

# Környezetszennyezés detektálása mágneses szuszeptibilitásmérésekkel<sup>1</sup>

MÁRTON PÉTERNÉ SZALAY EMŐKE<sup>2</sup>, MÁRTON PÉTER<sup>3</sup>

A környezet állapotának felmérésében, valamint a környezetszennyezés detektálásában a mágneses szuszeptibilitás egyre jelentősebb szerephez jut, mivel mind a terepi, mind a laboratóriumi szuszeptibilitásmérések összehasonlíthatatlanul gyorsabbak és költséghatékonyabbak, mint az egyéb, hasonló célú módszerek (pl. kémiai analízis). Az alábbiakban példák felvillantásával adunk tájékoztatást arról, hogy a közelmúltban beszerzett eszközeinkkel milyen jellegű, a környezeti mágnesség körébe eső feladatok megoldásával foglalkoztunk.

E. MÁRTON, P. MÁRTON: Screening environmental pollution by magnetic susceptibility

Combined field and laboratory measurements of magnetic susceptibility provide a quick and relatively inexpensive method for studying the environment both in virgin and in polluted states. Below are examples from our own practice as to how the susceptibility responds to each of the following factors acting on the environment: roadside pollution, mineral alteration, soil formation, fly ash deposition and urban traffic.

## Bevezetés

A mágneses szuszeptibilitás klasszikus geofizikai alkalmazása a mágneses hatószámításra szorítkozott, később viszont hasznosnak mutatkozott a tektonikai célú paleomágnességben a szuszeptibilitásnak a mágneses szövet meghatározásában játszott szerepe révén. A löszkutatók újabb alkalmazásra adott lehetőséget, amelynek során kiderült, hogy a lösz-paleotalaj sorozatokban az egykori klíma indikátoraként használható. A szuszeptibilitásmérések újabban a környezeti állapot felmérésében, a környezetszennyezés detektálásában töltöttek be fontos szerepet.

A mérésekkel szemben támasztott egyre növekvő igények (gyorsaság, pontosság, sokoldalúság) több korszerű eszköz kifejlesztésére vezettek. Ezek közül jelenleg a legelterjedtebb a gyártóról röviden csak *Bartington*-nak nevezett, kombinált terepi és laboratóriumi mérésekre egyaránt alkalmas műszercsalád, amelyből a közelmúltban OTKA műszerpályázat (M 037074) révén beszereztünk egy MS2 típusú eszközt, illetve szintén OTKA-támogatásból (TS 44765) egy MS2C típusú fúrómagvizsgáló tekercset és egy magtovábbító egységet. Ezáltal számunkra is lehetővé vált, hogy bekapcsolódjunk a környezeti célú mágneses vizsgálatokba.

## Szuszeptibilitás paraméterek

A szuszeptibilitás az anyag mágnesezhetőségének mértéke, vagyis az egységnyi mágneses térben kialakuló (indukált) mágnesezettség:

$$\kappa = J/H,$$

ahol  $\kappa$  a (kezdeti) szuszeptibilitás,  $J$  az indukált mágnesezettség (azaz az egységnyi térfogatban indukált mágneses momentum) és  $H$  a mágnesező tér. Minthogy  $J$  és  $H$  dimenziója azonos, a  $\kappa$  szuszeptibilitás dimenzió nélküli mennyiség, amit szokás térfogati szuszeptibilitásnak is nevezni. Az ún. tömegspecifikus szuszeptibilitás ( $\chi$ ) a

$$\chi = \kappa/\rho$$

képletből nyerhető, ahol  $\rho$  az anyag sűrűsége.  $\chi$  dimenziója SI egységekben  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

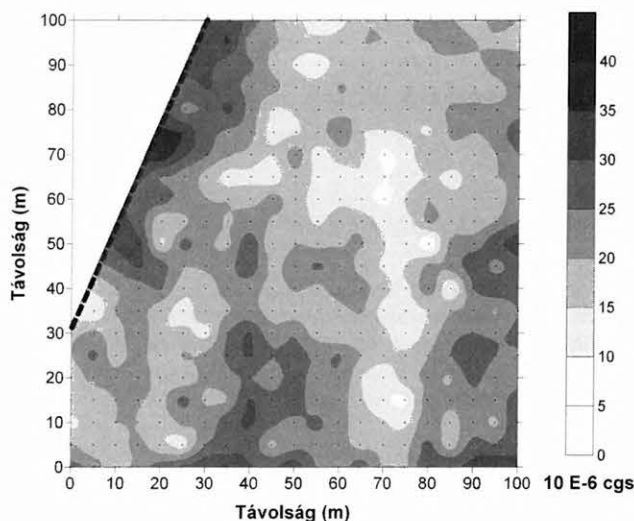
Diamágneses anyagok tömegspecifikus szuszeptibilitása negatív és  $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  rendű (a legkisebb a vízé:  $-9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ , a kvarcé és a kalcité ennek mintegy a fele). A legtöbb kőzetalkotó szilikát paramágneses, tipikusan  $10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$  rendű tömegspecifikus szuszeptibilitással. A ferromágneses anyagok szuszeptibilitása a mágnesező tér függvényében változik, ezért a gyakorlatban a szuszeptibilitást a gyenge ( $< 10^3 \text{ A/m}$ ) térben mutatott, ún. kezdeti szuszeptibilitással azonosítják, amely azonban nagyságrendekkel meghaladja a paramágneses értékeket. Tipikus ferromágneses ásványszemcsék (pl. magnetit) szuszeptibilitását a saját lemágnesezés miatt a szemcsealak egyértelműen megszabja, azaz a szuszeptibilitás  $1/N$ -nel, a lemágnesezési tényező reciprokával egyenlő. Ez a környezetben leggyakrabban előforduló izometrikus magnetit-szemcsék ( $N = 1/3$ ) esetén 3, ami növekvően elnyújtott szemcsék esetén (azaz a lemágnesezési tényező csökkenésével) nagyságrendekkel is növekedhet. Izometrikus magnetitszemcsékből álló minta tipikus tömegspecifikus szuszeptibilitása így  $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ , vagyis legalább ezerszerese a tipikus paramágneses, illetve százezerszerese a legtöbb diamágneses értéknek.

A közúti forgalom által kibocsátott szennyezőanyagok között, elsősorban a motorok és a kipufogórendszer kopása következtében ultrafinom ferromágneses fémrészecskék is vannak. A közutak menti sávban tapasztalt megnövekedett szuszeptibilitás nagyrészt e részecskéknél köszönhető, amelyek a magnetitnél két és félszer nagyobb szuszeptibilitásuk révén már rendkívül kis koncentrációban is jelentős szuszeptibilitás anomáliát okozhatnak (1. ábra).

<sup>1</sup> Beérkezett: 2006. január 20-án

<sup>2</sup> ELGI Paleomágneses Laboratórium, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.  
E-mail: paleo@elgi.hu

<sup>3</sup> ELTE Geofizikai Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C.  
E-mail: martonp@ludens.elte.hu



1. ábra. Mezőben futó közút menti sávban (bal felső rész) a terepen mért szuszceptibilitás ( $\kappa$ ) a felszíni ferromágneses szennyezés miatt szisztematikusan nagyobb, mint a kevésbé szennyezett mezőben mérhető, enyhén variálós szuszceptibilitás. A műszerleolvasások itt cgs egységekben történtek, ez indokolja ezen egységek használatát

Fig. 1. Susceptibility ( $\kappa$ ) map of a meadow with a road on the upper left showing increased susceptibilities along the roadside. Readings in cgs units

### Frekvenciafüggő szuszceptibilitás

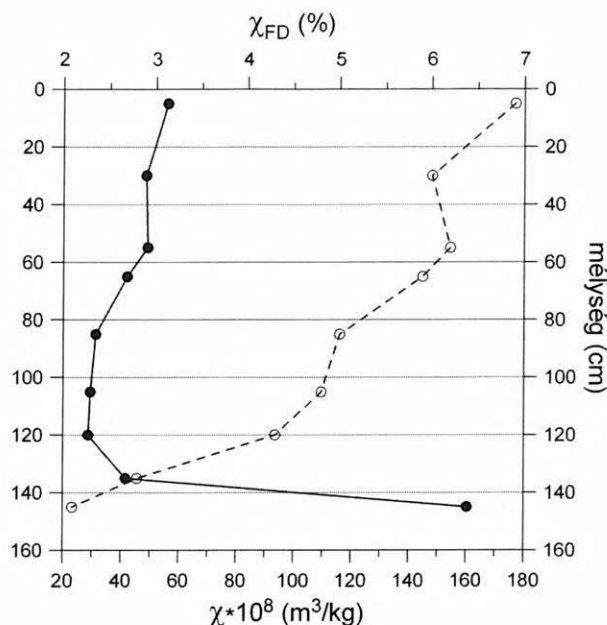
A szuszceptibilitás frekvenciafüggését két mágnesező frekvencián (a Bartington esetén 0,46 és 4,6 kHz) történő (laboratóriumi) méréssel a

$$\kappa_{FD} = 100(\kappa_{LF} - \kappa_{HF})/\kappa_{LF} = \chi_{FD} (\%)$$

képlet szerint lehet meghatározni, ahol  $\kappa_{FD}$  ( $= \chi_{FD}$ ) a %-ban kifejezett frekvenciafüggés, míg  $\kappa_{LF}$  a 0,46,  $\kappa_{HF}$  pedig a 4,6 kHz frekvencián mért szuszceptibilitás.

$\kappa_{FD}$  mérésével a szuperparamágneses mérettartományba (< 30 nm) eső ferromágneses kristályok jelenléte detektálható, ui. az ilyen ultrafinom kristályokat tartalmazó minták a nagyobb frekvencián valamivel kisebb szuszceptibilitást mutatnak, míg a nagyobb méretű, egy és/vagy többdoménű kristályokat tartalmazó mintákon azonos szuszceptibilitás mérhető mindkét frekvencián ( $\kappa_{FD} < 2\%$ ). A szuperparamágneses méretű ferromágneses kristályok, szemben a nagyobb méretű primer kristályokkal, általában másodlagosak, pl. égetéskor, robbanómotorokban, talajképződéskor biokémiai folyamatok hatására termelődnek (jellemző frekvenciafüggés:  $5\% < \kappa_{FD} < 15\%$ ).

A 2. ábra egy cserhádi barna erdőtalaj szuszceptibilitás ( $\chi$ ) és frekvenciafüggő szuszceptibilitás ( $\chi_{FD}$ ) menetét mutatja a mélység függvényében. Itt az anyagövet andezit (viszonylag nagy  $\chi$ ), maga a talaj gyengén fejlett (az anyagövetől független, egyenletesen kis, illetve felfelé kissé növekvő  $\chi$ ). A primer ferromágneses ásványokat tartalmazó aljzat (andezit) frekvenciafüggő szuszceptibilitása ennek megfelelően elhanyagolhatóan kicsi ( $\chi_{FD} = 2\%$ ). A talajban a felfelé növekvő  $\chi_{FD}$  azonban a másodlagos (talajosodás során képződött) szuperparamágneses fázis mennyiségének növekedését jelzi, amely a felszín közelében maximális ( $\chi_{FD} = 7\%$ ).



2. ábra. A tömegspecifikus szuszceptibilitás ( $\chi$ ) — folytonos görbe, alsó skála — és frekvenciafüggése ( $\chi_{FD}$ ) — szaggatott görbe, felső skála — egy andezit alapkőzeten kifejlődött barna erdőtalajban a mélység függvényében

Fig. 2. Mass specific susceptibility ( $\chi$ ) — continuous curve and lower scale — and its frequency dependence ( $\chi_{FD}$ ) — dashed curve and upper scale — in a brown forest soil developed on andesite bedrock as a function of depth (m)

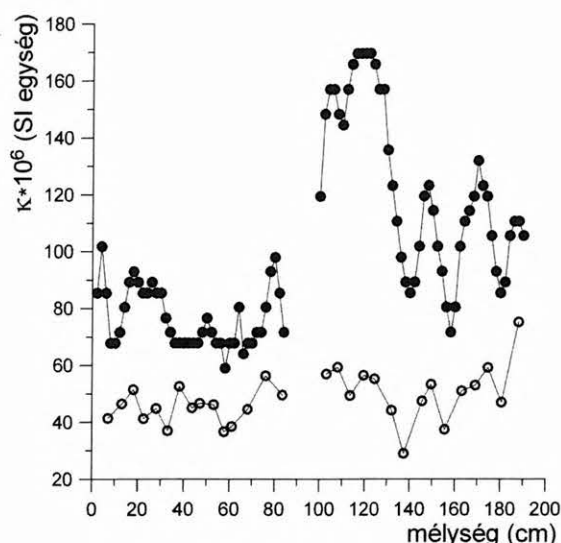
### Időfüggő szuszceptibilitás

Vizes (nedves) környezetükből kiemelt minták (fúrómagok) metastabil ásványai a levegővel érintkezve, illetve a tárolási viszonyok megváltozása miatt kémiai átalakulást szenvedhetnek, ami a szuszceptibilitás változását eredményezheti. Ez általában csökkenés, ha az átalakulásban ferromágnesesből paramágneses fázis jön létre, illetve ha az átalakulás paramágnesesből csökkent szuszceptibilitású paramágneses fázist hoz létre. Ezek a kémiai változások ismételt szuszceptibilitás-méréssel detektálhatók.

A jelenséget a 3. ábra illusztrálja egy balatoni iszapmag példáján. A Bartington szuszceptibilitás ( $\kappa$ ) mérések az MS2C-vel közvetlenül a magvétel után történtek 2 cm-enként, majd a magból 5 cm-enként további mérések céljából zárt kapszulákba vettünk mintákat. Ez utóbbi minták szuszceptibilitását néhány hónap múlva lemérve, mindenütt kisebb értékeket kaptunk, mégpedig úgy, hogy a nagyobb eredeti szuszceptibilitások átlagosan erősebben csökkentek.

### Ipari tevékenység és szuszceptibilitás

A széntüzelésű erőművek, a vas-, acél- és cementgyárak kéményei — a ma már kötelezően előírt szűrés ellenére — nagy mennyiségű szálló port juttatnak a levegőbe, amely az időjárási viszonyok függvényében a kibocsátás helyétől nagy távolságra is eljuthat, mielőtt lerakódna a felszínre, azaz a talaj felszínére, a növények leveleire és az épületekre. A lerakódott por egy részét a csapadékvíz ugyan elszállítja, azonban mindig újabb és újabb részecskék ülepednek le, vagyis hosszú távon valamiféle egyensúly kialakulhat.



3. ábra. A szuszceptibilitás ( $\kappa$ ) időbeli változása egy balatoni mag mentén. Felső görbe: MS2C-vel mért értékek közvetlenül a magvétel után. Alsó görbe: a magból zárt kapszulákba vett minták mérésével kapott értékek a magvétel után négy hónappal

Fig. 3. Time dependence of susceptibility ( $\kappa$ ) along a core from Lake Balaton. Upper curve: values measured by MS2C on the fresh core. Lower curve: same measured on encapsulated specimens four months later

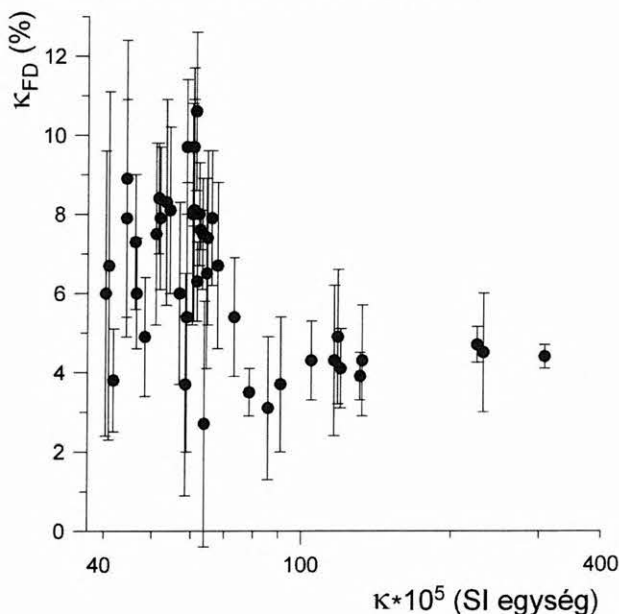
A szálló port alkotó részecskék közül a szuszceptibilitás szempontjából azok a nagy hőmérsékleten keletkező, néhány  $10\ \mu\text{m}$  átmérőjű vasgömböcskék érdekesek, amelyek lehűlve (részben) magnetit oxidálódnak. Ily módon a leülepedett porral szennyezett közeg mágneses szuszceptibilitása anomálishan nagy lesz a tiszta környezethez képest.

Az ipari szálló por a gyártás függvényében különféle toxikus nehézfémek vegyületeit is tartalmazza. A réz (Cu) és az ólom (Pb) tipikusan ipari szennyeződésként kerül a talaj felszínére, illetve a talajba, továbbá a cink (Zn) és a mangán (Mn) egy része is lehet ipari eredetű, úgyhogy szennyezett területen pozitív korreláció várható a szuszceptibilitás és ezen toxikus nehézfémek mennyisége között. Ugyanakkor a szuszceptibilitás és a talaj ásványaiiban eredetileg jelenlévő fémek (Fe, Al, Cr, Ni) mennyisége közti korreláció esetleg függő, mert ezek az elemek szennyezőként is beleszámíthatnak a talajba.

Egy ismert, ipari szálló porral szennyezett erdős területen végeztünk terepi szuszceptibilitás-méréseket egyrészt az avarral borított felszínen, másrészt az avar alatti legfelső talajszintben. A felszíni  $\kappa$  értékek a flis alapkőzetten kialakult vékony talajon a szennyező forrástól távol tipikusan  $250 \cdot 10^{-6}$  (SI egység) voltak, míg a szennyezett területen belül ennek kétszeresénél nagyobb és huszonötszörösénél kisebb értékeket mértünk. Méréseinket néhány bükkfára, illetve a fák lombkoronái alatti pontokra koncentráltuk. E fa lombozata ui. hatékonyan gyűjti össze a szálló port, amely eső idején egyrészt az ágakon és a törzsön lefolyó vízzel, másrészt a levelekről közvetlenül lecsöpögő vízzel jut a felszínre. A legtöbb szennyezés rendszeren a törzs közvetlen közelében, a lejtő irányában halmozódik fel, azaz a legnagyobb szuszceptibilitás e pontokban mérhető, míg a fa alatti többi pontban a felhalmozódás változó mértékű, vagyis a szuszceptibilitás tág határok között mozoghat.

A terepmunka során a mérési pontokban talajmintákat is vettünk az avar alatti legfelső talajszintből további vizsgá-

latokra. A 4. ábra a laboratóriumi szuszceptibilitás-mérések eredményeit mutatja be, amelyek a térfogati szuszceptibilitásra ( $\kappa$ , SI egységekben) és a frekvenciafüggésre ( $\kappa_{FD}$ , %-ban) vonatkoztak. (Egyébként az adott területen és mintavételi mód mellett a tömegspecifikus szuszceptibilitás átlagban kisebb, mintegy 92%-a térfogati szuszceptibilitásnak). A 4. ábrán a  $75,0 \cdot 10^{-5}$ -nél nagyobb szuszceptibilitású (erősen szennyezett) mintákra átlagosan 4% körüli frekvenciafüggés jellemző, míg az ennél kisebb szuszceptibilitású (kevésbé szennyezett) minták zömének frekvenciafüggése 8% körül szóródik, vagyis itt az erősen kontaminált talaj szuszceptibilitásában az autigén (szuperparamágneses) járulék kevésbé jelentős, mint a nagyobb ferromágneses szemcsék hatása. Említésre érdemes még, hogy a nagy szuszceptibilitású mintákban a toxikus fémek közül a réz, az ólom és a mangán szintén nagyobb koncentrációban van jelen (V. PICHLER, szóbeli közlés), azaz pozitív korreláció mutatkozik a szuszceptibilitás és ezen elemek koncentrációja között.



4. ábra. Frekvenciafüggés ( $\kappa_{FD}$ ) a szuszceptibilitás ( $\kappa$ ) függvényében egy ipari porral szennyezett területen, öt kiválasztott bükkfa alatti legfelső talajból gyűjtött minták mérése alapján. Telekörök függőleges vonalakkal: mért  $\kappa_{FD}$  értékek és szórásaik

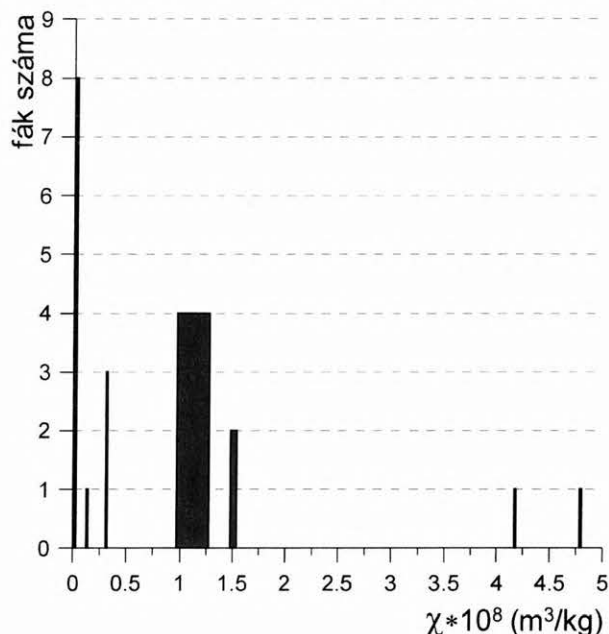
Fig. 4. Frequency dependence ( $\kappa_{FD}$ ) against susceptibility ( $\kappa$ ) on an area with industrial dust pollution, as measured on topsoil samples under five selected beech trees

## Városi forgalom és szuszceptibilitás

A városok útjai általában szilárd burkolattal vannak el látva és ugyancsak burkolt járdákkal szegélyezettek. Az utak mentén a szilárd felszínt egyedül a fák számára meghagyott kicsiny földterületek törik meg, amelyek az utakkal, járdákkal együtt teljesen el vannak szennyezve. Vannak azonban zöld területek is több-kevesebb fával (játszóterek, parkok, esetleg kisebb-nagyobb erdős területek stb.), amelyek a távolságtól és széljárástól függő mértékben szintén ki vannak téve a városi forgalom szennyező hatásának. A forgalomból származó toxikus por egy része közvetlenül az utakat szegélyező fák leveleire telepszik, más része eljut a városi zöldterületekre és ráakad a fák

leveleire. A leülepedő por felhalmozódása több tényező függvénye, amelyek közül az idő mellett a legfontosabb az időjárás. Nyár végi, kifejtett, de még nem hervadó leveleket feltételezve, legalább két hét esőmentes időszak szükséges ahhoz, hogy egy  $20\text{ cm}^3$  köbtartalmú, leveleket tartalmazó minta jól mérhető szuszeptibilitással rendelkezzen. A levélgyűjtés 2–3 m magasságból történik. Városi mintavételkor a nagy levelű fák (pl. juhar, platán) előnyben részesülnek.

Levélszennyezés detektálását célzó szuszeptibilitásmérésekkel Sopronban, főleg juharfákról gyűjtött levélmintákkal kísérleteztünk. A mintavételt négy, várhatóan különböző szennyezettségű területre terjesztettük ki (5. ábra).



5. ábra. Soproni levélminták mérésével meghatározott tömegspecifikus szuszeptibilitás ( $\chi$ ) értékek eloszlása. Az ábrán balról jobbra haladva tiszta, azaz szennyezetlen (8 fa), enyhén kontaminált (4 fa), közepesen (6 fa), illetve erősen szennyezett (2 fa) esetek különböztethetők meg (további magyarázat a vonatkozó bekezdésekben)

Fig. 5. Distribution of mass specific susceptibilities ( $\chi$ ) in Sopron town based on measurements on leaf samples of altogether 20 trees

A Lővérek körzetében, a Lővér kert–Szívszanatórium–Kemping sávbán kilenc meghatározás közül az erdei minták plusz egy út menti fa szennyezetlennek bizonyultak ( $\chi = 0$ ), viszont a buszfordulónál a megálló közelében mintázott két fa ( $\chi = 1,00 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , illetve  $\chi = 1,08 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) jelentős, míg egy, a Maróni szálló közelében álló út menti fa ( $\chi = 0,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) mérsékelt szennyeződést mutatott.

Az Erzsébet kertben három (két juhar és egy királytölgy) játszótéren álló fát vizsgáltunk. Az útközi juhar ( $\chi = 1,53 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), a távolabbi ( $\chi = 0,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) a várakozásnak megfelelő értékeket adott, a még távolabbi királytölgy pedig nullát.

A közepes forgalmú Csatai Endre utcában az MTA GGKI közelében mintázott két fára kapott értékek ( $\chi = 1,09 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , illetve  $\chi = 1,48 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) jelentős szennyezésnek tekinthetők.

A Csengery út és Kőszegi út nagy forgalmú kereszteződésének közelében a buszmegállónál mindkét oldalon mintáztunk egy-egy juharfát. A mért szuszeptibilitások ( $\chi = 4,17 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , illetve  $\chi = 4,79 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) a városban tapasztalt legnagyobb értékek. Kissé arrébb, a Deák tér 57. számú ház mögötti, négyemeletes lakótelepi házakkal körülvett játszótéren, egymástól mintegy 50 m-re álló két juharfa viszont egyáltalán nem, illetve csupán kissé volt szennyezett ( $\chi = 0$ , illetve  $\chi = 0,13 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), nyilván a körülvevő magas házak hatékony árnyékoló hatásának köszönhetően. Végül, szintén a közelben, egy három oldalról házakkal körülvett, de az út felől nyitott játszótéren az út menti fa  $\chi = 1,24 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , az úttól 50 m-rel távolabb álló fa  $\chi = 0,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  értékkel a közúti szennyezés távolsággal történő csökkenését jelzi.

A városi légkörben lebegő porban lévő mágneses részecskék, belélegezve és a tüdőben hosszú idő alatt felhalmozódva, ártalmasak lehetnek az egészségre. A gépkocsik pollenszűrőjén fennakadó por összetétele jól modellezi a belégzésre kerülő szilárd anyagok összetételét. Mint-hogy a pollen és más, egyébként az egészségre szintén káros hatású szerves vegyületek nem mágnesesek, a mágneses részecskék jelenléte a szűrőn szuszeptibilitásméréssel kimutatható, illetve felhalmozódása kvantitatíve is nyomon követhető. A kimutatás egyszerű, a szűrő egy részét kivágva és zárt, nem mágneses tartóba hajtogatva, a kapott minta szuszeptibilitása lemérhető. Pl. egy fővárosi forgalomban 15 000 km-t megtett személygépkocsi pollenszűrőjéből vett minta térfogati szuszeptibilitása  $175 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$  egységnek mutatkozott.

## Ajánlás

A fenti néhány példa távolról sem meríti ki a mágneses szuszeptibilitásmérések és még kevésbé a mágneses módszerek alkalmazásának lehetőségeit a környezeti állapot és a környezetszennyezés felmérésében és változásaik nyomon követésében. A téma iránt érdeklődőknek ajánljuk EVANS és HELLER *Environmental Magnetism* című, a közelmúltban megjelent könyvét. A könyvben gazdag irodalmi hivatkozás található, többek között a tárgyalt témákhoz is, amelyek felsorolásától ezért itt eltekintünk.

## Köszönetnyilvánítás

A bemutatott méréseket az OTKA támogatta (szerződés nyilv. tart. szám: TS044765 és T043445). A terepi mérésekben az ELTE és a NYME hallgatói működtek közre. A soproni levélgyűjtés megszervezéséért SZARKA Lászlónak mondunk köszönetet. Az 1. ábra LIPOVICS Tamás munkája, a további ábrák elkészítésében FERENCZ Edith nyújtott technikai segítséget.

## HIVATKOZÁSOK

- PICHLER V. 2005: Szóbeli közlés  
EVANS M. E., HELLER F. 2003: *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetism*. Academic Press