végeztük el. Ezt a modellt az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légköri Kutatólaboratóriuma (NOAA ARL) fejlesztette ki és tette publikusan elérhetővé. A NOAA jóvoltából a modell és a hozzá tartozó adatbázisok ingyenesen elérhetők (<http://www.arl.noaa.gov/>). Ráadásul megfelelő átalakítás után más forrásból származó adatbázissal is képes elfutni a modell (pl. reanalízis adatok).

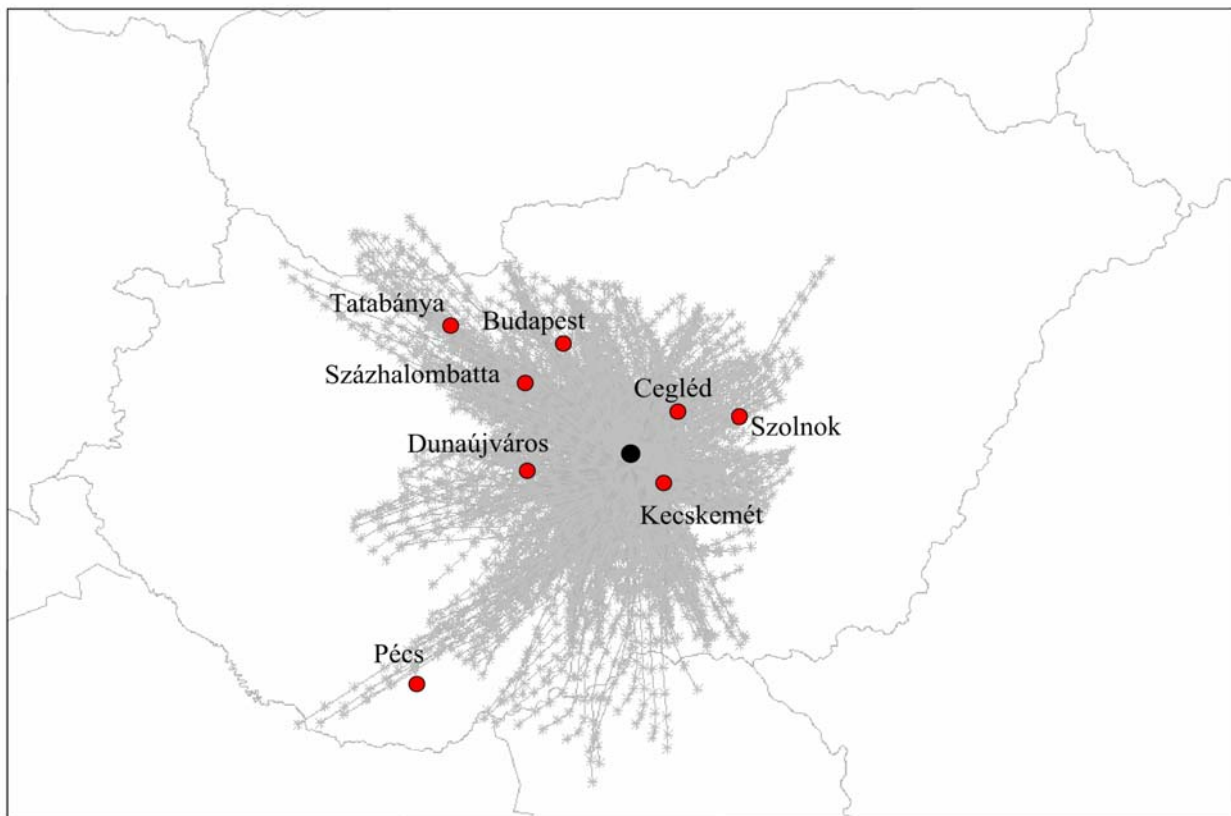
A **HYSPLIT** (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modell egy olyan komplett programrendszer, amely egyszerű trajektóriáktól kezdve akár szennyezőanyag terjedést és ülepedést is tud szimulálni. A modell rácson tárolt meteorológiai adatokat használ a három konform (szög- és iránytartó) vetület egyikéből (Polar, Lambert, Mercator).

Az FNL az NCEP GDAS modell futásából származó globális adatbázis. A NOAA ARL 1997-től tette elérhetővé az adatbázist, amely félhavi állományok formájában tölthető le külön az északi és külön a déli hemiszférára. Az adatbázis számunkra egyik legnagyobb előnye, hogy a HYSPLIT_4 konvertálás nélkül képes felhasználni. A publikus FNL adatbázis rácspontjainak távolsága 190,5 km, amit összevetve a gyakran használt, Interneten keresztül publikusan elérhető 2,5 fokos rácsfelbontású ERA40 (ECMWF 40 éves reanalízis) adatbázissal megállapíthatjuk, hogy az FNL a mi földrajzi helyünkön jobb felbontású. Ugyanis az ERA40 2,5 fokos felbontása a szélességi fokok mentén ~193 km-nek a hosszúsági fokok mentén pedig ~290 km-nek felel meg. Ez mindkét irányban rosszabb, mint az FNL felbontása.

Az FNL adatbázis időbeli felbontása 6 óra, tehát minden főterminusban (00, 06, 12, 18 UTC) vannak adatok. A vertikális felbontásban pedig a felszínre és az összes főizobárszintre (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 20 hPa) vannak adatok (Szabó, 2004).

A trajektória számításokhoz a HYSPLIT modell fejlesztői által közzétett FNL adatbázis mellett az ECMWF archív analízis és rövid távú előrejelzési adatbázist is felhasználtuk. Az általunk elérhető ECMWF adatbázis 37 hibrid nyomási szinten tartalmaz adatokat (3 dimenziós szélvektor, hőmérséklet, stb.), térbeli felbontása 0,5 fok, az időbeli felbontása pedig 3 óra. 0h és 12h (UTC) időpontokban analízis mezők állnak rendelkezésünkre, míg a köztes időszakot rövid távú előrejelzés mezőkkel töltjük ki. Az adatokat az ECMWF operatív előrejelzési modellje állítja elő, lekérdezésük a MARS adatbázisból történt (<http://www.ecmwf.int/services/archive/>) az Országos Meteorológiai Szolgálat segítségével (Szabó, 2006).

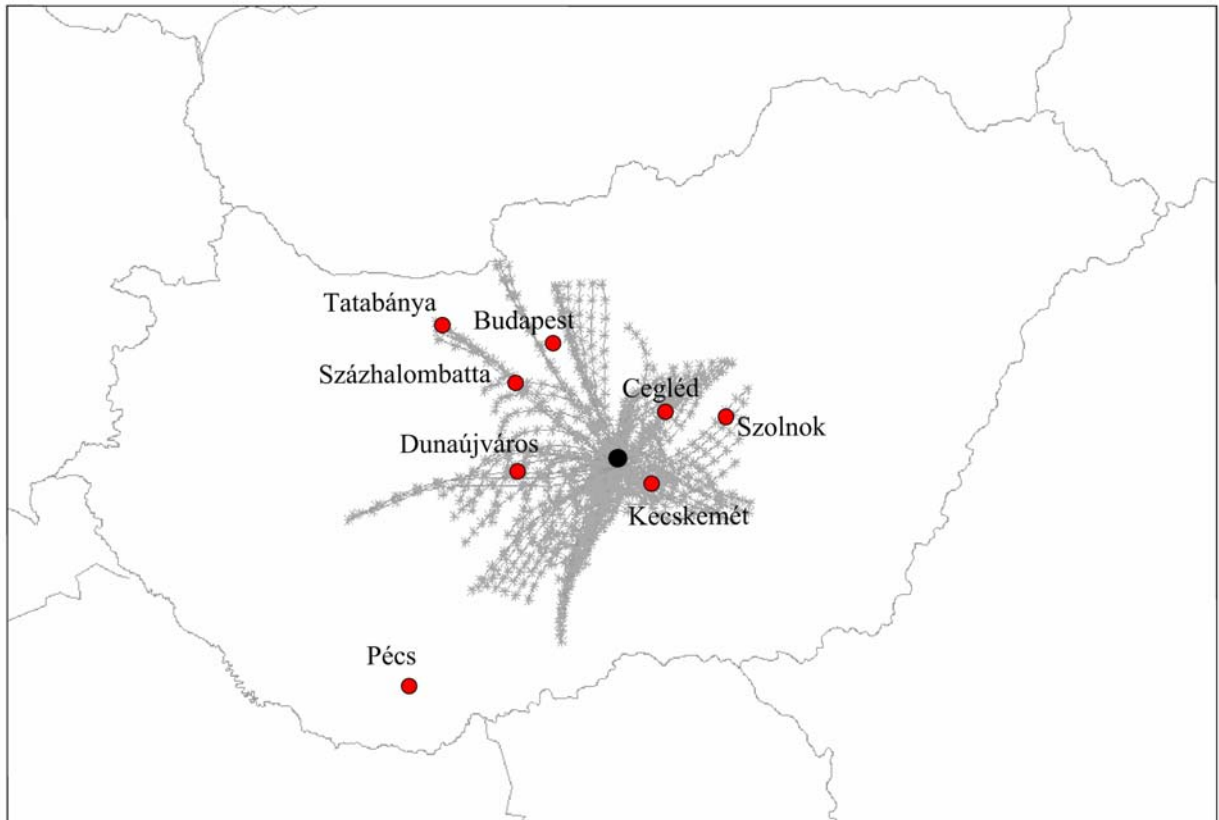
A dolgozatomban 12 órás backward (időben visszafele haladó) trajektória vizsgálatot végeztünk el 2003-ra, K-pusztára, azaz megvizsgáltuk, hogy 12 órával korábban honnan indultak a levegőelemek. Azért a 2003-as esztendőre esett a választásunk, mert ekkor magas volt az ózon-koncentráció, illetve erre az évre jobb felbontású szélmező állt rendelkezésünkre (0,5 fokos). Kiválogattuk a magas, 60 és 80 ppb feletti ózonértékeket és csak ezeket tüntettük fel egy-egy térképen. A 4.6.1. és 4.6.2. ábrák ezt a két térképet mutatják be, ahol a trajektóriákon „x”-ekkel jelöltük az órákat.



4.6.1. ábra: A 60 ppb-t meghaladó ózon-koncentráció értékek 12 órás backward trajektóriái 2003-ban, K-pusztán

A felszínközeli ózon koncentráció-maximuma rendszerint 14 és 16 óra között fordul elő. A minimum értékek reggel 7–8 óra körül. A téli hónapokban a másodlagos maximum kevésbé szignifikáns.

Az éjszakai órákban az NO_2 fotolízise szünetel, de az ózonmolekulák továbbra is – mint nappal – reakcióba lépnek az NO molekulákkal, amely NO_2 kialakulásához vezet, így az ózon-koncentráció alacsony értékre süllyed.

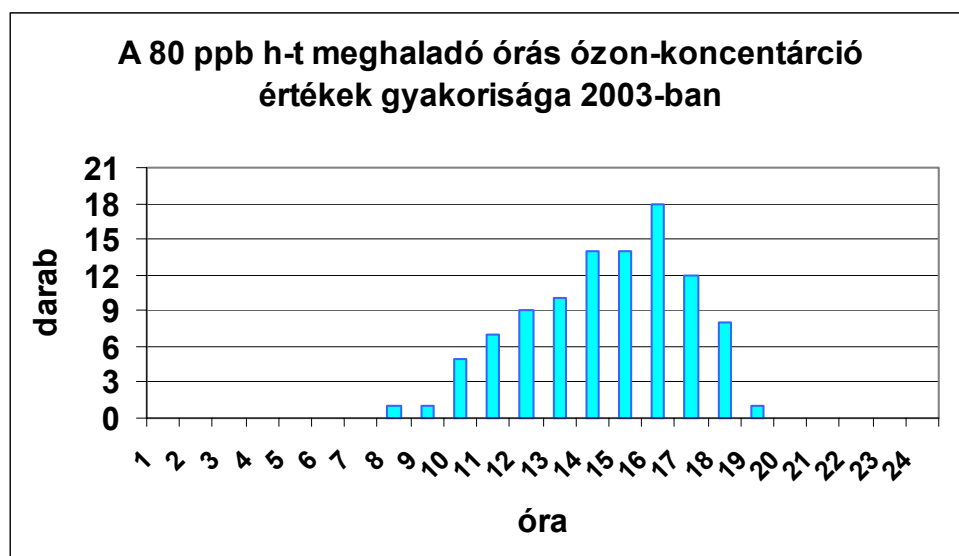


4.6.2. ábra: A 80 ppb-t meghaladó ózon-koncentráció értékek 12 órás backward trajektóriái 2003-ban, K-pusztán

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a városi területeken alacsonyabb ózon-koncentrációk fordulnak elő, mint a városon kívüliek. Ez a tény azért meglepő, mivel a városok nagy antropogén ózon-prekursor emisszióval rendelkeznek. E jelenség két hatásnak tulajdonítható:

1. A szélfelőli forrásokból nagy távolságról érkező ózon a városok fölé érve az ottani redukzív légkörrel reakcióba lép és ez gyors ózonsökkenést eredményez (Comrie, 1992; Chung, 1977; Angle and Sandhu, 1989).
2. A városok szennyezőanyag csóvájában a fotokémiai reakciók lejátszódásához bizonyos időre van szükség. Ennek következtében az ózonmaximum a forrásterületektől távol alakul ki (Chung, 1977; Comrie, 1992; Gladstone et al., 1991). A maximális értéket a városoktól 50–100 km távolságra a szélirányban a délutáni órákban figyelték meg. (Elsősorban nyáron, kedvező meteorológiai feltételek között, prekursorok jelenlétében.) Az ózon kialakulása viszonylag lassú, néhány órát igénylő folyamat. A városoktól távolabbi területeken ózonmaximumok kialakulását elősegíti az is, hogy a vidéki területeken ózonfogyást gyorsító elsődleges szennyezőanyagok (pl. NO) emissziója a városi kibocsátás mértékéhez képest kicsi.

A trajektória ábrák segítségével megállapíthatjuk, hogy a magas ózon-koncentráció *elsődleges forrása nem csak a főváros, Budapest, hanem más nagyobb városok is, mint Cegléd, Szolnok, Kecskemét, Pécs, Dunaújváros, Százhalombatta és Tatabánya.* A települések mindegyike vagy valamilyen autót út vagy autópálya mellett fekszik, vagy jelentős iparral rendelkezik. Mindkét esetben számottevő ózon-prekursor kibocsátás valószínűsíthető. A mi esetünkben a 12 órával korábban induló szennyezett légtömegben átkeveredés és reakciók zajlanak le, és általában a délutáni órákra éri el K-pusztát (4.6.3. ábra), ahol magas ózon-koncentrációt okoz elsősorban a nyári időszakban.



4.6.3. ábra: A 80 ppb-t meghaladó óras ózon-koncentráció értékek előfordulása 2003-ban K-pusztán

A 4.6.3. ábrán jól látható, hogy 14 és 18 óra között fordultak elő legtöbbször (akár 18-szor is) a 80 ppb-t meghaladó ózonértékek.

A trajektória vizsgálatok eredményeként leszögezhetjük, hogy a K-pusztai magas ózon-koncentrációt nem csak a budapesti szennyezőanyag csóva okozza, hanem más, K-pusztta tágabb környékén található városok ózon prekursorai is döntően befolyásolják. Megállapíthatjuk tehát, hogy a K-pusztai regionális háttérlevegőszennyezettség-mérő állomásnak tekinthető, mert közvetlen szennyezés nem éri (nem városi) és semmilyen irányból sem éri kitüntetett mértékű szennyezés.

5. Összefoglalás

Az ózon másodlagos szennyezőanyag, mivel közvetlenül nem kerül a légkörbe, hanem különböző légköri nyomanyagok fotokémiai reakciói során keletkezik. Az ipari forradalom óta (1800-as évek vége) az ózon-koncentráció folyamatosan emelkedik. Magasabb koncentrációban súlyosan roncsolja a szerves anyagokat, az élővilágot, illetve a művi környezetet. A koncentráció csökkentését csak nemzetközi egyezményekkel lehet elérni, amelyeket elsősorban az ózonképző *előanyagokra* kell meghozni. A bevezetett nemzetközi intézkedések ellenére az ózon-koncentrációban általános csökkenés nem tapasztalható, illetve a megfigyelt trendek ellentmondásosak.

Kutatásom során a Magyarországon található négy ózon-koncentrációt mérő állomás közül a K-pusztai EMEP/GAW állomás mérési adatait elemeztem. Innen származik a leghosszabb, korszerű mérési módszerrel végzett hazai ózon-koncentráció adatsor (1990–2005), ami a nemzetközi előírásoknak megfelelő minőségbiztosításon és minőségellenőrzésen megy keresztül. A K-pusztai adatsort 1997-ig már feldolgozták és elemezték (*Ferenczi és Haszpra, 1998*), de az újabb adatok kiértékelése még nem történt meg. Az új eredmények szakkikk(ek) formájában tájékoztathatja a szakterületen dolgozókat. A mezőgazdaságot pedig a károk mértéke érdekelheti.

A K-pusztai ózonmérő állomás 16 éves adatsora alapján megvizsgáltam az órás, napi és havi átlagértékek, a maximumok, minimumok és különböző percentilis értékek, továbbá a napi és évi koncentráció-menet amplitúdójának alakulását. Az adatokat összevettem a Magyarországon, illetve az Európai Unióban hatályban lévő egészségügyi és ökológiai határértékekkel. Ezek után a Péczely-féle makroszinoptikus kategóriák segítségével megvizsgáltam, hogy melyek azok a jellemző időjárási helyzetek, amelyek magas ózon-koncentrációt idézhetnek elő K-pusztán.

Az eddigi eredmények azt mutatják, hogy a nemzetközi megszorító intézkedések ellenére nem történt jelentős változás az ózonkoncentráció trendjében. A mérőhelyen még mindig változatlanul magas értékeket regisztrálnak, és a határérték túllépések is igen gyakoriak. Az adatok érdemi tendenciát nem mutatnak. Vizsgálataim alapján magas ózon-koncentráció, illetve határérték túllépések elsősorban anticiklonális időjárási helyzetekben fordulnak elő, amikor egy magas nyomású képződmény a Kárpát-medence felett helyezkedik el, illetve keletről vagy nyugatról nyomul be.

Végül megnéztem az ózon-koncentráció és szélirány korrelációját, illetve trajektória vizsgálatokat végeztem el a HYSPLIT_4 modell segítségével. Fontos eredményekre és

következtetésekre jutottam, amivel eddig még nem találkoztam kutatási munkám során. Megállapítottam, hogy a K-pusztai magas ózon-koncentrációért nem elsősorban a budapesti szennyezőanyag csóva a felelős, hanem más nagyobb városok kibocsátása is nagymértékben hozzájárul.

A további kutatási terveim között szerepel, hogy a többi ózommérő állomást is bevonjunk vizsgálatainkba.

Köszönetet mondok *dr. Haszpra Lászlónak* a mérési adatokért, konzulensi munkájáért, segítőkészségéért és támogatásáért, *dr. Mészáros Róbertnek* a konzulensi munkájáért és kitartó támogatásáért, illetve *Lagzi István Lászlónak, Breuer Hajnalkának, Kern Anikónak* és *Szabó Tamásnak* az adatfeldolgozásban nyújtott segítségükért.

Irodalomjegyzék:

- Ádám, R., Tarjányi, K. és Tóth, K., 2006: A Schönbein-módszerrel mért budapesti történeti ózon adatok feldolgozása. (OFKD dolgozat)
- Angle R. P. and Sandhu H. S., 1989: Urban and rural ozone concentration in Alberta, Canada. *Atmospheric Environment* Vol. 23, No. 1, 215–221.
- Bozó, L., Weidinger, T., 1995: Tropospheric ozone measurements over Hungary in the 19th century. *Ambio* 23 (2), 129–130.
- Brühl, C. and Crutzen, P. J., 1988: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentration due to man's activities, estimated by a one dimensional coupled photochemical climate model. *Climate Dynamics* 2, 173–203.
- Chung Y. S., 1977: Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. *Journal of Applied Meteorology* Vol. 16, No. 11, 1127–1136.
- Comrie A. C. and Yarnal B., 1992: Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania. *Atmospheric Environment* Vol. 26B, No. 3, 301–312.
- Crutzen, P. J., 1974: Photochemical reactions by and influencing ozone in the troposphere. *Tellus* 26, 47–57.
- Danielsen, E. F., 1968: Stratosphere-troposphere exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *Journal of Atmospheric Science* 25, 502–518.
- Danielsen, E. F., Mohnen, V., 1977: Project duststorm: ozone transport in situ measurements, and meteorological analysis of troposphere folding. *Journal of Geophysics Res.* 82, 5867–5877.
- Dibb, J. E., Talbot, R. W., Scheuer, E., Seid, G., DeBell, L., Lefer, B., Ridley, B., 2003: Stratospheric influence on the northern North American free troposphere during TOPSE. *Journal of Geophysical Res.* 108 (D4), TOP 11–1–TOP 11–8.
- Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air. *Official Journal of the European Communities.* L 67/14
- Divéky, E., 2003: Ózommérés Szegeden a XIX. században. *Légekör* 2003/4, 30–35.
- Ferenczi, Z., Haszpra, L., 1998: A troposzférikus ózon koncentrációjának alakulása Magyarországon. *Légekör* 1998/1, 23–28.

- Gladstone K. P., Niki H., Shepson P. B., Bottenheim J. W., Schiff H. I., Sandhu H. S., 1991: Photochemical oxidant concentrations in two Canadian prairie cities: model evaluation. *Atmospheric Environment* Vol. 25B, No. 2, 243–254.
- Götz, F. W. P., Meetham, A. R. and Dobson, G M. B., 1934: The vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Proc. Royal Soc. A* 145, 416–446.
- Guicherit, R., Roemer, M., 2000: Tropospheric ozone trends. *Chemosphere–Global Change Science* 2, 167–183.
- Haszpra, L., 1993: Munkaértekezés a troposzférikus ózon kutatásáról. *Légekör* 1993/2, 30–33.
- Haszpra, L., 1994: Jelentés az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság és az Országos Meteorológiai Szolgálat Légekörfizikai Intézet között létrejött MEC–92–0007 számú szerződés teljesítéséről
- Hough, A.M., Derwent, R.G., 1990: Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature* 344, 645–648.
- Jacobson, M. Z., 2002: *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*. Cambridge University Press, Cambridge
- Légekör, XLVII. évfolyam, 2002. 2. szám, 41. oldal
- Légekör, XLVII. évfolyam, 2002. 3. szám, 40. oldal
- Légekör, XLVII. évfolyam, 2002. 4. szám, 39. oldal
- Légekör, XLVIII. évfolyam, 2003. 1. szám, 40. oldal
- Légekör, XLVIII. évfolyam, 2003. 2. szám, 44. oldal
- Légekör, XLVIII. évfolyam, 2003. 3. szám, 38–40. oldal
- Légekör, XLVIII. évfolyam, 2003. 4. szám, 40. oldal
- Légekör, XLIX. évfolyam, 2004. 1. szám, 41. oldal
- Légekör, XLIX. évfolyam, 2004. 2. szám, 40. oldal
- Légekör, XLIX. évfolyam, 2004. 3. szám, 41. oldal
- Légekör, XLIX. évfolyam, 2004. 4. szám, 39. oldal
- Légekör, 50. évfolyam, 2005. 1. szám, 40. oldal
- Légekör, 50. évfolyam, 2005. 2. szám, 40. oldal
- Légekör, 50. évfolyam, 2005. 3. szám, 40. oldal
- Légekör, 50. évfolyam, 2005. 4. szám, 39. oldal
- Logan, J.A., 1985: Tropospheric ozone: seasonal behavior, trends and anthropogenic influence. *Journal of Geophysical Research* 90 (10), 463–482.
- Logan, J.A., 1994: Trends in the vertical distribution of ozone: an analysis of ozonesonde data. *Journal of Geophysical Research* 99, 25553–25585.

- Logan, J.A., 1999: An analysis of ozonesonde data for the troposphere: recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research* 104, 16115–16149.
- Mahlman, J. D., Moxim, W. J., 1978: Tracer simulation using a global general circulation model: results from a midlatitude instantaneous experiment. *Journal of Atmospheric Science* 35, 1340–1374.
- Mészáros E., 1991: A légköri ózon kutatásának története és jelentősége. *Időjárás* 95, 69-76.
- Mészáros, E., 1997: *Levegőkémia*. Veszprémi Egyetem Kiadó.
- Monks, P.S., 2000: A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment* 34, 3545–3561.
- Musselman, R. C., Lefohn, A. S., Massman, W. J., Heath, R. L., 2006: A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment* (in press).
- Oltmans, S.J., Lefohn, A.S., Scheel, H.E., Harris, J.M., Levy, H., Galbally, I.E., Brunke, E.G., Meyer, C.P., Lathrop, J.A., Johnson, B.J., Shadwick, D.S., Cuevas, E., Schmidlin, F.J., Tarasick, D.W., Claude, H., Kerr, J.B., Uchino, O., Mohnen, V., 1998: Trends of ozone in the troposphere. *Geophysical Research Letters* 25, 139–142.
- Országos Meteorológiai Szolgálat, 1998: A légköri háttérszennyezettség Magyarországon.
- Péczely, Gy., 1983: Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa (1881–1983)., ISSN 0133–3186; 53.
- Sándor, V., Ferenczi, Z., Haszpra, L., 1997: Relation of the regional scale circulation pattern and the ozone concentration in the surface layer over Hungary. *Meteorol. Zeitschrift* 6, 12–20.
- Scheel, H. E., Ancellet, G., Areskoug, H., Beck, J., Bösenberg, J., De Muer, D., Dutot, A. L., Egelov, A. H., Esser, P., Etienne, A., Ferenczi, Z., Geiß, H., Grabbe, G., Granby, K., Gomiseck, B., Haszpra, L., Kezele, N., Klasinc, L., Laurila, T., Lindskog, A., Mowrer, J., Nielsen, T., Perros, P., Roemer, M., Schmitt, R., Simmonds, P., Sladkovic, R., Smit, H., Solberg, S., Toupance, G., Varotsos, C. and de Waal, L., 1997: Spatial and temporal variability of tropospheric ozone over Europe. In: *Transport and Chemical Transformation of Pollutants in the Troposphere, Volume 6, Tropospheric Ozone Research* (ed.: Øystein Hov). Springer, Berlin-Heidelberg-New York-Barcelona-Budapest-Hong Kong-London-Milan-Paris-Santa Clara-Singapore-Tokyo. 35-64.
- Szabó, T., 2004: A HISPLIT_4 trajektória-modell adaptálása és alkalmazása (Tudományos Diákköri Dolgozat)

Szabó, T., 2006: A szén-dioxid koncentráció változékonyságának vizsgálata toronymérés adatai alapján (OFKD dolgozat)

Vingarzan, R., 2004: A review of surface ozone background levels and trends. Atmospheric Environment 38, 3431–3442.

Warneck, P., 1988: Chemistry of the Natural Atmosphere. Academic Press, San Diego.

Wayne, R. P., 1994: Chemistry of Atmospheres. Clarendon Press, Oxford.

Weboldalak:

<http://www.arl.noaa.gov/>

<http://www.ecmwf.int/services/archive/>

<http://www.emep.int/>

<http://gaw.kishou.go.jp/>

<http://www.tiszta.levego.hu/>

MELLÉKLETEK

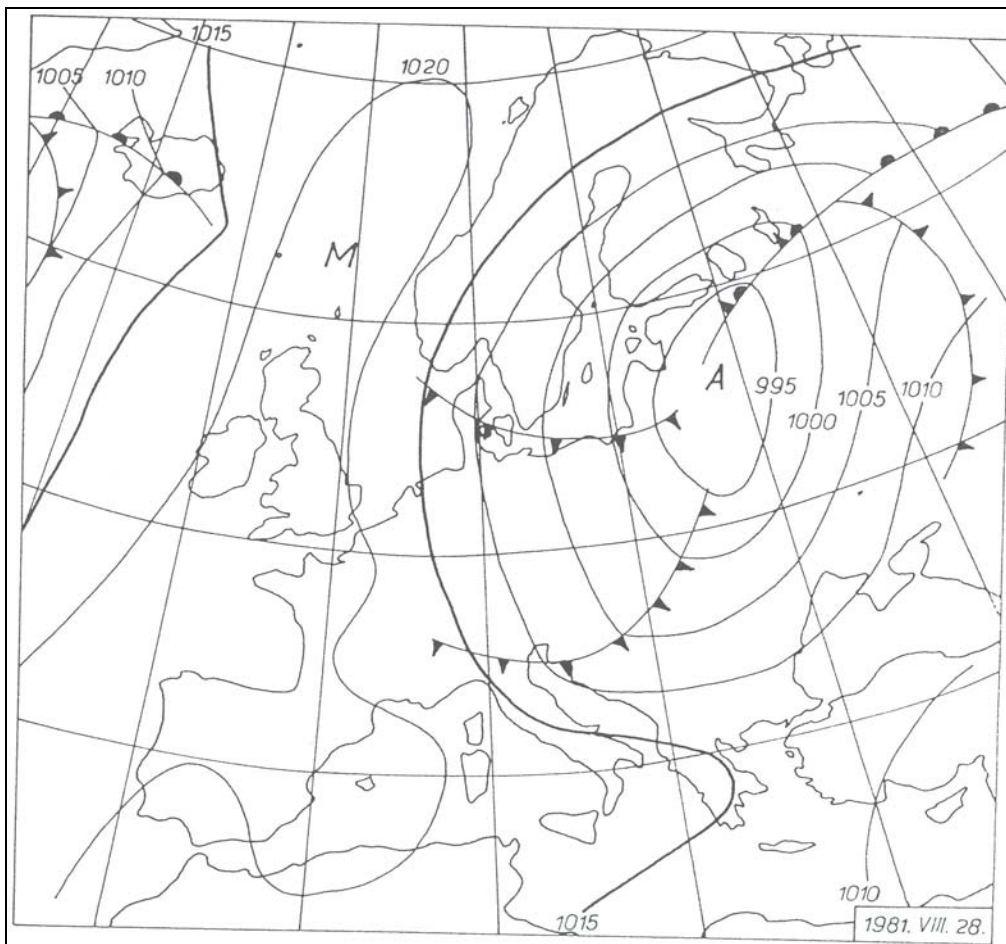
PÉCZELY-FÉLE MAKROSZINOPTIKUS HELYZETEK

(forrás: Péczely,1983)

1. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

mCc – ciklon hátoldali áramrendszere

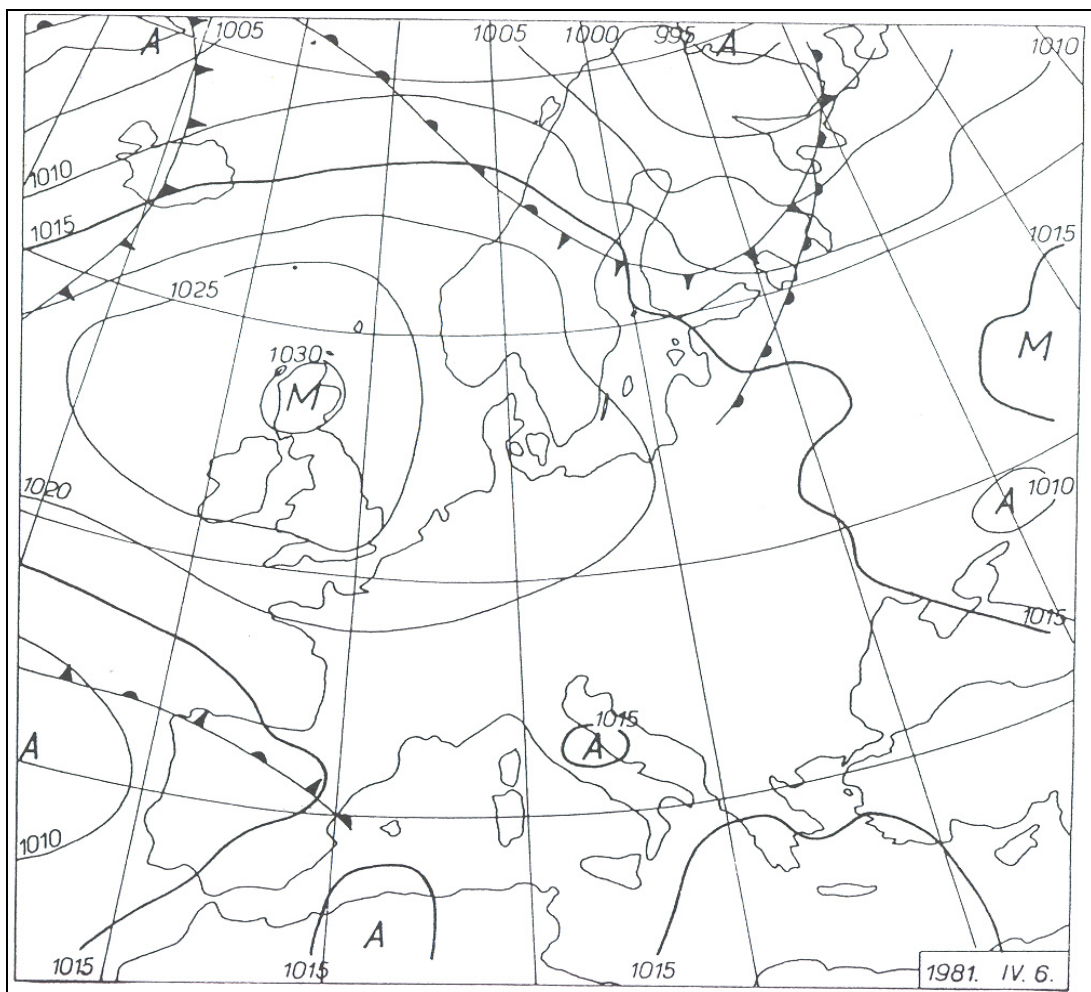
Magyarország a tőle kelet-északkeletre, a Baltikum vagy Ukrajna fölött tartózkodó ciklon hátoldali, hidegfronti áramrendszerébe esik. A helyzet változékony, szeles, csapadékos időjárást okoz a Kárpát-medencében. Nyáron hidegfront nélküli változata is kialakulhat olyankor, amikor Délkelet-Európa fölé kiterjeszkedik a DNY-ázsiai termikus depressziós terület, ám ilyenkor a bárikus gradiens jóval kisebb, az időjárás kedvez a helyi zárporok, zivatarok kialakulásának.



2. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

AB – anticiklon a Brit-szigetek térségében

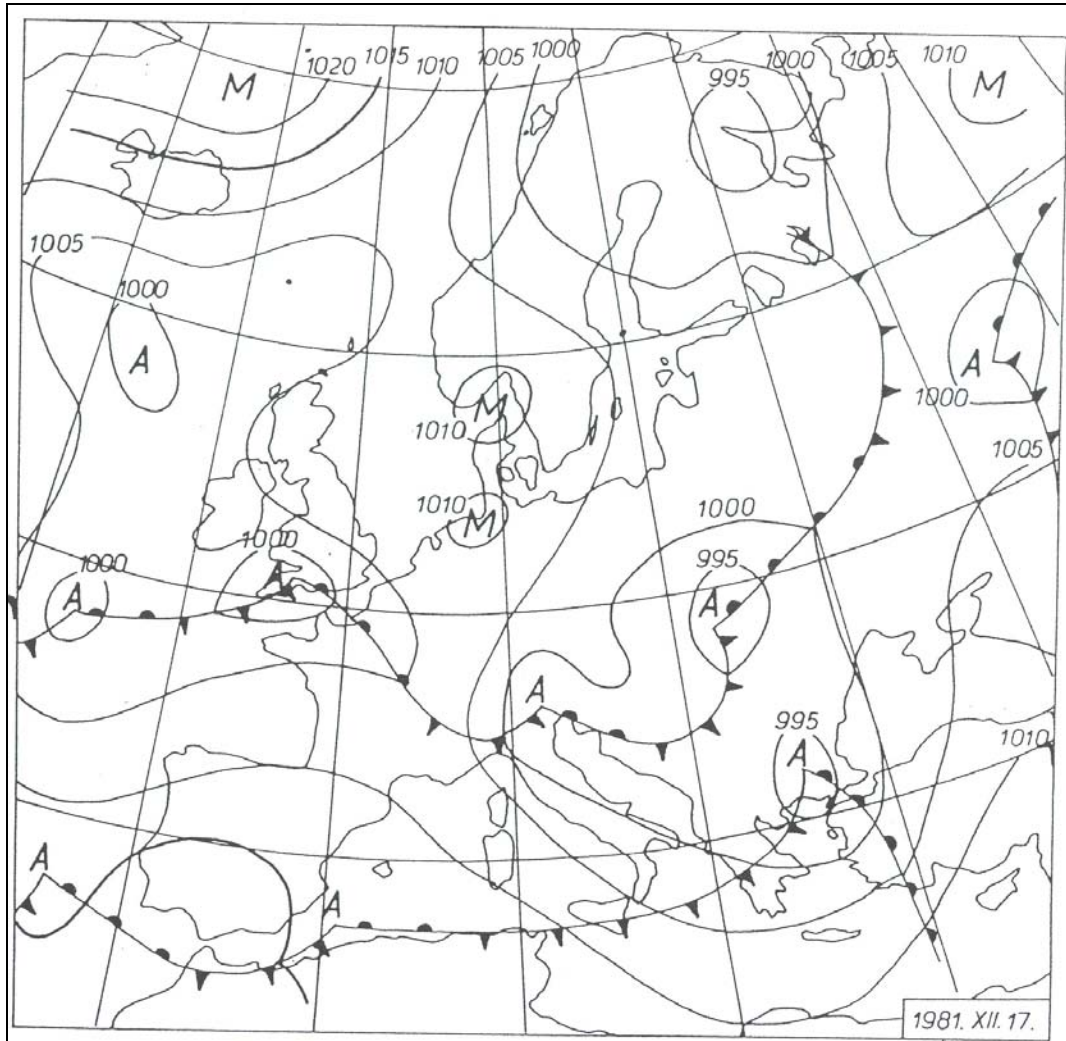
Részint az azóri anticiklon északra helyeződése, részint a sarki-medencéből délre hatolt anticiklon miatt magasnyomású terület alakul ki a Brit-szigetek vagy az Északi-tenger fölött. Megjelenése Magyarországon hidegfronti áramlást idéz elő térségünkben. A helyzet nyári stabilizálódása estén Közép-Európa fölött jóval kisebb a bárikus gradiens, ilyenkor száraz, derült, tartósan meleg időjárást okoz hazánkban.



3. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

CMc – mediterrán ciklon hátoldali áramrendszere

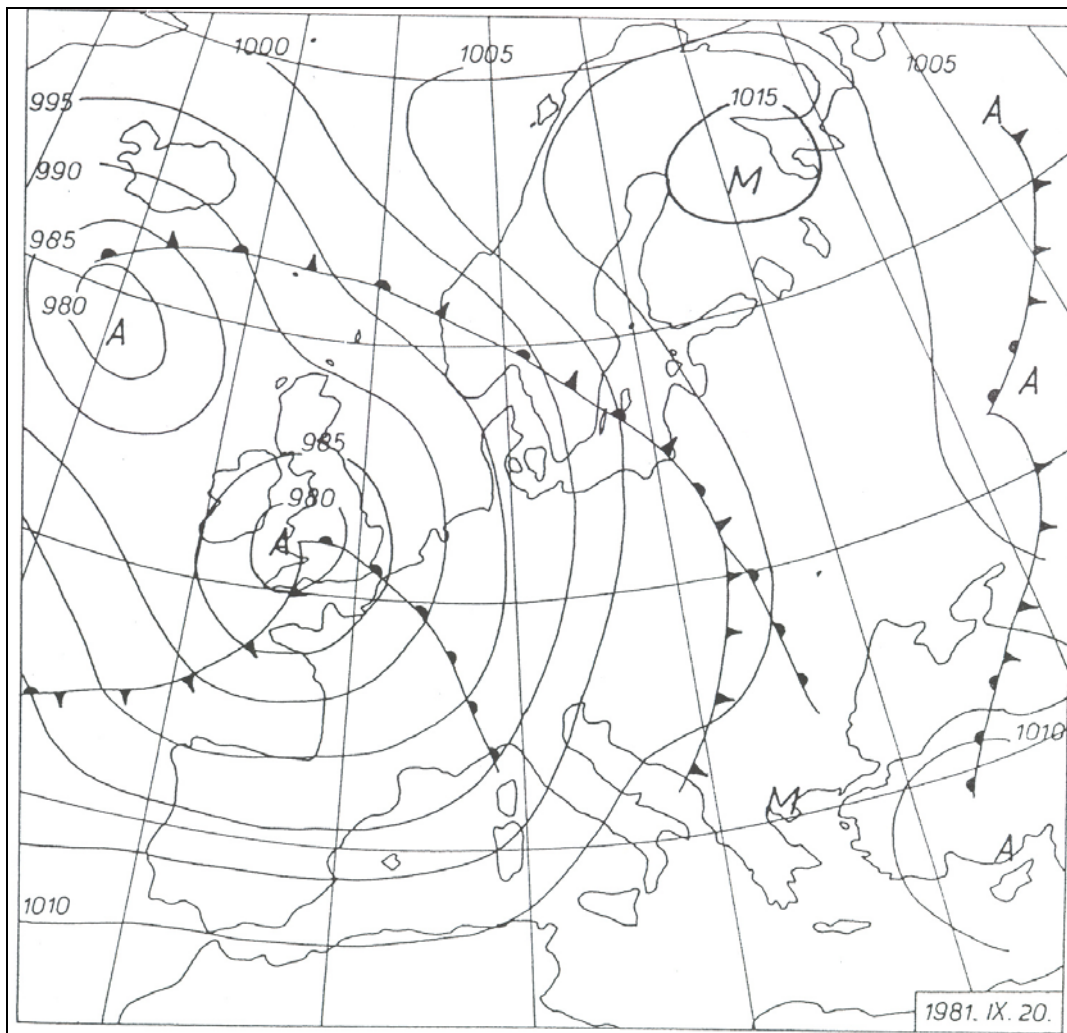
A helyzet olyan módon jön létre, hogy egy mediterrán ciklon a Balkán-félsziget és a Fekete-tenger térsége felé mozdul el, s hazánk e ciklon hátoldali hidegfronti áramrendszerébe kerül. A légáramlás iránya Magyarország fölött északi-északkeleti, sebessége főként a Dunántúlon eléri a viharos fokozatot.



4. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

mCw – ciklon előoldali áramrendszere

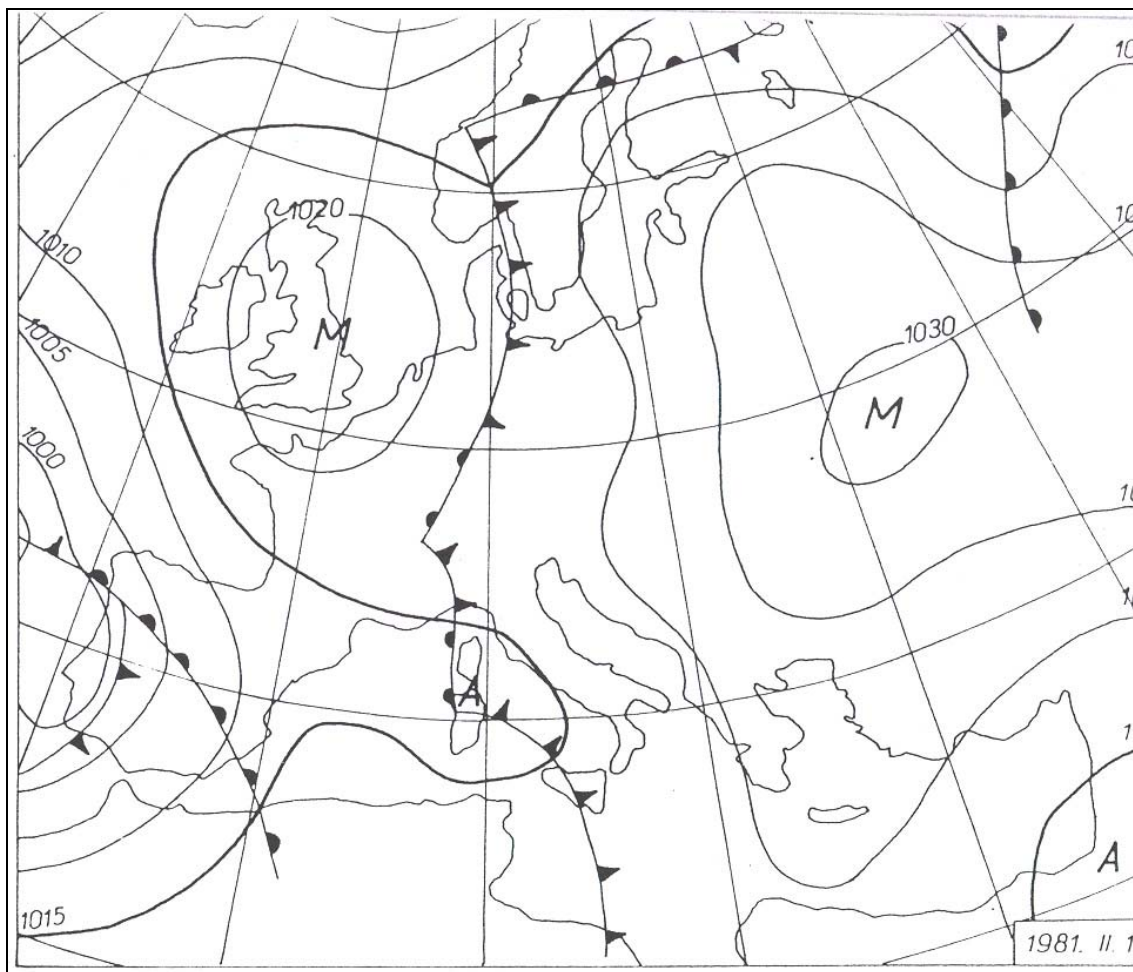
A Magyarország fölött áramlást középpontjával ÉNy-Ny Európa térségében elhelyezkedő ciklon irányítja. Hazánk területe a ciklon melegfrontjának hatása alatt áll, vagy annak melegszektorába esik.



5. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

Ae – anticiklon Magyarországtól keletre

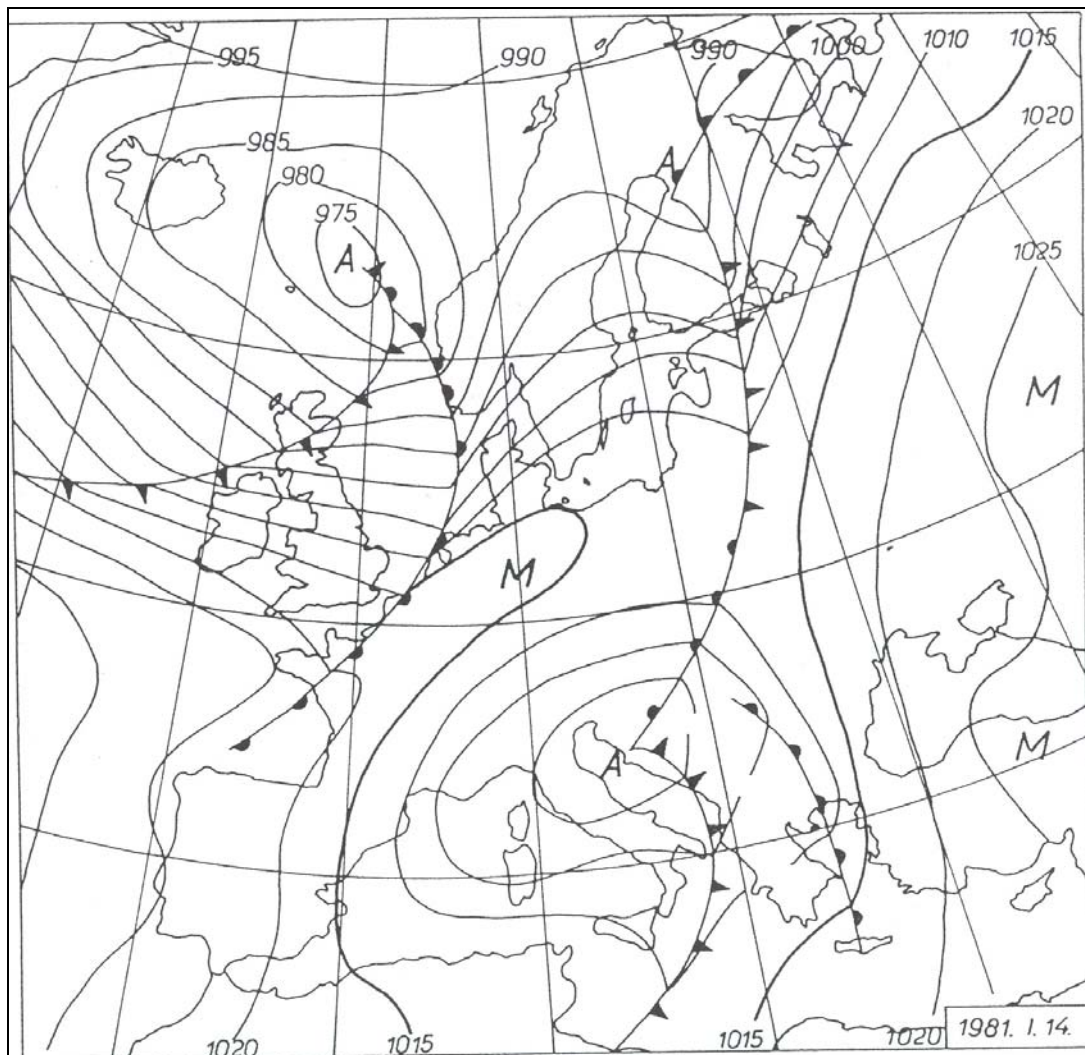
A tőlünk keletre, központjával Ukrajna fölött elhelyezkedő anticiklon déli-délkeleti áramlása érvényesül. Az időjárási frontok csapadékszónái hazánktól nyugatra esnek. A helyzet fennállásakor nyáron meleg, száraz, derült időjárás, télen gyakori köd és zúzmaraképződés jellemző. A hideg évszakban a Kelet-Kárpátok vonulata módosítja az izobárok futását és az anticiklon talajközeli hideg légtömegei a Déli-Kárpátokat megkerülve áramlanak be a medencébe (Kossava-helyzet).



6. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

CMw – mediterrán ciklon előoldali áramrendszere

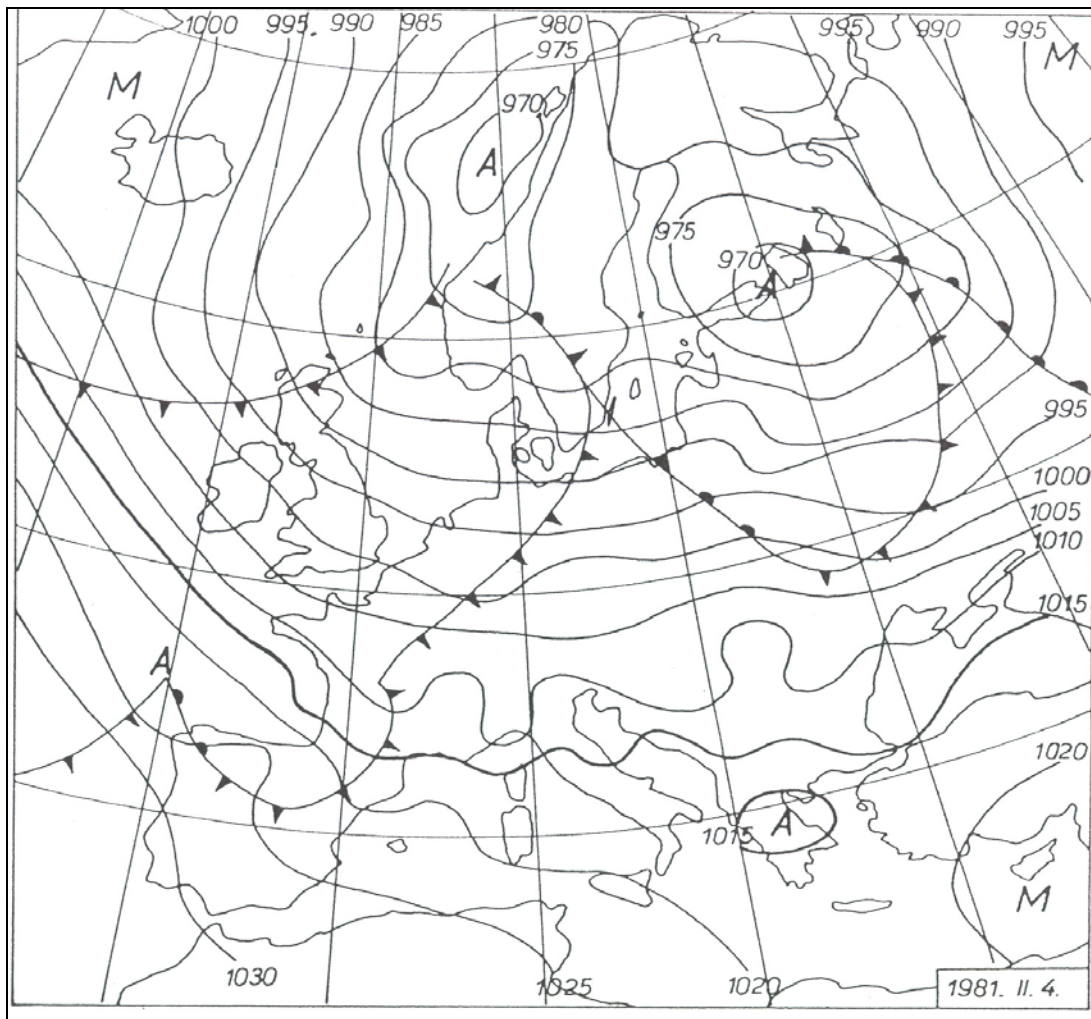
A Magyarország fölötti áramlás meghatározója a Földközi-tenger középső részei fölött képződött és az Adriai térségébe áthelyeződött ciklon. A ciklon melegfrontja áthalad hazánk területe fölött, az őszi és téli hónapokban kiadós esőzéseket, havazásokat okoz.



7. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

zC – zonális ciklonális

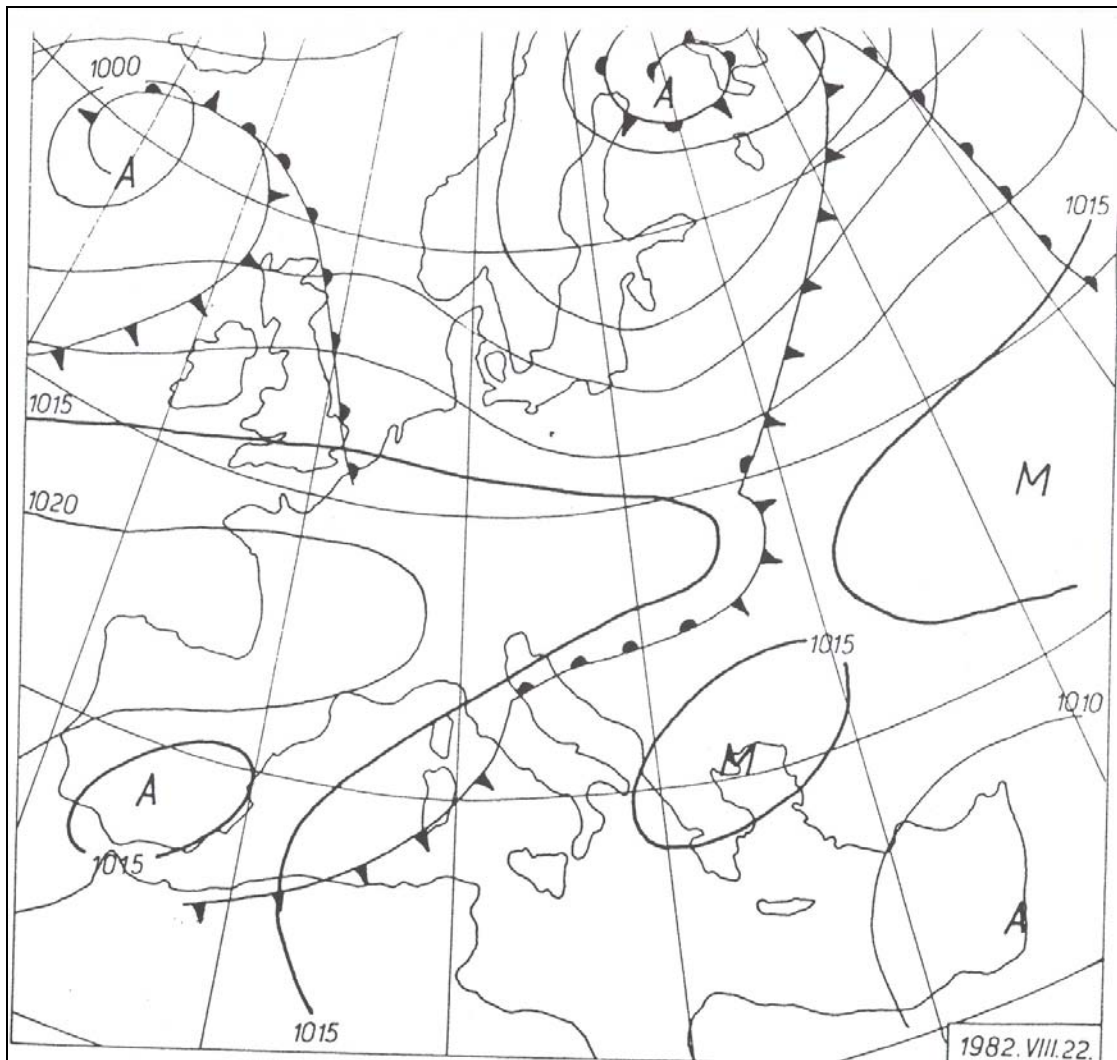
Fennállásakor a frontálzóna európai szakasza az 50° szélességi kör közelében húzódik, az áramlás Ny-K-i irányú. Észak-Európát gyors vonulású ciklonok érintik, frontrendszerük áthaladnak Magyarország területén. Szeles, változékony időjárás jellemzi.



8. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

Aw – nyugatról benyúló anticiklon

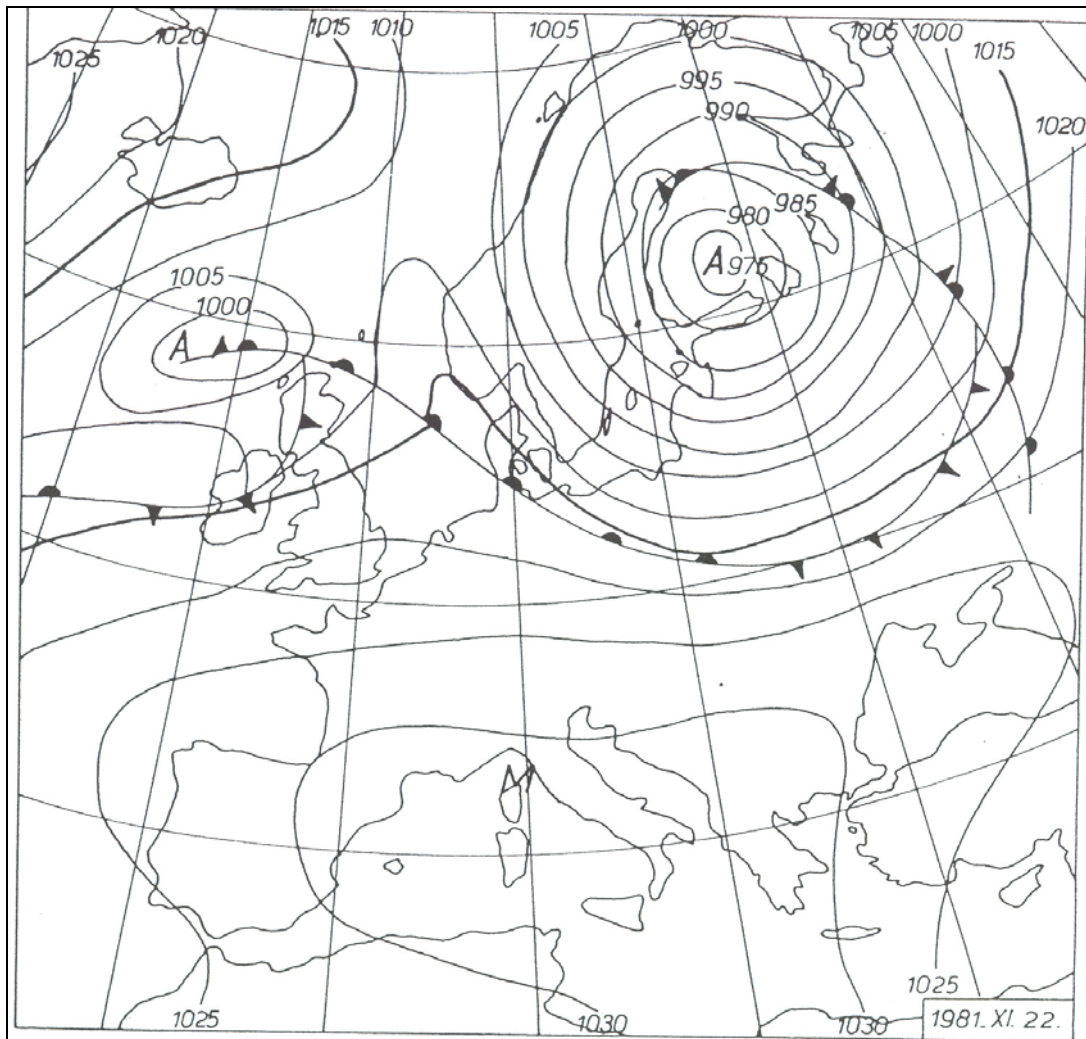
Olyan módon jön létre, hogy az azori anticiklon északabbra húzódásakor (elsősorban nyáron) annak nyúlványa egészen Közép-Európa térségéig hatol előre. Megjelenése általában hidegfront átvonulásával kapcsolatos, élénk észak-nyugatias áramlást eredményez a Kárpát-medence térségében.



9. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

As – anticiklon Magyarországtól délre

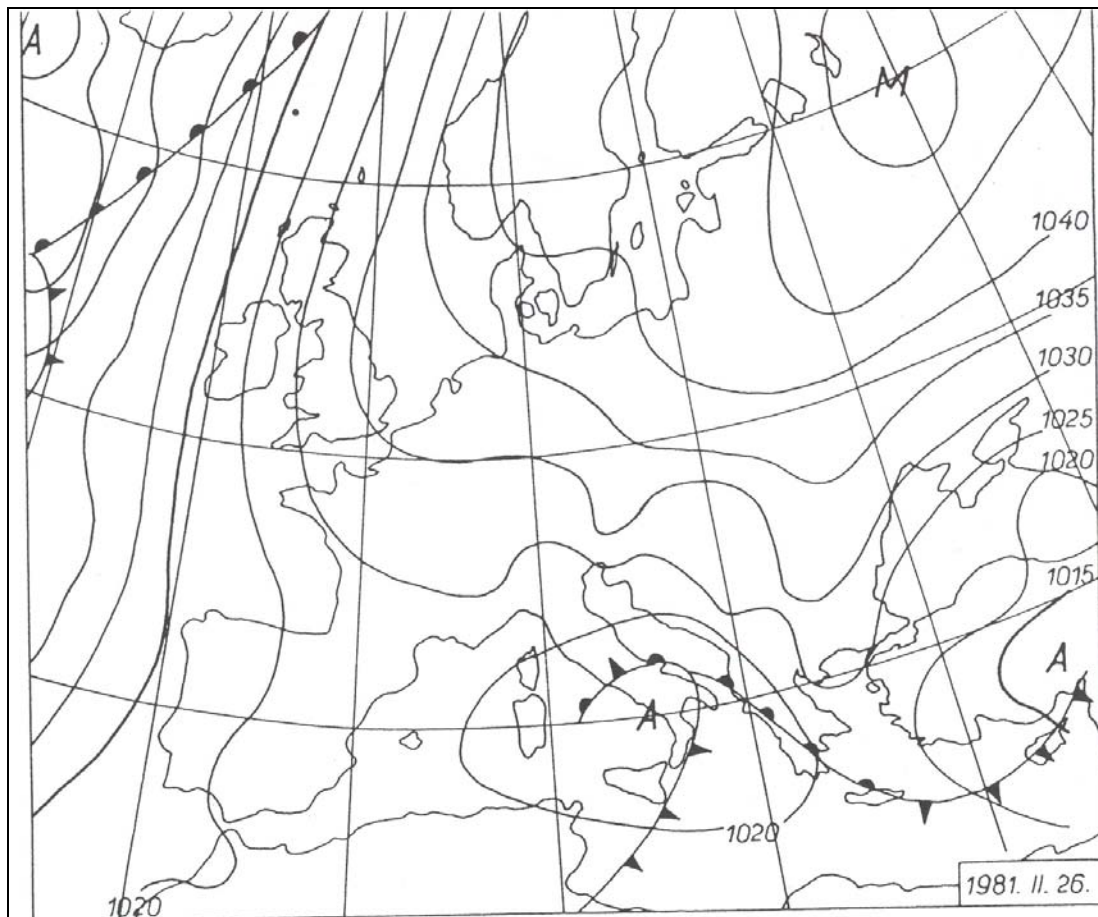
A Földközi-tenger medencéje fölött anticiklon helyezkedik el, a Kárpát-medence ennek északi pereméhez tartozik. A frontálzóna európai szakasza a 60° szélességi kör táján húzódik. Az áramlás Ny–K-i irányú, a ciklonok északabbi pályán mozognak, frontrendszerük Magyarországot nem érintik.



10. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

An – anticiklon Magyarországtól északra

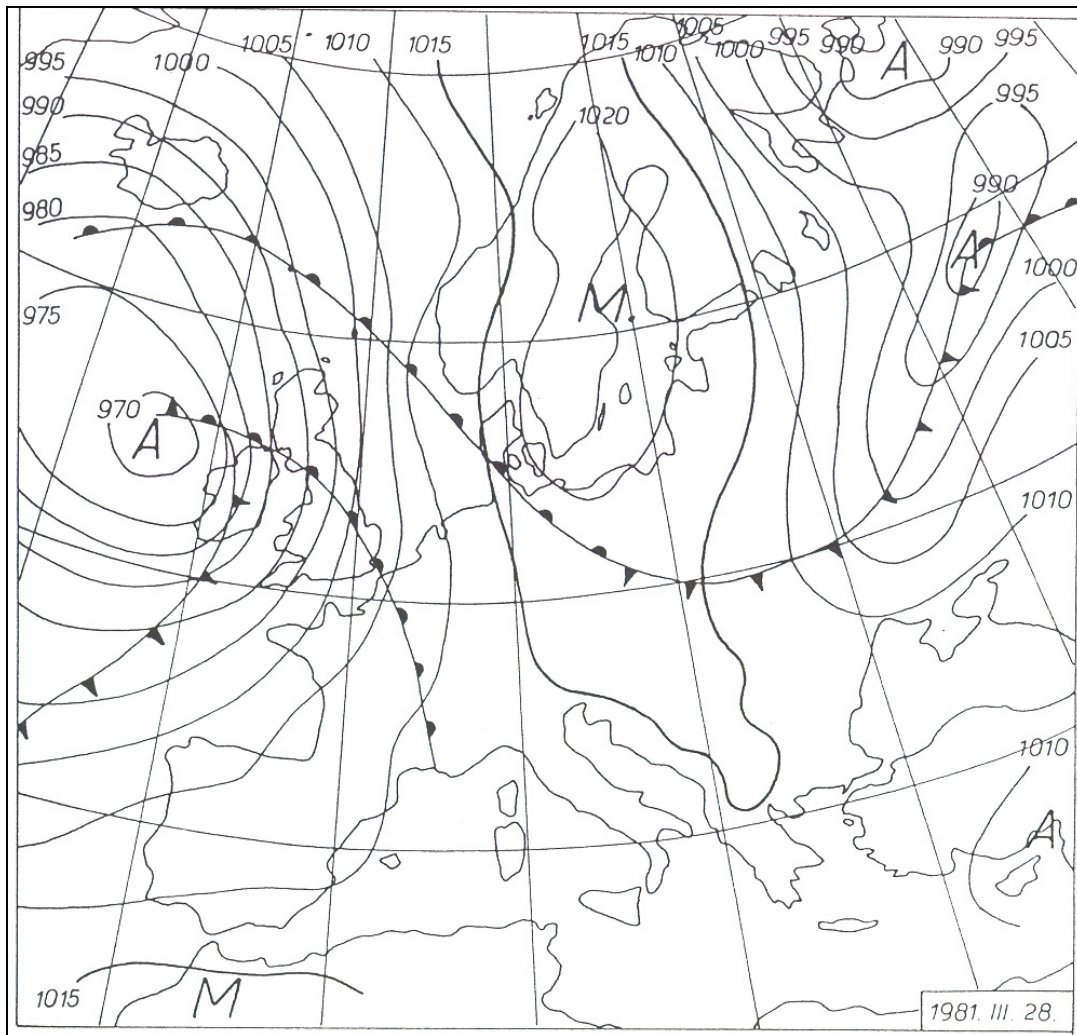
Hazánktól északra, központjával a Baltikum vagy Lengyelország fölött anticiklon helyezkedik el, amely télen magasnyomású gerinc képezve a Brit-szigetektől egészen Kelet-Európaig terjed. A hideg évszakban gyakran megfigyelhető, hogy a Kárpátok vonulata módosítja az anticiklon talajközeli hideg légtömegeinek áramlását, s azok részint a Kárpátok és Alpok között, részint az Északkeleti-Kárpátok alacsonyabb gerincén át jutnak be a Kárpát-medence területére. Emiatt jellegzetes, ún. körülölelő izobárok alakulnak ki a Kárpátok mentén, s a kétoldali hidegbetörés miatt a medence esetenként orografikus okklúziós front képződik. A helyzet kialakulása általában Földközi-tenger fölötti ciklontevékenységgel kapcsolódik, elsősorban a téli hónapokban.



11. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

AF – anticiklon Fennoskandinávia térségében

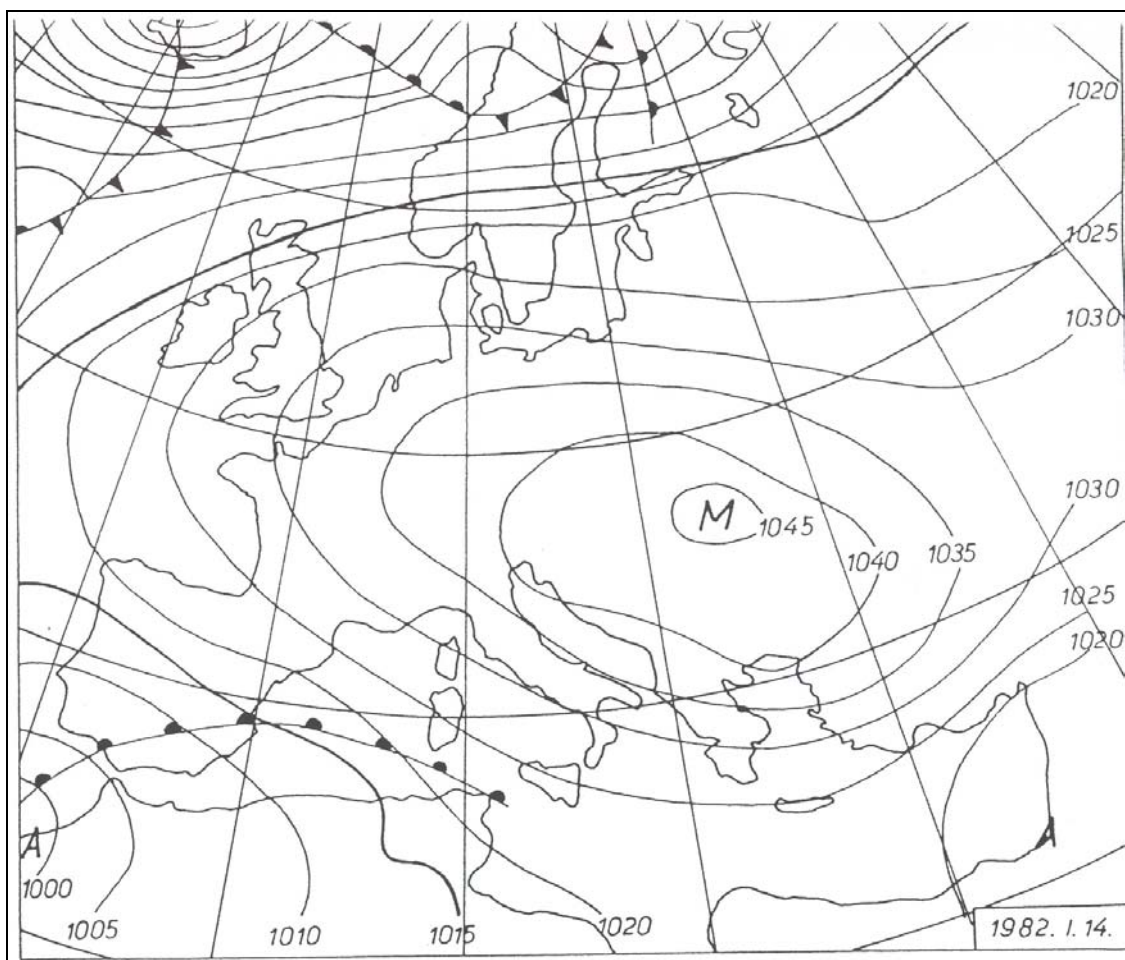
Az anticiklon, mely hazánk légáramlását irányítja, Fennoskandinávia térségében tartózkodik, jellegzetes hossz tengelyének ÉK-DNy-i iránya. A Földközi-tenger fölött ciklonképződés figyelhető meg. Magyarországon észak-északkeleti légáramlást idéz elő, erős téli lehűléseink jórészt ehhez a makroszinoptikus helyzethez kapcsolódik.



12. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

A – anticiklon a Kárpát-medence fölött

Mindazokat az anticiklonális helyzeteket ide soroljuk, amikor az anticiklon középponti része a Kárpát-medence területére esik. Ezek lehetnek ciklon rendszereket elválasztó gyors mozgású ún. köztes anticiklonok, az esetek nagyobb részében azonban hosszabb ideig tartózkodnak a Kárpát-medence fölött. Tartózkodási idejüket télen meghosszabbítja a medence alján megrekedő hideg légtömeg (hideg légpárna) kialakulása. Tartós fennállása zavartalan sugárzási időjárást biztosít, télen erős lehűléssel, jelentős hőmérsékleti inverziókkal, nyáron nagy melegekkel.



13. MAKROSZINOPTIKUS HELYZET

C – cikloncentrum a Kárpát-medence fölött

A ciklon centruma a Kárpát-medencében helyezkedik el. Az esetek nagyobb részében átvonuló mediterrán ciklon képezi, de előfordulhat az is, hogy a ciklon egy veszteglővé vált front mentén helyi orografikus okokból itt keletkezik. Fennállásakor éles hőmérsékleti kontraszt alakul ki Magyarország területén: az ország északnyugati részei a ciklon hátoldali áramrendszerében esve jóval alacsonyabb hőmérsékletűek, mint az előoldali áramrendszerhez tartozó keleti területek.

