

Испитивање магнетске суцептибилности прашине антропогеног порекла

Дубравка Новичић, Весна Цветков, Весна Дамњановић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Испитивање магнетске суцептибилности прашине антропогеног порекла | Дубравка Новичић, Весна Цветков, Весна Дамњановић | VII Меморијални научни скуп из заштите животне средине доцент др Милена Далмација Нови Сад, 01-02. април 2019 | 2019 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005716>

ISPITIVANJE MAGNETSKE SUSCEPTIBILNOSTI PRAŠINE ANTROPOGENOG POREKLA

Dubravka Novičić¹, Vesna Cvetkov², Vesna Damnjanović³

^{1,2,3}Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Dušina 7, Beograd
dubravka.novicic@rgf.bg.ac.rs

Izvod

Veštački nastali magnetični minerali, naročito magnetit, čiji izvori mogu biti različite grane industrije, saobraćaj, sezonsko grejanje i dr., značajno utiču na zagađenje životne sredine. U datom radu prikazani su rezultati merenja magnetne susceptibilnosti magnetita antropogenog porekla na filterima na jedanaest lokacija u dve države. Merenja koncentracije prašine ovih feromagnetičnih minerala mogu se koristiti kao indikator prostorne distribucije zagađenja.

Ključne reči: magnetska susceptibilnost, PM_{10} , $PM_{2.5}$, zagađenje životne sredine, monitoring.

Uvod

Zagađujuće materije u vazduhu se dele na primarna jedinjenja koja se emituju direktno iz izvora i sekundarna jedinjenja koja nastaju interakcijom dva ili više primarnih jedinjenja ili u reakciji sa sastavnim delovima atmosfere. Većina primarnih zagađujućih jedinjenja, uključujući i suspendovane čestice (*particulate matter* – PM) su posledica ljudskih aktivnosti [1]. Postoji određena vrsta povezanosti teških metala sa magnetskom susceptibilnošću χ , tj. merenja χ mogu se koristiti kao indikator zagađenja i teškim metalima pre detaljnih geoheimijskih analiza. U urbanim sredinama, gde je kontaminacija PM visoka vrši se biomonitoring χ (na lišću, paukovim mrežama, lišajevima, ili filterima (specijalno postavljenim na određenim mestima) i drugim površinama (snegu).

Magnetit je najvažniji prirodni magnetični mineral na Zemlji a javlja se u kontinentalnoj i u okeanskoj kori kao primarni ili sekundarni mineral u magmatskim, sedimentnim i metamorfnim stenama. U zemljištima i sedimentima može rezultirati usled aktivnosti bakterija. Međutim, može nastati kao veštački mineral u atmosferi u procesu sagorevanja ili drugih industrijskih procesa. Prašina koja potiče iz prirode uglavnom sadrži male količine gvoždevitih minerala i stoga su njene vrednosti χ veoma niske. Ako prašina sadrži gvožđe ili okside gvožđa antropogenog porekla, čak i u malim koncentracijama, njihovo prisustvo će značajno povećati vrednosti χ [2]. Najveći zagađivač u Srbiji je energetski sektor (nepovoljna struktura raspoloživih energenata, tehnološka zastarelost i neadekvatno održavanje, niska energetska efikasnost, nizak stepen korišćenja potencijala obnovljivih izvora energije). Zagađivači su i drumski saobraćaj (posebno teška vozila i autobusi) i neke od grana industrije (rafinerije nafte i naftnih derivata, hemijske fabrike i metalurški kompleksi, fabrike prehrambene industrije itd.) [3]. Zagađivači gvožđem su železare, termoelektrane, fabrika za prerađu čelika i ruda. Često su povezani i sa prisustvom toksičnih teških metala kao što su olovo, cink, bakar, hrom, nikl, molibden, kadmijum i dr. [4]. S obzirom na to da se magnetometrijskom metodom lako mogu detektovati magnetični zagađivači i da to uglavnom nisu destruktivni postupci, njena primena u procesu zaštite životne sredine je sve veća.

Suspendovane čestice

PM u vazduhu predstavlja mešavinu čvrstih i tečnih aerosola različitih veličina, morfologije i hemijskog sastava iz različitih izvora [5]. Za razliku od drugih zagađujućih supstanci u vazduhu, koje su podeljene na osnovu njihovog hemijskog sastava, suspendovane čestice se klasifikuju na osnovu njihovih veličina: „krupne” (2,5 - 10 μm); „fine” (0,1 - 2,5 μm); i „ultra fine” ($\leq 0,1 \mu\text{m}$).



U praksi se one dele na: PM_{10} čestice (torakalne čestice prečnika manjeg od 10 μm koje mogu da dospeju u gornje delove respiratornog sistema; $PM_{2,5}$ čestice (respirabilne čestice prečnika manjeg od 2,5 μm , koje mogu da dospeju u donje delove respiratornog sistema); i $PM_{0,1}$ čestice prečnika manjeg ili jednakog 0,1 μm , koje predstavljaju najveću opasnost za čoveka jer najdublje prodiru u pluća. Čestice različitih klasa imaju različito poreklo i fizičko-hemijska svojstva kao i različit uticaj na čoveka. Frakcija grubih čestica je prvenstveno sastavljena od atmosferske prašine koja je suspendovana usled mehaničkog krunjenja granularnog materijala kao na primer asfaltiranih i neasfaltiranih puteva, poljoprivrednih aktivnosti, građevinskih radova i prirodnih procesa. Industrijski procesi kao mlevenje, brušenje i druge aktivnosti takođe u izvesnoj meri doprinose frakciji grubih čestica prisutnih u vazduhu. Većina finih čestica je poreklom od procesa vezanih za sagorevanja. Fine čestice se kategorišu kao primarne ili sekundarne. Primarne čestice su one koje se emituju u obliku čvrste faze tokom sagorevanja gasova na visokim temperaturama. Značajan deo ovih čestica je sastavljen od poluisparljivih jedinjenja koji formiraju organske aerosole. Sekundarne čestice nastaju tokom nukleacije, kondenzacije i koagulacije azotovih i sumpornih oksida, amonijaka i isparljivih organskih jedinjenja (prisutni u vazduhu kao gasovita zagađujuća jedinjenja) i uglavnom pripadaju klasi $\leq PM_{2,5}$ (US EPA, 2004).

Nakon emisije odigravaju se fizičke, hemijske i fotohemijske promene čestica, koje utiču na njihovo dalje ponašanje i atmosfersku koncentraciju. Emitovane čestice se uglavnom ne zadržavaju u blizini izvora emisije već se raznose na velike razdaljine, u zavisnosti od njihove veličine, zatim topografije terena i meteoroloških uslova, posebno pravca i brzine vetra i vertikalnih i horizontalnih termalnih gradijenata. Veće čestice se uglavnom talože i na taj način uklanjaju iz vazduha, bliže izvorima emisije, dok se čestice veličine manje od 10 μm prenose na velike razdaljine i često ostaju u vazduhu od nekoliko dana do nekoliko meseci. Velika pažnja se posvećuje mobilnosti i transportu čestica na regionalnom nivou a uočene su razlike i u sezonskoj distribuciji čestica. Čestice u urbanim sredinama se u najvećoj meri sastoje od elementarnog ugljenika koji formira jezgro čestice a potom i od metala, organskih jedinjenja i materijala biološkog porekla [6]. Udeo čestica u vazduhu na različitim lokacijama može da se razlikuje do tri reda veličine, što ukazuje na veliki uticaj lokalnih izvora. PM u vazduhu uzrokuju ozbiljne zdravstvene posledice kod izložene populacije (respiratorna i kardiovaskularna oboljenja, rak pluća). Mortalitet koji se dovodi u vezu sa zagađenjem vazduha je oko 15-20 % veći u gradovima sa višim nivoima zagađenja, u poređenju sa čistijim gradovima. Veoma male čestice prodiru veoma duboko u respiratorni sistem i dospevaju do sistema cirkulacije i tim putem dolaze do različitih organa. Osim toga, ove čestice često sadrže toksične elemente u tragovima. Mešavina komponenti zagađenja vazduha obuhvata i teške metale koji se emituju u atmosferu, na primer, živa ili olovo. Ovi ostaju u vazduhu dok se ne vrata u zemlju kišom. Mnogi teški metali su izuzetno neurotoksični za ljudsko telo, posebno za decu. Izlaganje olovu u detinjstvu može da rezultira sniženim kognitivnim funkcionisanjem, uključujući i procenu vremena reagovanja, skeniranje i izvršno funkcionisanje kod odraslih, odnosno, kognitivnu fleksibilnost i apstraktno rezonovanje. Izlaganje olovu može da utiče i na govornu memoriju i tačnost govora. Agresivnost, problematično ponašanje (kao što su depresija i poremećaji spavanja) i povećano antisocijalno i delikventno ponašanje su takođe u pozitivnoj korelaciji sa izlaganjem olovu. Kod dece postoji i rizik od razvitka hroničnih bolesti u kasnijem životu, uključujući gojaznost, dijabetes i vrste raka povezanog sa hormonima kao što su rak prostate i rak dojke.

Tokom poslednjih decenija primenjene su brojne mere i uvedeni su standardi kvaliteta vazduha u zakonodavstvu Evropske unije sa ciljem smanjenja koncentracije čestica u vazduhu i njihovog uticaja na ljudsko zdravlje i životnu sredinu. U okviru LRTAP konvencije definisana je obaveza izveštavanja na nacionalnom nivou o emitovanim količinama PM_{10} čestica, što podrazumeva poznavanje emitovanih količina PM_{10} čestica, kao i doprinosa pojedinačnih sektora njihovoj emisiji. Takođe, propisana je i granična vrednost prosečne godišnje koncentracije PM_{10} , koja iznosi 40 $\mu g m^{-3}$ i dnevna granica koncentracije PM_{10} , koja ne sme da se pređe tokom više

od 35 dana u godini i koja iznosi $50 \mu\text{g m}^{-3}$. U zakonu Republike Srbije propisane su iste dnevne i godišnje granične vrednosti kao i u Evropskoj uniji.

Magnetska susceptibilnost

Jedna od najčešće korišćenih fizičkih veličina za karakterisanje magnetskih svojstava materijala je magnetska susceptibilnost χ [7]. χ je kvantitativna mera mogućnosti materijala da bude magnetizovan u primenjenom magnetskom polju H . Razlikujemo tri vrste χ : masenu χ_m , zapreminsku χ_v i molarnu χ_{mol} , koje su definisane sledećim jednačinama, respektivno:

$$\chi_v = \frac{M}{H} \quad \chi_m = \frac{\chi}{\rho} \quad \chi_{\text{mol}} = \chi_m V_{\text{mol}}, \quad (1)$$

gde je M – magnetizacija, ρ - gustina a V_{mol} – molarna zapremina. Uprkos široko rasprostranjenoj upotrebi, χ je složeni parametar koji odražava doprinos mineralnih materijala koji zadržavaju snažnu remanentnu magnetizaciju u odsustvu primenjenog polja (feromagnetični materijali, kao na primer magnetit, maghemit), koji zadržavaju slabu remanentnu magnetizaciju (npr. antiferomagnetični materijali kao što su hematit i getit) i oni koji nisu magnetični (uključuju paramagnetike (npr. silikati, gline) i diamagnetike (npr. kvarc, karbonati). Ako su prisutne ultra fine superparamagnetične čestice, frekvencija primenjenog polja naizmenične struje ima značajan efekat u smislu primenjenog magnetskog polja. Na višim frekvencijama, energija toplotnih fluktuacija smanjuje efekat poravnjanja sa primenjenim poljem a samim tim i χ izmerena na višim frekvencijama uvek je jednaka ili niža od one izmerene na nižim frekvencijama [8]. Merenjem na različitim frekvencijama, frekventna zavisnost magnetske susceptibilnosti $\chi_{\text{FD}}\%$ (FD – *frequency dependent*) se može izraziti kao [9]:

$$\chi_{\text{FD}} \% = \left(\chi_{\text{LF}} - \frac{\chi_{\text{HF}}}{\chi_{\text{LF}}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

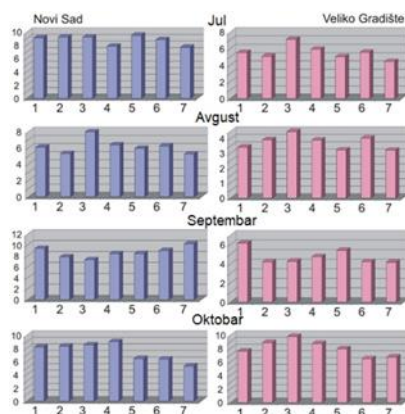
gde je χ_{HF} magnetska susceptibilnost na višim frekvencijama a χ_{LF} magnetska susceptibilnost na nižim frekvencijama. χ koja zavisi od frekvencije nije karakteristična za čvrste stene ili vulkanski pepeo ali je karakteristična za tla u kojima se sekundarni magnetski minerali formiraju kao rezultat pedogeneze i požara. Prema tome, prirodnu χ sedimenta treba meriti na dve ili više različitih frekvencija kako bi se dobila informacija o količini i veličini zrna magnetita. Simultanim merenjem χ i χ_{FD} može se napraviti razlika između aktivnog povećanja ferimagnetičnih minerala tokom pedogeneze od pasivnog povećanja izazvanog ispiranjem nemagnetičnih komponenti u horizontu koji je bogat humusom. Stoga, paralelno povećanje χ i χ_{FD} ukazuje na sekundarno poreklo, dok varijacije χ koje nisu povezane sa odgovarajućom varijacijom χ_{FD} označavaju doprinos ferimagnetičnih minerala primarnog porekla.

Veliki broj ekoloških istraživanja danas zasniva se na merenju χ jer magnetski podaci služe kao početne informacije za rezultate dobijene tradicionalnom hemijskom analizom.

Rezultati i diskusija

Merenje χ predstavljena u ovom radu su izvršena na filterima za sakupljanje suspendovanih čestica manjih od $10 \mu\text{m}$ (na takozvanim PM_{10} filterima) sa dve stanice u Republici Srbiji i devet stanica u Republici Mađarskoj, na osnovu čega je izvršeno upoređivanje rezultata dobijenih iz dve zemlje. Lokacija uzorkovanja u Srbiji su Novi Sad i Veliko gradište. Na ovim stanicama su sakupljane PM_{10} čestice iz 55 m^3 vazduha koji se pumpao kroz sistem svaki dan. Magnetske susceptibilnosti filtera su merene u dve laboratorije, Paleomagnetnoj laboratoriji geološkog i geofizičkog instituta Mađarske i Republičkog geodetskog zavoda Srbije na različitim instrumentima (KLY-2 i MKF1-A Kappabridge kompanije AGICO). Merna stanica u Novom Sadu nalazi se u centru grada, gde postoji veliki promet vozila. Stanica Veliko Gradište je na granici sa Rumunijom (znatna količina saobraćaja i na putu i na reci), odakle istočni vetar

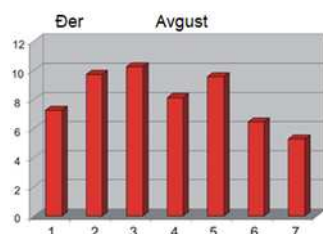
može dovesti zagađenje koje potiče od rumunske industrije u Srbiju. Pre i posle merenja uzoraka, izmerena je i magnetska susceptibilnost držača, plastične kesice i neiskorišćenog filtera. Dobijena vrednost χ je oduzeta od merenih vrednosti kako svi pomenuti predmeti ne bi uticali na rezultate. Provera uzoraka u različitim laboratorijama je pokazala da su vrednosti merene u dve laboratorije prilično bliske za filtere sa vrednostima χ u opsegu od 10^{-5} SI ili više, ali za filtere koji su imali χ manju od 10^{-5} SI, očitavanja u laboratoriji u Beogradu su imala veće smetnje nego u Budimpešti. Iz toga se moglo zaključiti da je potrebno izmeriti χ za jedan isti filter od 10 do 20 puta kada je χ -i ispod određenog nivoa. Srednja vrednost svih merenja je uzeta kao referentno merenje za dati uzorak. Za magnetska istraživanja životne sredine kompatibilnost rezultata je veoma značajna, s obzirom na to da je koncentracija magnetskih zagađivača proporcionalna χ_m i u funkciji je veličine zrna. S obzirom na to da su se vrednosti merenja u ove dve laboratorije poklopile, to čini solidnu osnovu za upoređivanje količine zagađenja u Srbiji i Mađarskoj. Kako bi mogle da se porede vrednosti χ u Mađarskoj i Srbiji, neophodno je i uvođenje parametra korekcije, jer je zapremina vazduha pumpanog kroz stanice za sakupljanje suspendovanih čestica manjih od $10 \mu\text{m}$ u Mađarskoj 13,09 puta veća nego u Novom Sadu i Velikom Gradištu. Izmerene vrednosti predstavljaju prividne vrednosti χ jer pri merenju nije uzeta u obzir ni zapremina, niti masa zagađivača. Pri merenju χ , instrument podrazumeva da je zapremina uzorka 10 cm^3 , što za filtere nije slučaj (pri merenju magnetske susceptibilnosti zemljišta, lišća i dr. je znatno lakše pripremiti tačnu zapreminu uzorka). Merenje prividne χ može biti u prednosti u odnosu na χ_m kada su uzročnici zagađenja magnetični minerali nastali usled grejanja tokom zime. Grejanje na ugalj ili drva povećava masu PM_{10} čestica i blago uvećava vrednosti prividne χ , dok χ_m opada. Povećanjem vrednosti prividne χ se lakše uočava prisustvo zagađivača. Nažalost, najzagađenija tri filtera iz Velikog Gradišta (uzorci od petka do nedelje u avgustu) nisu bila dostupna za merenja χ , jer su uzorci odmah analizirani na sadržaj teških metala što je sprečilo bilo koju drugu vrstu analiza. Stepenn magnetskog zagađenja u Novom Sadu, izražen u vrednostima prividne χ i kumulativno prikazan za svaki dan u nedelji za jul, avgust, septembar i oktobar varira između 6×10^{-6} i 10×10^{-6} SI, dok su u Velikom Gradištu vrednosti između 3×10^{-6} i 9×10^{-6} SI (kao što je ranije rečeno, bez uzoraka sa najvećem zagađenjem).



Slika 1. Kumulativna prividna magnetska susceptibilnost podeljena sa brojem dana sakupljanja filtera za sakupljanje suspendovanih čestica manjih od $10 \mu\text{m}$ sa stanica u Novom Sadu i Velikom Gradištu. Brojevi na vertikalnoj osi prikazuju prividnu magnetsku susceptibilnost (10^{-6} SI) a brojevi na horizontalnoj osi (1-7) dane u nedelji (ponedeljak - nedelja)

U podacima iz Novog Sada (Slika 1, levo) postoji nedeljna tendencija manjeg magnetskog zagađenja nedeljom nego radnim danima, osim tokom septembra. Druga karakteristika podataka je da ne postoji značajna razlika između stepena zagađenja u različitim mesecima. Opservacije su sasvim drugačije za Veliko Gradište (Slika 1, desno), jer nedeljom nije manje magnetski zagađeno u odnosu na ostale dane u nedelji. Kod podataka za Veliko Gradište se uočavaju i povećane vrednosti χ sredom (osim u septembru) a uzročnik zagađenja nije poznat. Avgust je

manje zagađen magnetskim česticama (čak i ako se izračuna sa gubitkom jednog seta najzagađenijih uzoraka) u odnosu na ostala tri meseca. Za mađarske stanice postoje setovi podataka za sva četiri godišnja doba (filteri se prikupljaju za dve sedmice u februaru, maju, avgustu i novembru) više od dve godine. Zbog toga je moguće proceniti koliko koji uzročnik doprinosi zagađenju (bilo da je to saobraćaj, sezonsko grejanje domaćinstava, industrija itd). Iako u Srbiji nije vršeno uzorkovanje za tako dug vremenski period kao za Mađarsku, poređenjem podataka koji su dobijeni u periodu od jula do oktobra može da se zaključi da je stepen zagađenja magnetskim česticama u Novom Sadu i Velikom Gradištu uporediv sa vrednostima dobijenim u gradu Đeru (Győr) u Mađarskoj što se može uočiti na slici 2. Grad Đer se odlikuje velikom stopom saobraćaja. Najveća razlika u odnosu na grad Đer je da se u Novom Sadu i Velikom Gradištu ne javljaju manje vrednosti χ tokom vikenda. Izmerene vrednosti prividne χ prikupljene na dve srpske stanice predstavljaju pouzdani marker stepena antropogenog zagađenja. Podaci su ograničeni na samo četiri meseca, tako da nije izvršen monitoring u toku grejne sezone. Takođe, nedostaju i podaci o masi PM_{10} , o smeru kretanja vetra u toku ispitivanih meseci, o temperaturama i padavinama u ispitivanom periodu. Iz tog razloga nije moguće tačno odrediti iz kog izvora potiču najveća zagađenja i da li najviše potiču iz saobraćaja kako rezultati sugerišu.



Slika 2. Kumulativna prividna magnetska susceptibilnost podeljena sa brojem dana sakupljanja filtera za sakupljanje suspendovanih čestica manjih od $10 \mu m$ sa stanice u Đeru. Brojevi na vertikalnoj osi prikazuju prividnu magnetsku susceptibilnost (10^{-6} SI), a brojevi na horizontalnoj osi (1-7) dane u nedelji (ponedeljak - nedelja)

Dobijeni rezultati mogu da se integrišu sa rezultatima hemijskih i mineraloških analiza koje mogu da se izvode na česticama respektivnih filtera, kao i sa meteorološkim podacima i da se tako poveća pouzdanost zaključaka koji se odnose na doprinos različitih izvora zagađenja. Na dugi vremenski period, monitoring zagađenja merenjem χ može znatno da smanji ukupnu cenu detekcije zagađenja u Srbiji.

Zaključak

Zagađenje predstavlja ozbiljan problem i u Srbiji jer utičući na životnu sredinu ugrožava zdravlje populacije i vodi ka smanjenju obima poljoprivredne proizvodnje. Jedna od metoda merenja količine magnetičnih suspendovanih čestica, prečnika manjeg od $10 \mu m$, antropogenog porekla je i određivanje magnetske susceptibilnosti prašine na filterima ili biomonitorima. Metoda je brza, jeftina i pruža mogućnost prikupljanja velike količine podataka neophodnih za statističku i grafičku interpretaciju prostornih raspodela magnetskih parametara koji su vezani za antropogene zagađivače. Merenja magnetske susceptibilnosti nam mogu omogućiti: identifikaciju gvoždevitih minerala koji su prisutni u uzorku; računanje njihove koncentracije ili ukupne zapremine sa visokom tačnošću; klasifikaciju različitih vrsta materijala i identifikaciju procesa njihovog formiranja ili transporta. Veličine gvoždevitih minerala, takođe, zavise i od vrste zagađivača pa je moguće utvrditi šta predstavlja najveći uzročnik zagađenju na nekom određenom području. Najveća prednost monitoringa magnetske susceptibilnosti je što je merenje izuzetno jednostavno i praktično jer: merenje se može vršiti na svim materijalima; merenja su bezbedna, brza i nedestruktivna; merenja se mogu vršiti u laboratoriji ili na terenu uz minimalnu obuku i merenja dopunjuju mnoge druge vrste analiza životne sredine. S obzirom na to da se veliki broj uzoraka može meriti ekonomično i bez ograničavajućih naknadnih analiza, merenja



magnetske susceptibilnosti su idealna pri rekognostičkim studijama gde je potreban veliki set uzoraka kako bi se pronašli „prosečni“ ili „tipični“ uzorci za druge, skuplje analize ili analize koje dugo traju. Merenja vršena *in situ*, na terenu, ubrzavaju proces povezivanja podataka sa terenskim opservacijama, što je veoma važno za ljude koji rade u udaljenim područjima daleko od laboratorija.

Literatura

- [1] Pacyna, J. M., Pacyna, E. G. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 9, 269-298.
- [2] Márton, E., Lesić, V., *et al.* (2012). First magnetic measurements on PM10 filters from two stations in Serbia and comparison of the results with those from nine Hungarian stations. In: Geosciences and Environment. *The 3rd International Professional Conference*, 27-29 May 2012, Belgrade, Serbia.
- [3] Pejić, B. (2015). Zagađenje vazduha kao determinanta ekološke bezbednosti Srbije. *Zbornik radova - Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu*, 63, 1-30.
- [4] Petrovský E., Kapička A., *et al.* (2000). Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environ. Geol.*, 39, 312-318.
- [5] Vallero D. A. (2008). *Fundamentals of air pollution*. London: Elsevier Inc., 942.
- [6] Pandey, J. S., Kumar, R., *et al.* (2005). Health risks of NO₂, SPM and SO₂ in Delhi (India). *Atmospheric Environment*, 39, 6868-6874.
- [7] Liu, Q., Roberts, A.P. *et al.* (2012). Environmental magnetism: Principles and applications, *Rev. Geophys.*, 50.
- [8] Dearing, J. (1999). *Environmental magnetic susceptibility, Using the Bartington MS2 System*. Kenilworth, England: Chi Publishing, 54.
- [9] Basavaiah, N. (2011). *Geomagnetism: Solid Earth and Upper Atmosphere Perspectives*. Singapur: Springer Publisher, 486.