

Улаанбаатар хотын 2017-2019 оны агаарын тоосонцрын бохирдлын эх үүсвэрийг эерэг матрицын факторчлалын аргаар тодорхойлох нь

А. Маралмаа*, Д. Шагжжамба, Д. Болортуяа

Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн физикийн судалгааны төв

Энэхүү судалгаанд Улаанбаатар хотын 2017–2019 оны өвлийн улиралд цуглуулсан $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын нийт 176 дээжид агуулагдах 17 химийн элемент болон хар нүүрстөрөгчийн өгөгдлийг ашиглан агаарын тоосонцрын эх үүсвэрүүдийг эерэг матрицын факторчлалын аргаар тодорхойлов. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын хувьд таван эх үүсвэр тодорхойлогдсон бөгөөд эдгээр нь хөрс (34.8%, 59.2%), нүүрсний шаталт (39.8%, 18.1%), авто тээвэр (8.1%, 8.5%), нефть (4.4%, 2.7%) болон үйлдвэрлэлийн гаралтай эх үүсвэрүүд (12.9%, 11.6%) байв.

Түлхүүр үгс: Агаарын бохирдол, Бохирдлын эх үүсвэр, Эерэг матрицын факторчлал (ЭМФ), Positive Matrix Factorization (PMF)

I. ОРШИЛ

Сүүлийн 20 гаруй жилд Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын түвшин, ялангуяа хүний амьсгалын замаар гүн нэвтэрч, эрүүл мэндэд хортой нөлөө үзүүлдэг $PM_{2.5}$ (диаметр нь 2.5 микрометрээс бага) болон $PM_{10-2.5}$ (диаметр нь 5–10 микрометрийн хооронд) тоосонцрын агуулга аюултай түвшинд хүрсэн. 2017–2018 оны өвлийн улиралд $PM_{2.5}$ -ийн дундаж агуулга ДЭМБ-ын зөвлөмжөөс 34 дахин өндөр байсан нь Улаанбаатарыг дэлхийн хамгийн их бохирдолтой хотуудын нэг болохыг харуулж байна [1].

Улаанбаатар хот нь уулсаар хүрээлэгдсэн, далайн түвшнээс дээш 1350 метрийн өндөрт оршдог тул өвлийн улиралд температурын инверс үүсэж, бохирдуулагч бодисууд газрын гадаргад хуримтлагдан агаарын солилцоо саатдаг [2]. Мөн хотын хүн амын дийлэнх нь төвлөрсөн дулаан хангамжид холбогдоогүй гэр хороололд амьдардаг бөгөөд эдгээр өрхүүд нүүрс, мод болон бусад биомассын түлш хэрэглэдэг [3, 4]. Үүний улмаас хүйтний улиралд гэр хорооллын галлагаанаас үүдэлтэй агаарын бохирдол эрс нэмэгдэж, $PM_{2.5}$ -ийн агуулга дулаан улиралтай харьцуулахад дунджаар 7 дахин өсдөг [5].

Иймд агаар мандал дахь тоосонцрын эх үүсвэрүүдийг нарийвчлан тодорхойлох, хувь хэмжээг тоон утгаар үнэлэх нь байгаль орчны бодлого боловсруулах, агаарын чанарыг

сайжруулах, мөн хүн амын эрүүл мэндийг хамгаалах стратеги төлөвлөлтийн үндэс суурь болдог.

МУИС-ийн харьяа Цөмийн физикийн судалгааны төв нь Улаанбаатар хотын агаар дахь тоосонцрын судалгааг 2005 оноос хойш тогтмол явуулж ирсэн ба эх үүсвэрийг тодорхойлохдоо АНУ-ын Байгаль Орчныг Хамгаалах Агентлагаас (EPA) боловсруулсан, DOS үйлдлийн системд суурилсан Эерэг Матрицын Факторчлал - ЭМФ (Positive Matrix Factorization-PMF) загварыг ашигладаг байсан. Харин энэ удаагийн судалгаанд EPA-гийн боловсруулсан Windows үйлдлийн системд ажилладаг эерэг матрицын факторчлалын PMF 5.0 хувилбар бүхий программ хангамжийг [6, 28] ашигласнаар тоосонцрын эх үүсвэрүүдийг илүү нарийвчилсан, олон бүрэлдэхүүнт байдлаар ялган тодорхойлох боломж бүрдсэн. Мөн үр дүнгийн найдвартай байдлыг үнэлэх зорилгоор Bootstrap, DISP болон BS-DISP зэрэг баталгаажуулалтын аргуудыг ашигласнаар эх үүсвэрийн хувь хэмжээ болон элементийн агуулгын алдааг илүү нарийвчлалтай тодорхойлох боломжтой болсон нь өмнөх хувилбараас илүү дэвшилтэт, шийдэл болсон юм

Энэхүү судалгаанд 2017–2019 оны өвлийн улиралд Улаанбаатар хотоос цуглуулсан $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын 176 дээжид агуулагдах 17 химийн элемент болон хар

*Э-шуудан: maralmaa_a@num.edu.mn

нүүрстөрөгчийн агуулгын өгөгдлийг ашиглаж, тоосонцрын эх үүсвэрүүдийг ЭМФ статистикийн аргаар ялган тодорхойлох, тэдгээрийн хувь хэмжээг тоон утгаар үнэлэхийг зорьсон.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Улаанбаатар хотын Баянзүрх дүүргийн 13-р хороо нь 2019 оны байдлаар 3144 өрхтэй [34], гэр хороолол болон орон сууцны хосолсон бүтэцтэй, гол зам дагуу оршдог бөгөөд хөрсний элэгдэл болон түлшний шаталтаас үүдэлтэй агаарын бохирдлын төвшнөөр өндөр зэрэглэлийн бүсэд хамаардаг. Тухайн бүс дэх Монгол Улсын Их Сургуулийн харьяа Цөмийн физикийн судалгааны төвийн хэмжилтийн цэгээс агаарын тоосонцрын дээжийг цуглуулсан.

Дээжийг Gent төрлийн дээжлэгч төхөөрөмжөөр цуглуулсан. Уг төхөөрөмж нь PM₁₀ импактор бүхий хэмжээ сонгогч оролт, шүүлтүүрийн нэгж (Stack Filter Unit, SFU), сорох насос, агаарын урсгал хэмжигч зэрэг бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс бүрдэнэ. SFU нь хоёр төрлийн поликарбонат шүүлтүүр ашигладаг [35]. Дээд талын 8 μm нүхтэй шүүлтүүр нь 10–2.5 μm диаметртэй бүдүүн ширхэгт тоосонцрыг (PM_{10–2.5}), доод талын 0.4 μm нүхтэй шүүлтүүр нь 2.5 μm ба түүнээс жижиг диаметртэй нарийн ширхэгт тоосонцрыг (PM_{2.5}) тус тус шүүнэ [4]. Шүүлтүүрийн диаметр 47 мм бөгөөд дээжийг MNS 6547:2015 стандартаар долоо хоногт хоёр удаа, 24 цагийн турш тасралтгүй, дунджаар 16 л/мин хурдтайгаар соруулав [29]. 2017-2019 оны өвлийн улиралд буюу 1, 2, 3, 10, 11, 12 дугаар сард нийт 176 агаарын тоосонцрын дээж цуглуулсан.

Герман улсын Аметек компанийн өндөр мэдрэх чадвартай, энергиэр ялгах SPECTRO XEPOS рентген флуоресценцийн спектрометрээр элементийн агуулгыг тодорхойлсон. Энэхүү систем нь вакуум нөхцөлд найман төрлийн туйлширсан болон хоёрдогч бай бүхий Mo, Co, Al₂O₃, HOPG байнуудыг сонгон ашиглаж, Na-аас U хүртэлх элементүүдийг 1–100 нг/см³ илрүүлэх хязгаарт нэгэн зэрэг тодорхойлох чадвартай.

Тоосонцрын дээж дэх хар нүүрстөрөгч (BC)-ийн агуулгыг үзэгдэх гэрлийн сарнил ба шингээлтийн зарчимд суурилсан M43D рефлектометр ашиглан тодорхойлсон. Үүний тулд цэвэр шүүлтүүр болон тоосонцор шүүсэн шүүлтүүр тус бүрийн гэрлийн ойлтын утгыг хэмжиж, дараах тэгшитгэлээр (1) тооцоолсон.

$$BC = \frac{1000 \times \log \left(\frac{R_u}{R_t} \right) + 2.39}{45.8} \quad (1)$$

Энд R_u нь цэвэр шүүлтүүрийн дундаж ойлтын утга (энэ нь ойролцоогоор 100-тай тэнцүү), R_t нь тоосонцор шүүсэн шүүлтүүрийн ойлтын утга бол 2,39 ба 45,8 нь тогтмол коэффициент ба дээжийг авч буй шүүлтүүрийн хувьд тогтмол хэмжигдэхүүн болно[30].

A. Эерэг матрицын факторчлалын арга

Энэ судалгаанд АНУ-ын Байгаль орчны хамгааллын агентлагаас боловсруулсан эерэг матрицын факторчлалын (ЭМФ) аргыг ашиглав. Энэхүү арга нь хүлээн авагч загварчлалын аргачлалд тулгуурладаг. Судалгааны хүрээнд PM_{2.5} болон PM_{10–2.5} тоосонцрын эх үүсвэрийг тодорхойлж, тэдгээрийн хувь хэмжээг тооцоолсон. Загварчлалд PMF 5.0 хувилбарыг ашигласан болно.

ЭМФ болон бусад хүлээн авагч загварууд нь нэг үндсэн тэгшитгэл дээр тулгуурладаг. Энэ тэгшитгэл нь масс тэнцвэрийн зарчим дээр суурилсан бөгөөд дараах тэгшитгэлээр (2) илэрхийлэгдэнэ.

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

x_{ij} — i-р дээж дэх j-р химийн элементийн агуулга;

g_{ik} — i-р дээжид k-р эх үүсвэрийн оруулсан хувь хэмжээ;

f_{kj} — k-р эх үүсвэрт хамаарах j-р элементийн хувь хэмжээ;

e_{ij} — үлдэгдэл;

p — Эх үүсвэрийн тоо

ЭМФ загвар нь олон шийдтэй байх боломжтой бөгөөд g болон f параметруудийг олон удаагийн давталтаар өөрчлөн тохируулж, зорилтот функц болох Q-ийн хамгийн бага утгыг хайх замаар оновчтой шийдлийг

тодорхойлдог. Q нь загварын тохирлын хэмжигдэхүүн бөгөөд хэмжилтийн үлдэгдлийн квадратуудын нийлбэрийг илэрхийлдэг. Энэхүү утгыг дараах тэгшитгэлээр (3) тооцно.

$$Q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

u_{ij} — i -р дээж дэх j -р элементийн хэмжилтийн алдаа;
 n — дээжийн тоо;
 m — элементийн тоо.

PM_{2.5} болон PM_{10–2.5}-ийн хувьд 3–8 эх үүсвэр бүхий загваруудыг харьцуулан үнэлсний үндсэн дээр 5 эх үүсвэр бүхий загвар нь PM_{2.5} болон PM_{10–2.5} аль алинд нь хамгийн оновчтой хувилбар хэмээн тодорхойлсон.

Хэмжилтийн өгөгдлийг загварчлалд ашиглахаас өмнө ЭМФ загвар дахь Signal to Noise (S/N) харьцаанд үндэслэн шүүж, ангилсан. Энэхүү харьцаа нь хэмжилтийн бодит утга ба санамсаргүй алдааны хамаарлыг илтгэх бөгөөд өгөгдлийн найдвартай байдлыг үнэлэх үндсэн үзүүлэлт болдог. S/N харьцааны утга 0.5-аас бага бол “муу,” 0.5–1.0-ийн хооронд байвал “сул,” харин 1.0-ээс дээш бол “сайн” гэж ангилна [6].

PM_{2.5} болон PM_{10–2.5} тоосонцрын хувьд нийт 17 төрлийн химийн элементийг (BC, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb) эх үүсвэрийн загварчлалд хамруулсан. Загварчлалын үр дүнд Cl болон Cu элементүүд “муу” (bad) хувьсагчид гэж үнэлэгдэн, загвараас хасагдсан. Харин PM_{2.5} тоосонцорт BC, PM_{10–2.5} тоосонцорт Na, Al, Si, S, Ca, BC зэрэг элементүүд нь “сул” (weak) хувьсагчид гэж тодорхойлогдсон.

Тоосонцрын нийт массыг Reconstructed Mass (RCM) аргаар үнэлж, уг аргаар тоосонцрын бүрэлдэхүүн дэх хувьсагч бүрийг нийт масст хамааруулан тооцсон. RCM арга нь өгөгдлийн чанарыг сайжруулж, массын тэнцвэрийг хангах замаар эх үүсвэрийн хувь хэмжээг илүү нарийвчлалтай тодорхойлох боломжийг бүрдүүлдэг [7]. RCM арга нь тоосонцрын нийт массын 80–95%-ийг тайлбарлах чадвартай болох нь хэд хэдэн судалгаагаар тогтоогдсон [8, 9].

ЭМФ загварчлалд нэмэлт загварын эргэлзээг (extra modeling uncertainty) 3%-иар тооцоолсон бөгөөд энэ нь агаар мандал дахь химийн урвал болон хэмжилтийн санамсаргүй алдаанаас үүдэлтэй тодорхойгүй байдлыг илэрхийлдэг. Энэхүү хувь хэмжээг 0–20%-ийн мужид өөрчлөн тохируулж, загварын гүйцэтгэлд үзүүлэх нөлөөллийг үнэлэх боломжтой [6].

Б. ЭМФ загварын үнэмшил

ЭМФ загварын үр дүнгийн үнэн зөв, найдвартай байдлыг тооцоолох зорилгоор Bootstrap (BS), Displacement (DISP) болон BS-DISP гэсэн статистик аргачлалуудыг ашигладаг [6]. Эдгээр аргууд нь загварын статистик тогтвортой байдал, эх үүсвэрүүдийн ялгаатай байдал, мөн эх үүсвэрүүдийн тоог үнэн зөв тодорхойлсон эсэхийг үнэлдэг.

Bootstrap (BS) арга

Загварын үр дүнгийн тогтвортой байдлыг үнэлэхэд Bootstrap тооцоололд суурилсан BS Mapping аргыг ашигласан. Давталтаар үүссэн эх үүсвэрүүдийг анхдагч загварын эх үүсвэрүүдийн химийн элементийн найрлага болон орон зайн тархалттай харьцуулан дүн шинжилгээ хийсэн. Эх үүсвэр хоорондын нийцтэй байдал 80%-иас дээш байвал тухайн эх үүсвэрийг тогтвортой, найдвартай гэж үздэг [10].

Displacement (DISP) арга

Загвараар тооцоологдсон хамгийн бага Q утгын хэлбэлзлийг үнэлэх зорилгоор эх үүсвэрүүдийн хувь хэмжээнд бага хэмжээний өөрчлөлт оруулан, Q утгын тогтвортой байдлыг тодорхойлсон. Хэрэв хэлбэлзэл 5%-иас бага байвал тухайн эх үүсвэрийг загварын хувьд тогтвортой, найдвартай гэж үзнэ. Мөн загварчлалын явцад алдааны код 0 гарсан тохиолдолд эх үүсвэрүүдийн хооронд солигдол (swap) үүсээгүй болохыг илтгэнэ [6].

BS-DISP (Bootstrap-Displacement) арга

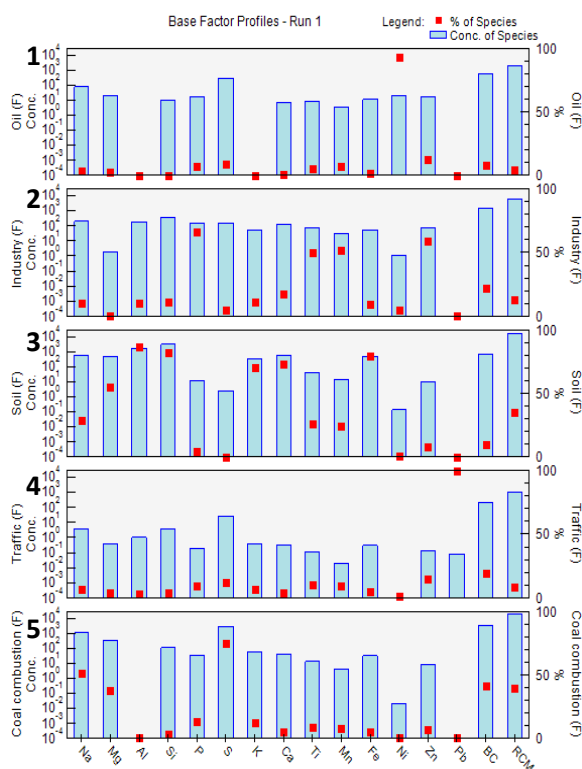
Загварын статистик тогтвортой байдал болон хэлбэлзлийг хамтад нь үнэлэх зорилгоор BS-DISP аргыг ашиглав. Энэ арга нь эх үүсвэрүүдийн ялгаатай байдал болон бүрэлдэхүүний тогтвортой байдлыг илүү нарийвчлалтай үнэлэхэд чухал ач холбогдолтой. Хэрэв тооцооллын үр дүнгийн

давхцлын хэмжээ 90%-иас дээш байвал тухайн загварыг найдвартай гэж үздэг [6, 11].

III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

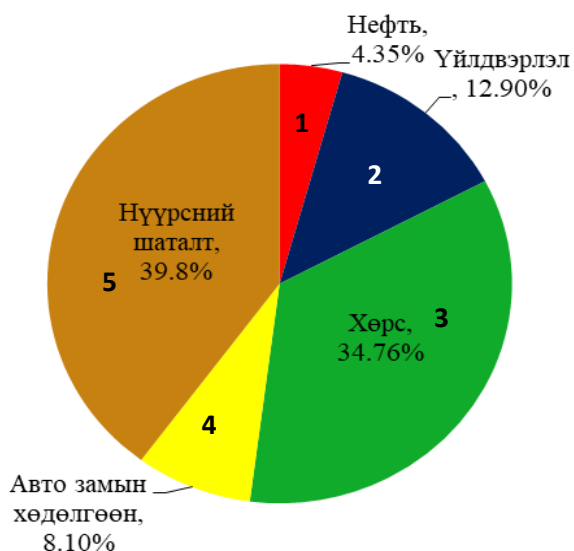
А. $PM_{2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэр

Улаанбаатар хотын $PM_{2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэрийг тодорхойлохдоо эх үүсвэр бүрд хамаарах онцлог химийн элементүүдийн хувь оролцоо болон тархалтын хэв шинжийг харьцуулан үнэлсэн. Үүний үр дүнд хөрс, нүүрсний шаталт, үйлдвэрлэл, авто замын хөдөлгөөн болон нефть бүтээгдэхүүний хэрэглээтэй холбоотой эх үүсвэрүүд илэрсэн. Агаарын бохирдлын эх үүсвэр тус бүрийн нийт эзлэх хувь, мөн эх үүсвэр тус бүрд илэрсэн химийн элементийн агуулга ба тухайн элементийн эзлэх хувь хэмжээг Зураг 1а, 1б-д үзүүлэв.



Зураг 1а. $PM_{2.5}$ тоосонцрын химийн элементийн агуулга (цэнхэр өнгөөр) ба эзлэх хувь хэмжээ (улаан өнгөөр)

Зураг 1а-ийн эхний графикаас харахад Ni (93.2%) өндөр агуулгатайгаар илэрч гол маркер элемент болох нь харагдав. Ni-ийн өндөр агуулгыг нефть боловсруулах үйлдвэр болон шатахууны хэрэглээ, ялангуяа нефтийн бүрэн бус шаталтаас үүсэх бохирдуулагчтай холбон тайлбарладаг [4, 12].



Зураг 1б. $PM_{2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэрүүдийн эзлэх хувь хэмжээ

Иймд 1-р графикайн эх үүсвэрийг нефть бүтээгдэхүүнээс гаралтай гэж үзэж болох бөгөөд нийт $PM_{2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэрийн 4.35%-ийг бүрдүүлж байв.

Хоёр дахь эх үүсвэр нь нийт $PM_{2.5}$ -ийн 12.9%-ийг бүрдүүлж байсан бөгөөд P (66.7%), Mn (52.1%), Ti (50.3%), Zn (59.0%) зэрэг хүнд металлын агуулгаар үйлдвэрлэлийн гаралтай эх үүсвэр болохыг тодорхойлсон. Эдгээр элементүүд нь металл боловсруулалт болон барилгын материалын үйлдвэрлэлээс үүсэх ба үйлдвэржилт, бүтээн байгуулалт эрчимтэй явагдаж буй бүс нутагт өндөр агуулгаар илэрдэг [4, 13].

Гурав дахь эх үүсвэр нь нийт $PM_{2.5}$ -ийн 34.8%-ийг эзэлж байсан ба Al (86.8%), Si (82.5%), Fe (79.1%), Ca (73.2%), Mg (55.4%) зэрэг хөрсний гаралтай элементүүдийн өндөр агуулгаар илэрсэн. Эдгээр элементүүд нь газрын гадаргын элэгдэл болон салхины нөлөөгөөр үүсэх тоосжилтын эх үүсвэртэй нийцэж байна. Монгол орны өвлийн улиралд хөрсний тоосжилт нэмэгдэх нь хуурай уур амьсгал, хөрсний хөлдөлт, цасны нимгэн бүрхүүл (5–10 см), мөн салхины эрчим зэрэг газарзүйн болон цаг уурын хүчин зүйлсээс шалтгаалдаг. Мөн гэр хорооллын нүүрсний дутуу шаталтаас үүсэх хөө, тортог хөрсөнд хуримтлагдаж, салхины үйлчлэлээр агаарт дэгдэн хоёрдогч эх үүсвэр болох нөхцөлийг бүрдүүлдэг [4, 14, 15].

Дөрөв дэх эх үүсвэр нь нийт $PM_{2.5}$ -ийн 8.1%-ийг бүрдүүлж байна. Энэхүү эх үүсвэрийн

хартугалгын хэмжээ харьцангуй өндөр агуулгатай илэрсэн. Pb-ийн өндөр агуулга нь авто тээврийн хэрэгслээс гарах утаа, дугуй ба тоормосны элэгдэл, мөн замын гадаргын тоосжилттой холбоотой бөгөөд хөдөлгөөн ихтэй бүсүүдэд илүү өндөр агуулгаар илэрдэг [13, 16]. Мөн BC-ийн 19.3%-ийг дизель хөдөлгүүртэй тээврийн хэрэгслээс гаралтай гэж үзэж болно [31]. Энэхүү үр дүн авто тээврийн эх үүсвэр нь анхдагч болон хоёрдогч бохирдуулагчийг үүсгэх гол хүчин зүйл болохыг илтгэж байна [17]. Дэлхийн хөгжиж буй хотуудтай харьцуулахад Улаанбаатар хотын авто тээврийн нягтрал бага хэдий ч ашиглалтын хугацаа өндөр машины тоо ихсэж буй нь энэ эх үүсвэрийн нөлөөллийг нэмэгдүүлж байна [32].

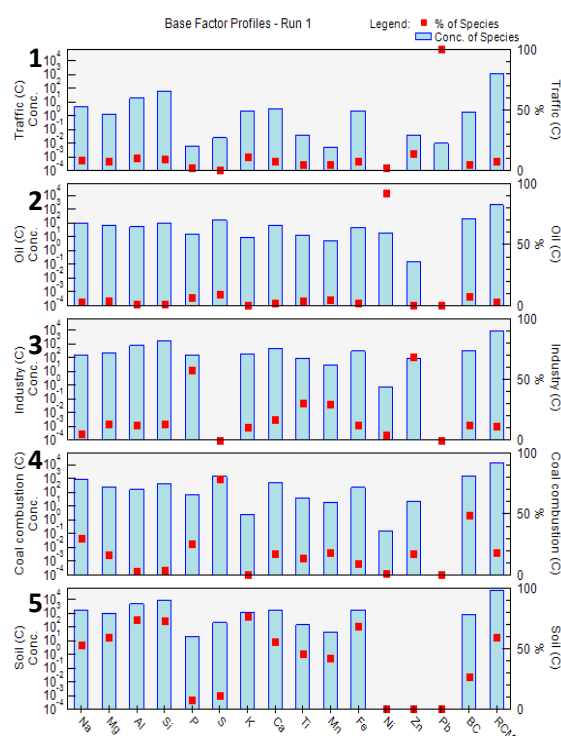
PM_{2.5}-ийн хувьд хамгийн их хувийг буюу 39.8%-ийг нүүрсний шаталтын эх үүсвэр эзэлж байв. Энэ эх үүсвэрийг илтгэх маркер элементүүд болох хар нүүрстөрөгч (BC), хүхэр (S), натри (Na) нь өндөр агуулгаар илэрсэн нь гэр хорооллын нөхцөлд нүүрсний бүрэн бус шаталт явагдаж байгааг харуулж байна. Хар нүүрстөрөгч нь нүүрс шатах үед үүсдэг органик бус нүүрстөрөгчийн гол бүрэлдэхүүн хэсэг бөгөөд агаарт анхдагч тоосонцрын бохирдуулагчийн хувьд чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Харин хүхэр нь шаталтын материалд агуулагдах хүхрийн хэмжээнээс хамааран SO₂ болон хүхэр агуулсан бусад нэгдлүүдийг үүсгэж, агаарын чанарт шууд нөлөөлдөг [4, 18, 16].

Б. PM_{10-2.5} тоосонцрын эх үүсвэр

ЭМФ загварчлалын үр дүнгээс үзэхэд Улаанбаатар хотын PM_{10-2.5} тоосонцрын бүтэц, үүсэл болон тархалтад таван гол эх үүсвэр нөлөөлж байна. Үүнд авто тээврийн хэрэгсэл (8.5%), нефть (2.7%), үйлдвэрлэл (11.6%), хөрс (59.2%) болон нүүрсний шаталт (18.1%) тус тус багтсан. Эдгээр эх үүсвэрийн тоосонцрын нийт эзлэх хувь, мөн тухайн эх үүсвэр бүрд илэрсэн химийн элементийн агуулга болон тухайн элементийн хувь хэмжээг Зураг 2а, 2б-д үзүүлэв.

Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд PM_{10-2.5} дахь авто тээврийн эх үүсвэр нь нийт массын 8.5%-ийг эзэлж байгаа нь PM_{2.5}-д ажиглагдсан 8.1%-

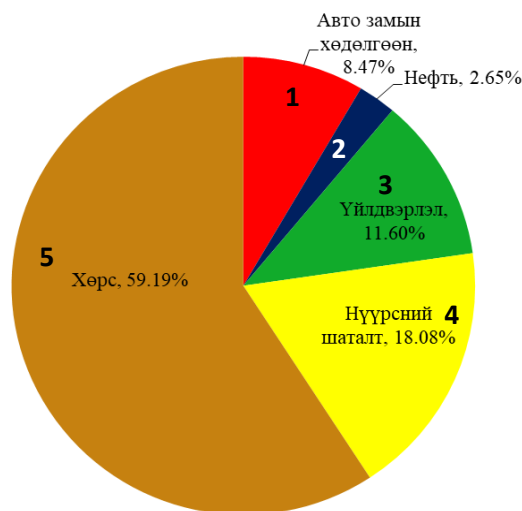
тай ойролцоо байна. Зураг 2б-д Al ба Si-ийн агуулга өндөр байгаа нь PM_{10-2.5} тоосонцор нь механик элэгдэл, замын тоосжилтоос үүсэлтэй болохыг илтгэнэ. Харин PM_{2.5}-дахь тус эх үүсвэрт BC ба S-ийн агуулга давамгайлж буй нь түлшний шаталтын гаралтай бохирдол зонхилж байгааг харуулж байна [19, 20, 21]. Автомашины нийт тоонд дизель хөдөлгүүртэй тээврийн хэрэгсэл харьцангуй бага боловч тэдгээрийн ялгаруулж буй бохирдуулагч бодисын хэмжээ бензин хөдөлгүүртэй тээврийн хэрэгслээс илүү өндөр байх магадлалтай [33]. Энэ чиглэлд нарийвчилсан судалгаа хийх шаардлагатай байна.



Зураг 2а. PM_{10-2.5} тоосонцрын химийн элементийн агуулга (цэнхэр өнгөөр) ба эзлэх хувь хэмжээ (улаан өнгөөр)

Зураг 2б-д үзүүлснээр, хоёр дахь эх үүсвэр нь PM_{10-2.5}-ийн хамгийн бага хувийг буюу 2.7%-ийг бүрдүүлж байна. Энэхүү эх үүсвэрийг нефть болон хүнд тосны шаталтын гаралтай хэмээн тодорхойлсон. Хэдийгээр энэ эх үүсвэрийн нийт агаарын чанарт үзүүлэх хувь хэмжээ харьцангуй бага боловч Монгол Улсын төвлөрсөн дулааны цахилгаан станцуудын зарим нь нөөц горимд мазут ашигладаг тул тодорхой бүс нутагт бохирдуулагчид өндөр агуулгаар үүсэж болзошгүй. Иймээс эдгээр станцуудын орчинд

уг эх үүсвэрийн нөлөөллийг мөн нарийвчлан судлах шаардлагатай.



Зураг 26. $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэрүүдийн эзлэх хувь хэмжээ

Харин үйлдвэрлэлийн эх үүсвэр нь $PM_{10-2.5}$ -ийн 11.6%-ийг эзэлж байв. Үүнд бутлах, нунтаглах, ачих, буулгах, тээвэрлэх зэрэг механик үйл ажиллагаанууд голлох үүрэгтэй [19]. Мөн $PM_{10-2.5}$ дахь P (57.6%) болон Zn (68.1%)-ийн харьцангуй өндөр агуулга нь цементийн үйлдвэр болон үйлдвэрлэлийн механик элэгдэлтэй холбоотой байж болох юм [22, 23]. $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ -д үйлдвэрлэлийн эх үүсвэрийн эзлэх хувь ойролцоо байгаа нь тухайн эх үүсвэр нь зөвхөн нэг төрлийн тоосонцорт бус өргөн хүрээний ширхгийн хэмжээ бүхий тоосонцруудыг зэрэг үүсгэж болзошгүйг харуулж байна.

$PM_{10-2.5}$ -ийн нийт массын 59.2%-ийг хөрсний гаралтай тоосонцор бүрдүүлж байв. Si/Al-ийн 1.9 гэсэн харьцаа нь хөрсний найрлагад хөнгөн цагаан-силикатын эрдсүүд давамгайлж байгааг илтгэж байна [27].

BC/S-ийн харьцаа 0.94 гэж тогтоогдсон нь нүүрсний шаталтаас үүсэлтэй эх үүсвэр давамгайлж байгааг харуулж байгаа [24–26] бөгөөд энэ эх үүсвэр нийт тоосонцрын 18.1%-ийг бүрдүүлж байна.

$PM_{10-2.5}$ болон $PM_{2.5}$ тоосонцорт эх үүсвэрүүдийн эзлэх хувь хэмжээ харилцан адилгүй байгаа нь тэдгээрийн үүсэл гарал

болон ширхгийн хэмжээний ялгаатай холбон тайлбарлаж болох юм.

В. Тооцооллын үнэмшил

Хүснэгт 1 болон Хүснэгт 2-т $PM_{2.5}$ ба $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын эх үүсвэрийг тодорхойлоход ашигласан загварчлалын үр дүнг BS-DISP, DISP, болон BS mapping аргуудаар үнэлж, нэгтгэн харуулав.

BS-DISP үнэлгээний үр дүнгээс харахад $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын тооцооллын үнэмшлийн зэрэг 100% байсан ба Q утгын хэлбэлзэл $PM_{2.5}$ -д -0.12 (-0.01%), $PM_{10-2.5}$ -д -0.17 (-0.05%) байв. Энэ нь статистикийн хувьд загвар тогтвортой байгааг харуулж байна.

DISP шинжилгээгээр $PM_{2.5}$ -ийн Q утгын хэлбэлзэл -0.06 (-0.01%), $PM_{10-2.5}$ -ийх -0.06 (-0.02%) байсан бөгөөд эх үүсвэрүүдийн хооронд солигдол ажиглагдаагүй.

BS Mapping-ийн үр дүнгээс $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ -ийн эх үүсвэр тус бүр бие биеээсээ 100% ялгаатай, харилцан хамааралгүй байна. Энэ нь таван эх үүсвэр тус бүр тодорхой, тогтвортой, бие даасан шинж чанартай болохыг илтгэж байна.

Хүснэгт 1. $PM_{2.5}$ болон $PM_{10-2.5}$ тоосонцрын BS-DISP ба DISP үнэлгээний үр дүн

BS-DISP		
Тоосонцрын төрөл:	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
Зөвшөөрөгдсөн тохиолдлын тоо:	100	100
Зөвшөөрөгдсөн тохиолдлын %:	100%	100%
Q-ын хамгийн их бууралт:	-0.12	-0.17
% dQ:	-0.01	-0.05
Q-ын бууралтын тоо:	0	0
Best Fit -ийн солилцооны тоо:	0	0
DISP дэх солилцооны тоо:	0	0

Факторын солилцоо:	0 0 0 0 0	0 0 0 0
DISP		
Тоосонцрын төрөл:	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
Кодын алдаа:	0	0
Q-ын хамгийн их бууралт:	-0.06	-0.06
% dQ:	-0.01	-0.02
Факторын солилцоо:	0 0 0 0 0	0 0 0 0

Хүснэгт 2. PM_{2.5} болон PM_{10-2.5} тоосонцрын BS mapping үнэлгээний үр дүн

PM _{2.5} тоосонцрын BS Mapping						
Фактор	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	Un
B F-1	100	0	0	0	0	0
B F-1	0	100	0	0	0	0
B F-1	0	0	100	0	0	0
B F-1	0	0	0	100	0	0
B F-1	0	0	0	0	100	0
PM _{10-2.5} тоосонцрын BS Mapping						
Фактор	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	Un
B F-1	100	0	0	0	0	0
B F-1	0	100	0	0	0	0
B F-1	0	0	100	0	0	0
B F-1	0	0	0	100	0	0
B F-1	0	0	0	0	100	0

(F – Factor; B F – Boot Factor; Un – Unmapped)

Хүснэгтүүдээс харахад BS-DISP аргын үр дүнгээр хоёр төрлийн тоосонцрын тооцооллын үнэмшлийн зэрэг 100%, Q утгын хэлбэлзэл маш бага (<0.05%) байна. DISP аргаар эх үүсвэрүүдийн хооронд солигдол ажиглагдсангүй. BS Mapping үнэлгээгээр эх үүсвэрүүд харилцан хамааралгүй, 100% ялгаатай байгаа нь харагдаж байна. Эдгээр үр дүн таван эх үүсвэр тус бүр бие даасан,

тогтвортой шинж чанартай байгааг илтгэж байна.

ДҮГНЭЛТ

1. Энэхүү ажилд Улаанбаатар хотын 2017-2019 оны өвлийн улирлын агаар дахь PM_{2.5} болон PM_{10-2.5} тоосонцрын эх үүсвэрийг Эерэг Матрицын Факторчлалын (PMF 5.0) загвар ашиглан тодорхойлж, эх үүсвэр бүрийн хувь хэмжээг тоон утгаар үнэлэв.
2. Судалгааны үр дүнд дараах таван эх үүсвэр илэрсэн. Үүнд:
 - PM_{2.5}: Хөрсний тоосжилт (34.8%), нүүрсний шаталт (39.8%), үйлдвэрлэл (12.9%), авто замын хөдөлгөөн (8.1%), нефтийн хэрэглээ (4.4%)
 - PM_{10-2.5}: Хөрсний тоосжилт (59.2%), нүүрсний шаталт (18.1%), үйлдвэрлэл (11.6%), авто замын хөдөлгөөн (8.5%), нефтийн хэрэглээ (2.7%)
3. Өмнөх судалгаануудад агаарын тоосонцрын дөрвөн эх үүсвэрийг тодорхойлж байсан [4] бол энэ удаагийн судалгаагаар таван эх үүсвэрийг ялган тогтоосноос нефтийн хэрэглээтэй холбоотой шинэ эх үүсвэрийг илрүүлсэн нь онцлох үр дүн болов.
4. Загварын үнэмшил болон тогтвортой байдлыг BS-DISP, DISP, BS Mapping аргуудыг ашиглан үнэлэхэд тоосонцрын эх үүсвэрүүдийн үнэлгээ өндөр найдвартай, таван эх үүсвэр тус бүр бие даасан, статистикийн хувьд тогтвортой шинж чанартай байгаа нь харагдав.
5. Энэхүү судалгааны үр дүн нь Улаанбаатар хотын агаарын чанарыг сайжруулах бодлого боловсруулахад чухал ач холбогдолтой гэж үзэж байна. Мөн хөрсний бүтэц, бохирдуулагч бодисын орчны эргэлт, цаг уурын нөхцөлийг хамарсан нарийвчилсан судалгааг үргэлжлүүлэх шаардлагатайг онцолж байна.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажилд МУИС-ийн Цөмийн физикийн судалгааны төвийн 2017-2019 оны агаарын чанарын судалгааны өгөгдлийг ашиглав. Тус төвийн Цөмийн аналитик аргын салбарын хамт олонд талархал илэрхийлье.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

[1] World Health Organization, Global urban ambient air pollution database, World Health Organization, Geneva, (2018).

[2] Д.Шагжжамба, Г.Гэрэлмаа, С.Лодойсамба, П.Зузаан. Монгол улсын стандарт(ангилалын код: 13.040.01): MNS 6547 : 2015

[3] П.Зузаан, Д. Шагжжамба, нар, Улаанбаатар хотын агаар дахь $PM_{2.5}$ тоосонцрын бохирдлын харьцуулсан судалгаа (2017, 2020 оны өвөл)

[4] Davy, P. K., Gunchin, G., and Markwitz, A., Air particulate matter source apportionment in Ulaanbaatar, Atmos. Pollut. Res. 2, 126 (2011). [doi:10.5094/APR.2011.016]

[5] D. Enkhmaa, N. Warburton, B. Javzandulam et al., BMC Public Health 17, 472 (2017).

[6] U.S. Environmental Protection Agency, EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 user guide, EPA, Washington, DC, (2014).

[7] J. C. Chow, J. G. Watson, and L. W. Chen, Source apportionment of particulate matter, J. Air Waste Manag. Assoc. 44, 1033 (1994). [doi:10.1080/10473289.1994.10467276]

[8] J. C. Chow, J. G. Watson, and L. W. Chen, Advances in source apportionment of particulate matter, Sci. Total Environ. 490, 101 (2015). [doi:10.1016/j.scitotenv.2014.04.058]

[9] Y. Zhang, J. J. Schauer, and M. Fraser, Source apportionment of $PM_{2.5}$ in urban areas, Environ. Sci. Technol. 47, 113 (2013). [doi:10.1021/es303431w]

[10] A. Reff, S. Eberly, and P. Paatero, Evaluation of PMF model performance, J. Air Waste Manag. Assoc. 57, 146 (2007). [doi:10.1080/10473289.2007.10465313]

[11] G. Norris, R. Vedantham, and K. Wade, EPA PMF 5.0 fundamentals and user guide, EPA, Washington, DC, (2014).

[12] A. Visscher, P. van der Maas, and J. van den Berg, Heavy metal emissions from oil

combustion, Environ. Pollut. 234, 234 (2018). [doi:10.1016/j.envpol.2017.11.078]

[13] G. Gunchin, M. Manousakas, and J. Osan, Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Ulaanbaatar, Atmos. Pollut. Res. 10, 1255 (2019). [doi:10.1016/j.apr.2019.02.008]

[14] D. Jugder, M. Shinoda, and N. Sugimoto, Dust storm contributions to air pollution in Mongolia, Atmos. Environ. 183, 126 (2018). [doi:10.1016/j.atmosenv.2018.04.011]

[15] L. Natsagdorj, D. Jugder, and Y. S. Chung, Air pollution in Ulaanbaatar: Long-term trends, Atmos. Environ. 37, 4751 (2003). [doi:10.1016/j.atmosenv.2003.07.008]

[16] S. Lodoysamba, G. Gunchin, and P. Davy, Air quality and source apportionment in Mongolia, Air Qual. Atmos. Health 9, 611 (2016). [doi:10.1007/s11869-015-0360-6]

[17] T. C. Bond, S. J. Doherty, and D. W. Fahey, Bounding the role of black carbon in the climate system, J. Geophys. Res. Atmos. 118, 5380 (2013). [doi:10.1002/jgrd.50171]

[18] D. Amarsaikhan, H. Badrakh, and P. Davy, Monitoring air pollution in Ulaanbaatar using remote sensing, Environ. Monit. Assess. 186, 8373 (2014). [doi:10.1007/s10661-014-4008-6]

[19] F. Amato, M. Pandolfi, and A. Escrig, Quantifying road dust resuspension in urban environments, Atmos. Environ. 43, 2770 (2009). [doi:10.1016/j.atmosenv.2009.02.040]

[20] X. Querol, A. Alastuey, and S. Rodriguez, PM_{10} and $PM_{2.5}$ source apportionment in the Barcelona metropolitan area, Atmos. Environ. 38, 3327 (2004). [doi:10.1016/j.atmosenv.2004.03.009]

[21] Y. Zhang, J. J. Schauer, and M. P. Fraser, Source apportionment of fine particulate matter, Environ. Sci. Technol. 49, 104 (2015). [doi:10.1021/es504625a]

[22] T. M. De Kok, H. A. Driece, and J. G. Hogervorst, Toxicological assessment of PM from industrial sources, Environ. Sci. Technol. 40, 2601 (2006). [doi:10.1021/es051732r]

[23] T. Moreno, X. Querol, and A. Alastuey, Identification of chemical tracers in urban PM sources, Sci. Total Environ. 408, 2367 (2010). [doi:10.1016/j.scitotenv.2010.02.033]

[24] J. G. Watson, Visibility: Science and regulation, Air & Waste Management Association, Pittsburgh, (2002).

- [25] J. P. Putaud, F. Raes, and R. Van Dingenen, European aerosol phenomenology, *Atmos. Environ.* 38, 2579 (2004). [doi:10.1016/j.atmosenv.2004.01.049]
- [26] U.S. Environmental Protection Agency, Speciation trends network report, EPA, Washington, DC, (2005).
- [27] D. R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics, 73rd ed., CRC Press, Boca Raton, (1992).
- [28] P. Paatero, Positive matrix factorization: A non-negative factor model, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 37, 23 (1997). [doi:10.1016/S0169-7439(96)00047-6]
- [29] G. Ganbat, T.-O. Soyol-Erdene, and B. Jadamba, Recent improvement in particulate matter (PM) pollution in Ulaanbaatar, Mongolia, *Aerosol Air Qual. Res.* 20, 2280 (2020). [doi:10.4209/aaqr.2020.04.0170]
- [30] M.-E. Luvsan, R. Shie, and P. Purevdorj, Air pollution and health effects in Ulaanbaatar, *Environ. Res.* 115, 1 (2012). [doi:10.1016/j.envres.2012.03.005]
- [31] I. Y. Hernández-Paniagua, X. Lopez-Yglesias, A. Mendoza, and L. G. Ruiz-Suárez, Emission factors of black carbon and co-pollutants from diesel vehicles in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.* 17, 15293 (2017). [doi:10.5194/acp-17-15293-2017]
- [32] Монголын Байгаль орчны яам, Улаанбаатар хотын автотээврийн нөлөөлөл ба агаарын чанарын судалгаа, УБ хот, МБОЯ хэвлэл, (2023).
- [33] M. Galbadrah and Ts. Ulziibaatar, Ecological comparative assessment of diesel engines (common rail and conventional diesel engines), *Mong. J. Agric. Sci.* 20, 143 (2017). [doi:10.5564/mjas.v20i01.791]
- [34] Үндэсний статистикийн хороо, “1212.mn – Монгол Улсын статистикийн албан ёсны нэгдсэн портал,” [https://www.1212.mn/mn]
- [35] W. Maenhaut, A. Francois, and J. Cafmeyer, The Gent stacked filter unit (SFU) sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions, *Atmos. Environ.* 27A, 1266 (1993).

Source Apportionment of Air Particulate Matter in Ulaanbaatar City (2017–2019) Using Positive Matrix Factorization

A. Maralmaa, D. Shagjjamba, D. Bolortuya

*Nuclear Research Center, National University of Mongolia,
Enkhtaivnii Urgan Chuluu 122/1, Ulaanbaatar 13330, MONGOLIA*

In the study, the source apportionment of ambient particulate matter was conducted using Positive Matrix Factorization (PMF) based on measurement data from 176 samples of $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$ collected during the winter seasons of 2017–2019 in Ulaanbaatar city. The input dataset included concentrations of 17 chemical elements and black carbon. The PMF results revealed five major sources for both $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$: soil dust (34.8% and 59.2%), coal combustion (39.8%, 18.1%), vehicular emissions (8.1%, 8.5%), petroleum-related sources (4.4%, 2.7%), and industrial emissions (12.9%, 11.6%), respectively.