

Nyolc európai város légszennyezettségének vizsgálata falevelekről gyűjtött por elemösszetételének diszkriminancia analízisével

MARGITAI Zita^a, BRAUN Mihály^a

^a Debreceni Egyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1.

1. Bevezetés

A légköri aeroszolak, szálló- és ülepedő porok elemösszetételét gyakran használják a városi környezet jellemzésére.^{1,2} A falevelek kémiai összetétele indikálja a levegő minőségét, mert a szennyezőket hordozó szemcsék kiülepednek a levelek felületére, és bizonyos vegyületek beépülhetnek a növényi szövetekbe is.³ A kifejlett utcai fák jelentősen csökkenthetik a levegő portartalmát, mert leveleik felületén akár több mázsa por is meg tudnak kötni.⁴ A porszűrés mértéke függ a fajtól, a fák fejlettségi állapotától, a levelek alakjától és felületétől. Az emberi egészségre veszélyes 2,5-10 µm szemcseméretű frakció is jelentős mértékben megkötődik a levelek felületén.⁵ A levél felületén megtapadt anyagot egy nagyobb zápor lemoshatja, és az a lefolyó csapadékkal távozik a városból. A levél megújult felülete ismét képes a por megkötésére. A levelekben felhalmozódott elemek az őszi avarral rendszeresen eltávolíthatók, így csökkenthető a toxikus elemek feldúsulása a parkok, zöldterületek talajában.⁴

Nagyobb földrajzi egységek légszennyezettségi állapotának felmérése igen nehéz feladat, mert csak nagyszámú laboratórium összehangolt munkájával lehetséges.⁶ Ezzel szemben a falevelekre tapadt por könnyen és gyorsan begyűjthető és elemezhető. A falevelek analízisére alapozva kidolgozható egy olyan biomonitoring rendszer, amellyel rövid időn belül nagyobb földrajzi egységek szennyezettségi állapotáról kaphatunk képet. Számolnunk kell azzal, hogy az így begyűjtött vizsgálati anyag nem olyan jól definiált, mint a szabványosított technikákkal nyert minták. A légszennyezettség jellemzéséhez adott szemcseméretű frakciók elemösszetételét határozzák meg.⁷ Ezzel szemben a falevelekről gyűjtött minták szemcse-összetétele tág határok között változik, az ülepedő- és szállóporok mellett tartalmazza a felületen megtapadt száraz és nedves aeroszolakot is. A városok eltérő klimatikus sajátosságai miatt a por megkötődésének és lemosódásának mértéke eltérő lehet, ezért nem lehet pontosan megmondani, hogy mennyi idő alatt és mekkora térfogatból ülepedett ki a levél felületéről begyűjtött anyag. A szennyezők koncentrációjának napszakos változásai sem mutathatók ki,⁸ és csak a vegetációs időszak vizsgálható.

A kiülepedett szennyezők mennyiségének meghatározására a fent említett okok miatt a falevelek vizsgálatán alapuló monitoring rendszer csak akkor lenne alkalmas, ha a por akkumulációjának sebességét minden egyes mintavételi helyen pontosan ismernénk. Ezen ismeretek hiányában tanulmányunkban a légszennyezettség jellemzésére az elemeknek a por szárazanyag-tartalmára vonatkoztatott koncentrációját használtuk fel és nem a felületegységre megadott mennyiségeket. Arra a kérdésre kerestük a választ, hogy kimutatható-e különbség az egymástól térben jelentős

távolságra lévő városok között a fák levelére rakódott por elemösszetétele alapján.

A környezeti kémia területén gyakran alkalmaznak sokváltozós statisztikai eljárásokat, melyek megkönnyítik a szennyezők azonosítását, a szennyezett területek lehatárolását.^{9,10} Az alakfelismerő módszerek¹¹ csoportjába sorolt technikák közül olyan esetekben használnak diszkriminancia analízist, amikor a megfigyelési egységeket (mintákat) valamilyen előre meghatározott szempont szerint csoportokba lehet sorolni.¹²⁻¹⁴ Az eredmények kiértékelésére lineáris diszkriminancia analízist alkalmaztunk. Olyan módszert dolgoztunk ki, mely alkalmas lehet nagyobb földrajzi egységek légszennyezettségének felmérésére és jellemzésére.

A diszkriminancia analízist (DA) Fisher és Mahalanobis vezette be.^{11,17} A módszer alapja, hogy valamilyen előre meghatározott kritérium szerint minden megfigyelési egységet csoportba sorolunk. Esetünkben a megfigyelési egységek az egyes fákról származó porminták, a csoportok a városok voltak. Több kvantitatív tulajdonság együttes figyelembevételével eldönthető, hogy van-e szignifikáns különbség a csoportok között. Vizsgálhatjuk a megfigyelési egységek besorolásának helyességét, a csoportok közötti átfedés mértékét és azt, hogy milyen biztonsággal sorolhatók be a vizsgálati egységek az egyik, ill. a másik csoportba. A diszkriminancia függvénnyel eldönthető, hogy egy újabb (ismeretlen besorolású) minta melyik csoportba tartozik. A vizsgált tulajdonságokból létrehozott n-dimenziós térben a megfigyelési egységeink egy-egy pontfelhőt alkotnak. A számításokkal olyan síkokat határozzuk meg, melyek a különböző csoportokat egymástól elhatárolják. A csoportok közötti variancia maximálása és a csoporton belüli variancia minimálása a cél. Az osztályozáshoz a diszkriminancia értékeket az (1) egyenlettel határozzuk meg.

$$S_i = c_i + w_{i1}X_1 + w_{i2}X_2 + \dots + w_{ip}X_p \quad (1)$$

ahol i jelöli a csoportot, $1, 2, \dots, p$ a változókat, c_i az i -edik csoport konstansa, w_{ij} a j -edik változó súlya az i -edik csoportban, X_j a j -edik változó meghatározott értéke, S_i az osztályozófüggvény értéke. Minden megfigyelési egység abba a csoportba kerül, amelyben legnagyobb az osztályozó függvény értéke. A w_{ij} diszkriminancia koefficiensek (másnéven súlyok), a p változók i -edik csoportbeli középértékéből és az egyesített csoportonbelüli kovariancia mátrixból származnak.

A DA módszer alkalmazásához néhány feltételnek teljesülnie kell: a csoportok kovariancai mátrixai nem különbözhetnek lényegesen, és a változóknak sokváltozós normális

eloszlásúaknak kell lenniük. Azért alkalmaztunk lineáris diszkriminancia analízist (LDA), mert ez a módszer akkor is használható, ha a megfigyelési egységek száma a változók számához képest kicsi, ill. a csoportok kovarianciamátrixai szingulárisak.

2. Anyag és módszer

2.1. Mintavételi helyek

A vizsgálatokhoz Nyugat-, Közép-, Kelet- és Délkelet-Európában nyolc várost választottunk ki (1. táblázat). Három hársfajról (*Tilia tomentosa*, *T. platyphyllos* és *T. cordata*) gyűjtöttünk levélmintákat 2003 júniusa és augusztusa között. A minták utak mellől, parkokból és játszótéerekről származtak. Városonként 10-14 fáról szedtünk 25-30 levelet 150-200 cm magasságból. Debrecen esetében összesen 46 fáról gyűjtöttünk mintát.

2.2. Mintaelőkészítés

A leveleket leszedésüket követően papírtasakokban, +4°C-on tároltuk. Felületüket A/4-es szkennelvel határoztuk

1. Táblázat. A vizsgált városok lakossága és ipara^{6,16}

Város	Lakosság száma	Ipar
Antwerpen	455 852	gyémántcsiszolás, kőolajfinomítók, élelmiszer-, fém-, elektrotechnikai- és vegyipar, autó- és hajógyártás
Brüsszel	948 122	textil-, gép-, gumi-, csipkegyártás, vegyipar, elektrotechnika, villamosipar, kokszolók, vasöntődéek
München	1 251 100	autó-, gép-, cigarettá-, sörgyártás, vegy- és gyógyszeripar, optikai üzemek
Debrecen	216 130	élelmiszer-, konzerv- és gyógyszeripar, dohánygyártás
Nagyvárad	221 000	vegyipar, szerszámgép-, konzerv-, cukor-, timföldgyártás, hőerőmű és alumínium kohászat
Kolozsvár	319 000	fémgyártás, gyógyszerüzem, porcelángyártás
Nagybánya	152 000	arany-, ezüst-, réz-, ólom-, cinkbányászat, ércüző- ércelőkészítő üzem, fémfeldolgozás,
Várna	314 900	bányagépgyártás, fa-, vegy-, élelmiszeripar
		hajóépítés, gépgyártás, textil-, bútorigar, élelmiszerfeldolgozás

2.3. Elemösszetétel meghatározása

Az Al, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Pb és V koncentrációját Spectroflame típusú (Spectro GmbH, Kléve, Németország) induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES) határoztuk meg. A cink koncentrációját lángatomabszorpciós módszerrel (FAAS), Unicam SP1900 típusú készülékkel mértük. A kadmium koncentrációja a mintaoldatokban csekély volt, ezért a meghatározást Zeeman háttérkorrekciós grafitkemencés atomabszorpciós módszerrel (GFAAS), Perkin Elmer Aanalyst 600 készülékkel végeztük.

2.4. Diszkriminancia analízis

A számításokhoz SPSS programcsomagot használtunk. A varimax rotáció megkönnyítette annak vizsgálatát, hogy az egyes elemek milyen szerepet játszanak a városok elkülönítésében.¹⁷ Az elemkoncentráció adatok lognormális eloszlásúnak bizonyultak, ezért változónak a (2) egyenlet alapján transzformált elemkoncentrációkat tekintettük.

$$X_i^* = \lg(X_i + 1) \quad (2)$$

A diszkriminancia értékek csoportátlagai (centroidok) alapján vizsgáltuk a városok közötti eltérések nagyságát. Az osztálybasorolás helyessége alapján meghatároztuk a csoportok közötti átfedés mértékét. Debrecen esetében új, a

meg a fekete képpontok területe alapján. A 10-12 dm² felületű mintákat műanyag edényekbe helyeztük és 250 cm³ desztillált vízzel 10 percig rázógéppel ráztattuk. Ezután a mintákat 1 percre ultrahangos fürdőbe helyeztük. A port tartalmazó szuszpenziót 150 µm-es műanyag szitán szűrtük, hogy a szálakat, növényi szőröket és állati maradványokat (pl. levéltetvek) eltávolítsuk. A faleveleket 50 cm³ desztillált vízzel ismét átmostuk, és ezt is hozzászűrtük a mintához. A szűrletet konyhai mikrohullámú sütőben 20-30 cm³ térfogatra pároltuk, majd előre lemért tömegű, 50 cm³ térfogatú főzőpohárba vittük át. A műanyag edény falára tapadt maradékot 25 cm³ deszt. vízzel távolítottuk el. Az oldatokat egyesítettük és a maradék vizet 105°C-on szárítószekrényben távolítottuk el. Visszamértük a főzőpoharak tömegét és kiszámítottuk a por mennyiségét.

Ezt követően a mintákat nedves roncsolással vittük oldatba.¹⁵ A 0,1-0,2 g közötti tömegű minták roncsolását 5 cm³ 65% (m/m) HNO₃ és 1 cm³ 30% (m/m) H₂O₂ hozzáadásával végeztük 80°C-os elektromos főzőlapon. Az így kapott oldatokat 10 cm³ végtérfogatra töltöttük 0,1 mol/dm³ koncentrációjú salétromsavval. A visszaoldódást ultrahangos fürdővel segítettük elő.

diszkriminancia függvények kiszámításánál figyelmen kívül hagyott minták osztálybasorolásával teszteltük a módszer használhatóságát.

3. Eredmények

A nyolc város összehasonlításához 7 diszkriminancia egyenletet határoztunk meg. A diszkriminancia függvények koefficienseit úgy választottuk meg, hogy a csoportok közötti és a csoporton belüli eltérésnégyzet összegek hányadosa (ún. sajátértéke) maximális legyen. Azokhoz a függvényekhez, melyek alapján a csoportok jól elkülöníthetők nagy sajátértékek tartoznak. A sajátértékek alapján (2. táblázat) az első 3 függvény a teljes variancia 88.84%-át foglalta magában.

A kannonikus korreláció, a diszkriminancia értékek és a csoportok közötti asszociáltság mértéke alapján szintén az első három függvényt emelhetjük ki. Bár az első 6 függvény alapján a városok szignifikánsan különbözőnek bizonyultak, a városok közötti különbségek már az első három függvényvel meghatározhatók. Ezekben a függvényekben ólom, bárium, magnézium és kadmium diszkriminancia koefficiense a meghatározó (3. táblázat). Annak ellenére, hogy a benzin ólom koncentrációját a legtöbb országban minimálisra csökkentették,¹⁸ az ólom szerepe jelentősnek

2. Táblázat. A diszkriminancia függvények sajátértékei

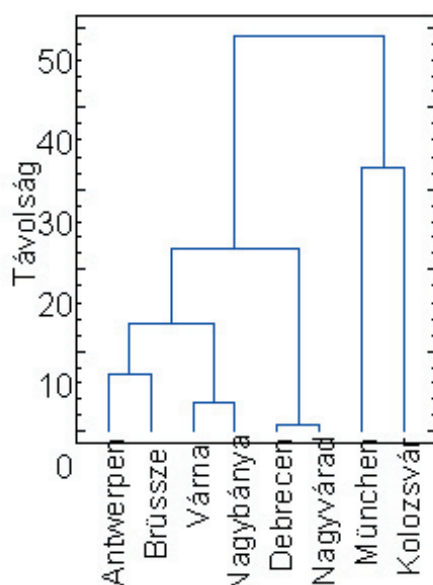
	Sajátérték	%	Rc	λ	χ^2	DF	p
1	11,195	46,57	0,958	0,000	628,304	98	0,000
2	5,275	21,94	0,917	0,004	433,227	78	0,000
3	4,887	20,33	0,911	0,024	289,975	60	0,000
4	1,112	4,63	0,726	0,143	151,697	44	0,000
5	0,807	3,36	0,668	0,302	93,372	30	0,000
6	0,658	2,74	0,630	0,546	47,227	18	0,000
7	0,105	0,44	0,309	0,905	7,812	8	0,452

R_c: kanonikus korrelációs koeficiens, λ : Wilks lambda, DF: szabadsági fok; p valószínűségi szint

bizonyult. Az kőolajfeldolgozással, ill. pakura étetéssel kapcsolatos vanádium és a mangán szennyezés szerepe a

3. Táblázat. Rotált standardizált diszkriminancia koefficiensek

Súly	Pb	Ba	Mg	Cd	Sr	Ca	K	S	Al	Fe	Cu	Zn	Mn	V
w ₁	1.186	-1.137	0.025	-0.057	0.136	-0.405	-0.128	0.172	-0.048	0.096	0.625	-0.152	0.008	0.129
w ₂	0.069	0.196	1.247	0.085	-0.386	-0.028	0.185	0.179	-0.256	-0.132	0.224	-0.067	-0.279	-0.493
w ₃	-0.115	-0.043	0.182	0.890	-0.471	-0.116	0.090	-0.210	0.065	0.270	-0.320	0.176	0.181	0.203
w ₄	0.345	-0.310	-0.260	-0.187	1.687	-1.656	0.553	-0.453	-0.184	0.235	0.335	0.229	0.198	0.254
w ₅	-0.253	0.145	-0.718	-0.166	-0.336	0.679	0.337	0.250	2.492	-2.281	0.632	-0.300	0.182	-0.397
w ₆	-0.001	0.309	-0.026	0.029	-0.110	-0.202	0.028	0.377	-0.625	-1.037	-0.021	1.283	0.348	-0.194
w ₇	0.141	0.382	-0.099	0.022	0.273	0.183	-0.310	-0.088	0.064	0.039	-0.350	0.282	0.650	-0.592



1. ábra. A városok összehasonlítása a diszkriminancia függvény átlagértékei (centroidok) alapján cluster analízissel

A por összetételét a lokális szennyező források közvetlenül meghatározzák. A szennyezők terjedését és kiülepedését meghatározó meteorológiai tényezők már nagyobb földrajzi egységeket kapcsolhatnak össze. Esetünkben olyan elemek koncentrációját is figyelembe vettük, melyek a talajok eróziója révén válhatnak a szállóporok összetevőivé (pl. Al, Ca, Mg). Az egymáshoz térben közel fekvő városok, Antwerpen és Brüsszel, valamint Debrecen és Nagyvár a por összetételében is hasonlóknak bizonyultak. A Münchent és Kolozsvárt reprezentáló centroidok a többi várostól jelentős távolságban helyezkedtek el a hipertérben.

városok elkülönítésében csekély volt.

A diszkriminancia értékek átlagával (centroidokkal) jellemezni tudjuk a városokat. Egy olyan 7 dimenziós teret hoztunk létre, ahol a koordináta-rendszer tengelyei egymásra merőlegesek. A városokat pontokként ábráztuk. A pontok közötti távolság megadta, hogy mekkora az eltérés a levelekről származó porminták összetételében. A sokváltozós térben kialakult mintázat esetében, a két, ill. háromdimenziós vetületek száma áttekinthetetlenül nagy,¹⁹ ezért a kapcsolatrendszert cluster analízissel vizsgáltuk.

A pontok közötti távolságot négyzetes euklideszi távolságként definiáltuk, csoportképző algoritmusnak a Ward-féle eljárást választottuk,¹⁷ amely jól strukturált dendrogramot eredményez (1. ábra).

Annak ellenére, hogy Debrecentől Nagyvár városstruktúrája, ipara és közlekedése alapján jelentősen eltér (pl. a katalizátoros gépjárművek száma kisebb, még használnak ólomadalékolt benzint) a porminták összetétele alapján ez a két város hasonlított egymáshoz a legjobban.

A diszkriminancia analízissel azt is megvizsgáltuk, hogy milyen a csoportba sorolás helyessége, az elemösszetétel adatok alapján milyen biztonsággal lehet megállapítani egy adott mintáról, hogy mely városból származik. Antwerpen, Brüsszel, München, Várna és Nagybánya esetében az osztályozás 100%-os volt. Átlagosan a minták 94,4%-os valószínűséggel kerültek abba a csoportba, amelybe eredetük szerint soroltuk őket. A levelekről gyűjtött por összetétele jól jellemzi az egyes városokat. Ismert minták alapján meghatározott diszkriminancia függvényekkel elvégezhető ismeretlen minták azonosítása is. Ezt az eljárást alkalmaztuk a Debrecenből gyűjtött minták esetében, amikor 32 mintát ismeretlen eredetűként kezeltünk, és vizsgáltuk a besorolást (4. táblázat).

4. Táblázat. A debreceni és a nagyváradi minták csoportosítása

Város	N	Diszkriminancia értékek szerinti besorolás		
		Debrecen	Nagyvár	Egyéb [#]
Debrecen ^a	13	76,9%	15,4%	7,7% [#]
Nagyvár	11	9,1%	90,9%	0%
Debrecen ^b	32	54,8%	32,3%	12,9%

^a Ismertként kezelt minták besorolása.

^b Az ismeretlenként kezelt minták besorolása

[#] A többi városba tartozóként besorolt minta

Az ismertként kezelt debreceni minták besoroltságának helyessége 76,9%, az ismeretlenként kezeltéknél 54,8% volt. A debreceni minták jelentős hányadának összetétele a nagyváradi mintákkal mutatott egyezést.

A mintákban meghatározott toxikus komponensek koncentrációit összevetve (5. táblázat) megállapíthatjuk, hogy a levegő szennyezettsége Nagybányán volt a legnagyobb, ahol színesfémkohó üzemel. Az ólom maximális koncentrációja meghaladta a 6000 mg/kg-ot, a cink, réz és kadmium koncentrációja is többszörösét mutatta a kevésbé szennyezett területekre jellemző értékeknek. A nehézfémek mellett a kén koncentrációja is jelzi a légszennyezést; a kikötővárosokban volt kiugróan nagy. Debrecen ebben az összevetésben viszonylag kedvező helyen szerepelt.

5. Táblázat. A falevelekről lemosott porban mért elemek koncentrációjának átlagai és az átlagok 95%-os konfidencia intervallumai.

Város	Pb mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Cd mg/kg	S g/kg
Antwerpen	145±56	374±226	70±62	0,19±0,09	5,61±2,67
Brüsszel	153±80	295±158	84±58	0,26±0,19	5,77±3,60
München	7±7	140±64	37±31	0,10±0,10	3,97±1,48
Debrecen	41±10	215±27	59±7	0,51±0,09	3,24±0,51
Nagyvárad	86±17	271±56	91±59	1,63±1,06	4,00±1,36
Várna	355±214	388±96	110±23	0,10±0,07	9,18±1,30
Kolozsvár	135±79	452±162	133±85	2,25±1,52	3,57±0,71
Nagybánya	1475±487	768±194	213±53	5,18±1,41	7,52±1,85

Eredményeink alapján már viszonylag kis mintaszám mellett (városonként 10-20 helyről gyűjtünk mintát), is képet kaphatunk nagyobb régiók légszennyezettségéről. Megfelelő referencia területeket kijelölve az eredmények diszkriminancia analízissel történő kiértékelése olyan függvényeket eredményez, melyek alkalmasak a levegőtisztaság osztályok objektív meghatározására.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet Dr. Tóth Albertnek az angolnyelvű összefoglaló elkészítésében nyújtott segítségéért.

Air quality assessment via discriminant analysis of element composition data on dust collected from tree leaves

Airborne dust deposited on the leaf surface of Tilia trees were collected from cities across Europe and analyzed for concentrations of Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Pb, V and Zn (mg kg⁻¹ d.w. dust). Classification of sampling sites was performed via a multivariate statistical procedure termed linear discriminant analysis (LDA) to characterize air inorganic quality characteristics

Hivatkozások

- Borbély-Kiss, I.; Koltay, E.; Szabó, Gy.; Bozó, L.; Tar, K. *J. Aerosol Sci.* **1999**, *30*, 369.
- Salma, I.; Maenhaut, W.; Zemplén-Papp, É.; Zarái, Gy. *Atmospheric Environment*. **2001**, *35*, 4367.
- Keymeulen, R.; Görgényi, M.; Héberger, K.; Priksane, A.; Van Langehove, H. *Atmospheric Environment*, **2001**, *35*, 6327.
- Kovács M. *A nagyvárosok környezete*. Gondolat Kiadó: Budapest, **1985**.
- Jouraeva, V.A.; Johnson, D.L.; Hassett, J.P.; Nowak, D.J. *Environ. Pollut.* **2002**, *120*, 331.
- Houthuijs, D.; Breugelmans, O.; Hoec, G.; Vaskövi, É.; Miháliková, É.; Pastuszka, J.S.; Jirik, V.; Sachelarescu, S.; Lolova, D.; Meliefste, K.; Uzunova, E.; Marinescu, C.; Volf, J.; de Leeuw, F.; van de Wiel, H.; Fletcher, T.; Leuret, E.; Brunekreef, B. *Atmospheric Environment*, **2001**, *35*, 2757.
- Temesi, D.; Molnár, A.; Mészáros, E.; Feczko, T.; Gelencsér, A.; Kiss, G.; Krivácsy, Z. *Atmospheric Environment*, **2001**, *35*, 4347.
- Temesi, D.; Molnár, A.; Mészáros, E.; Feczko, T. *Atmospheric Environment*, **2003**, *37*, 139.
- Ismail, S.; Grass, K.; Varmuza, K. *J. Trace Microprobe Tech.* **1988**, *6*, 563.
- Einax, J.W.; Soldt, U. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **1999**, *46*, 79.
- Horvay Gy., Ed.; *Sokváltozós adatelemzés (Kemometria)*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, **2001**, pp 32-68.
- Baldovin, A.; Wen, W.; Massart, D.L.; Turello, A. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **1997**, *38*, 25.
- Zimmer, K. *In Archaeometric Research in Hungary*; Járó, M.; Költő L., Eds.; National Centre of Museums: Budapest, **1988**, pp 131-140.
- Worth, A.P.; Cronin, M.T.D. *J. of Molecular Structure*, **2003**, *622*, 97.
- Kovács, B.; Prokisch, J.; Palencsár, J. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.* **2000**, *31*, 1949.
- Palmer, J. *Világjárók lexikona*. Reader's Digest Kiadó Kft., Budapest, **1998**, pp. 10-757.
- Norusis, M.J. *SPSS/PC+ Advanced Statistics 4.0 for IBM PC/XT/AT and PS/2*. SPSS Inc. Chicago, **1990**, pp 1-38.
- Salma, I.; Maenhaut, I.; Dubtsov, S.; Zemplén-Papp, É.; Záray, Gy. *Microchem. J.*, **2000**, *67*, 127.
- Smolinski, A.; Walczak, B.; Einax, J.W. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **2002**, *64*, 45.

and their relationships and the role of each element in differentiating between the cities. Our results suggest that elemental composition of leaf-trapped dust reflect various environmental factors including local pollution sources (industry, traffic), city structure and climatic/meteorological features, and can be used as a reliable indicator in air quality assessment and monitoring on local to regional spatial scales.