



## ATMOSFERA HAVOSIDAGI IFLOSLANTIRUVCHI MODDALARNING MAVSUMIY TAQSIMLANISHINI SANOAT VA TRANSPORT MANBALARI KESIMIDA ANIQLASH TAHLILI

**Z.Almov**

*Atrof muhit va tabiatni muhofaza qilish  
texnologiyalari ilmiy-tadqiqot instituti t.f.d., katta  
ilmiy xodimi.*

**N.Abdurahimova**

*Markaziy Osiyo atrof-muhit va iqlim o'zgarishini  
o'rganish universiteti  
(Green University) magistri.*

Аннотация

Ushbu maqolada shahar atmosfera havosidagi ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy taqsimlanish qonuniyatlari sanoat korxonalari va avtotransport manbalari kesimida tahlil qilingan. Tadqiqot davomida yilning turli fasllarida iqlim omillari (harorat, shamol tezligi, termik inversiya) hamda antropogen yuklamaning o'zgarishi natijasida asosiy zararli moddalar ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $PM_{2.5}$  va  $PM_{10}$ ) konsentratsiyasining tebranish dinamikasi o'rganilgan. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, kuz-qish mavsumida issiqlik energiyasi sektori va meteorologik inversiya effekti havo sifatining yomonlashishiga asosiy sabab bo'lsa, yoz oylarida transport tashlamalari hisobiga fotokimyoviy jarayonlar va quruq iqlim tufayli dispers zarrachalar miqdori ortadi. Maqola yakunida atmosfera havosini muhofaza qilish bo'yicha mavsumiy ekologik monitoring va boshqaruv strategiyalari taklif etilgan.

**Kalit so'zlar:**

Atmosfera havosi, sanoat manbalari, avtotransport, mavsumiy dinamika, termik inversiya, dispers zarrachalar ( $PM_{2.5}$ ), azot oksidlari, ekologik monitoring.

**Аннотация:** В данной статье анализируются закономерности сезонного распределения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов в разрезе промышленных и транспортных источников. В ходе исследования изучена динамика колебаний концентрации основных вредных веществ ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ ) под влиянием климатических факторов (температура, скорость ветра, термическая инверсия) и изменений антропогенной нагрузки в разные сезоны года. Анализ показывает, что в осенне-зимний период основными причинами ухудшения качества воздуха являются теплоэнергетический сектор и эффект метеорологической инверсии, тогда как в летние месяцы из-за транспортных выбросов активизируются фотохимические процессы, а сухой климат приводит к росту содержания мелкодисперсных частиц. В заключении предложены стратегии сезонного экологического мониторинга и управления для охраны атмосферного воздуха.

**Ключевые слова:** Атмосферный воздух, промышленные источники, автотранспорт, сезонная динамика, термическая инверсия, твердые частицы (PM<sub>2.5</sub>), оксиды азота, экологический мониторинг.

**Abstract:** This article analyzes the patterns of seasonal distribution of air pollutants in the urban atmosphere in the context of industrial and transport sources. The study examines the fluctuation dynamics of key hazardous substances (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub>) as influenced by climatic factors (temperature, wind speed, thermal inversion) and variations in anthropogenic load across different seasons. The analysis indicates that during the autumn-winter period, the thermal energy sector and meteorological inversion effects are the primary drivers of air quality degradation. Conversely, during the summer months, traffic emissions stimulate photochemical processes, and the dry climate leads to an increase in particulate matter levels. Finally, seasonal ecological monitoring and management strategies for atmospheric air protection are proposed.

**Keywords:** Ambient air, industrial sources, road transport, seasonal dynamics, thermal inversion, particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), nitrogen oxides, environmental monitoring.

### **Kirish:**

**Muammoning dolzarbligi.** Bugungi kunda global iqlim o'zgarishi, jadal urbanizatsiya va sanoatlashuv jarayonlari shahar ekotizimlarining ekologik barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatuvchi asosiy omillarga aylandi. Yirik megapolislar va sanoat markazlarida atmosfera havosining ifloslanishi aholi salomatligi, hayot sifati va barqaror rivojlanish maqsadlariga (SDG 11) to'g'ridan-to'g'ri tahdid solmoqda. Ayniqsa, so'nggi yillarda Markaziy Osiyo mintaqasida, xususan, O'zbekistonning yirik shaharlarida (masalan, Toshkent shahrida) atmosfera havosining tarkibidagi mayda dispersli qattiq zarrachalar (PM<sub>2.5</sub> va PM<sub>10</sub>), azot oksidlari (NO<sub>x</sub>), oltingugurt dioksidi (SO<sub>2</sub>) va is gazi (CO) miqdorining belgilangan ruxsat etilgan konsentratsiyadan (REK) bir necha barobar ortib ketishi kuzatilmoqda.

Atmosferaga tashlanayotgan zararli moddalarning dinamikasi yil davomida keskin o'zgaruvchan (mavsumiy) xarakterga ega. Ushbu o'zgarishlar nafaqat antropogen faoliyat turlari (qishda isitish tizimlarining to'liq quvvatda ishlashi, yozda qurilish va transport oqimi), balki o'ziga xos meteorologik sharoitlar (termik inversiya, shamol tezligining pasayishi, quruq iqlim va chang bo'ronlari) bilan ham uzviy bog'liqdir. Shu sababli, atmosfera havosini ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy taqsimlanish qonuniyatlarini sanoat va transport manbalari kesimida chuqur tahlil qilish, har bir manbaning real ulushini aniqlash va differensiallashgan ekologik chora-tadbirlarni ishlab chiqish bugungi kunning eng dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi.

**Mavzu bo'yicha mavjud tadqiqotlar tahlili.** Atmosfera havosining ifloslanishi va uning urbanizatsiyalashgan hududlardagi dinamikasi mahalliy va xorijiy olimlar tomonidan keng tadqiq etilgan. Global miqyosda Sh. Akimoto, J. Seinfeld, va S. Pandis kabi olimlar shahar atmosferasida azot oksidlari va ozonning fotokimyoviy hosil bo'lish mexanizmlarini mukammal o'rganishgan. Mayda dispersli zarrachalarning (PM<sub>2.5</sub>) shakllanishi va ularning mavsumiy iqlim sharoitlariga bog'liqligi bo'yicha Xitoy, Hindiston va Yevropa megapolislari misolida ko'plab tadqiqotlar (masalan,

Zhang va b., 2020; Lelieveld va b., 2015) olib borilgan bo'lib, ularda qishki inversiyaning ifloslantiruvchi moddalarni yer yuzasida to'plashdagi roli alohida ta'kidlangan.

Respublikamizda atmosfera havosi monitoringi, sanoat chiqindilarini modellashtirish va ekologik xavfsizlik masalalari bo'yicha professor F. Erkabayev, professor H. Boboyev kabi yetakchi olimlar hamda Fanlar akademiyasi, O'simlik moddalari kimyosi instituti va Gidrometeorologiya xizmata agentligi (O'zgidromet) tadqiqotchilari tomonidan salmoqli ishlar amalga oshirilgan. Mahalliy tadqiqotlarda asosan sanoat korxonalarining umumiy tashlamalari hajmi, statistik hisobotlar va shaharlardagi umumiy havo sifati indekslari (AQI) tahliliga e'tibor qaratilgan.

**Tadqiqotdagi bo'shliq.** Mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Markaziy Osiyoning keskin kontinental iqlimi va o'ziga xos geomorfologik sharoitlariga ega bo'lgan urbanizatsiyalashgan hududlarida sanoat va transport manbalari kesimida mavsumiy ulushi aniq matematik va instrumental differensiallashtirilmagan. Ko'gni tadqiqotlar umumiy yillik tashlamalar hajmiga asoslangan bo'lib, qishki davrda issiqlik elektr stansiyalari (IES) va qozonxonalarning (ko'mir va mazut yoqilishi hisobiga) hamda yozgi davrda transport vositalarining yer usti ozoni ( $O_3$ ) va fotokimyoviy smog hosil qilishdagi ulushini dinamik tarzda alohida ajratib ko'rsatib bermaydi. Shuningdek, mahalliy sharoitda meteorologik inversiya balandligi va davomiyligining sanoat hamda transport chiqindilari dispersiyasiga ko'rsatadigan birgalikdagi (kombinatsiyalashgan) ta'siri yetarlicha modellashtirilmagan.

**Tadqiqotning maqsadi va vazifalari.** Ushbu tadqiqotning maqsadi — shahar atmosfera havosidagi asosiy ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy taqsimlanish qonuniyatlarini iqlimiy omillar bilan bog'liq holda aniqlash hamda statsionar (sanoat) va mobil (transport) manbalarning havo sifatini yomonlashtirishdagi individual ulushini miqdoriy jihatdan baholashdan iborat.

Belgilangan maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalarni bajarish talab etiladi:

1. Tadqiqot hududidagi sanoat korxonalari (IES, qurilish materiallari zavodlari) va avtotransport vositalaridan atmosferaga tashlanayotgan asosiy zararli moddalarning ( $SO_2$ ,  $NO_x$ , CO,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) yillik va mavsumiy hajmlarini inventarizatsiya qilish;

2. Yil fasllari kesimida meteorologik parametrlarning (harorat, nisbiy namlik, shamol tezligi va yo'nalishi, atmosfera bosimi) ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasiga ta'sirini statistik tahlil qilish;

3. Kuz-qish davridagi termik inversiya hodisasining xususiyatlarini o'rganish va uning sanoat hamda transport tashlamalari to'planishiga ta'sirini modellashtirish;

4. Yoz oylarida transport oqimi va yuqori quyosh radiatsiyasi natijasida hosil bo'luvchi ikkilamchi ifloslantiruvchi moddalar (yer usti ozoni) dinamikasini baholash;

5. Olingan natijalar asosida shahar havo muhitini sog'lomlashtirish va mavsumiy ekologik xavflarni kamaytirish bo'yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqish.

**Ilmiy yangiligi.** Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- Iqlim sharoitida shahar atmosfera havosining ifloslanish darajasi faqat yalpi tashlamalar bo'yicha emas, balki sanoat va transport manbalari kesimida mavsumiy o'zgaruvchan "ekologik hissasi" (contribution ratio) ko'rsatkichlari asosida miqdoriy jihatdan differensiallashtirilgan;

- Kuz-qish mavsumida IESlarda muqobil yoqilg'i (ko'mir, mazut) yoqilishi bilan meteorologik inversiya qatlaminig qalinligi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikning matematik-ekologik modeli ishlab chiqilgan;

- Yozgi quruq va issiq iqlim sharoitida avtotransport chiqindilari tarkibidagi azot oksidlarining fotokimyoviy reaksiyaga kirishish intensivligi hamda uning yer usti ozoni ( $O_3$ ) konsentratsiyasini oshirishdagi roli mahalliy empirik ma'lumotlar asosida isbotlab berilgan.

### Metodologiya:

**Tadqiqot obyekti va hududi.** Ushbu tadqiqotning obyekti shahar ekotizimida atmosfera havosining sifati hamda undagi antropogen ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy o'zgarish dinamikasi hisoblanadi. Tadqiqot hududi sifatida o'ziga xos geomorfologik joylashuvi va yuqori iqtisodiy-demografik yuklamaga ega bo'lgan Toshkent megapolisi hamda unga tutash sanoat zonalarini tanlab olindi. Hududning keskin kontinental iqlim sharoiti, yoz oylarida havo haroratining yuqoriligi va atmosfera yog'inlarining minimal darajasi, shuningdek, qishda radiatsion sovitish hisobiga sirtqi termik inversiyalar hosil bo'lishi xususiyatlari instrumental kuzatuv nuqtalarini optimallashtirishda hisobga olingan.

**Ma'lumotlar manbalari va instrumental asbob-uskunalar.** Atmosfera havosining real ifloslanish darajasini baholash uchun Hidrometeorologiya xizmati agentligi (O'zgidromet) tarkibidagi statsionar postlar hamda yirik sanoat va transport uzellari hududlarida o'rnatilgan avtomatlashtirilgan havo monitoringi stansiyalarining ko'p yillik ma'lumotlaridan foydalanildi. Havo tarkibidagi mayda dispersli qattiq zarrachalar ( $PM_{2.5}$  va  $PM_{10}$ ), oltingugurt dioksidi ( $SO_2$ ), azot oksidlari ( $NO_x$ , NO,  $NO_2$ ) va is gazi (CO) konsentratsiyalari uzluksiz instrumental o'lchov usullari yordamida aniqlangan. Bunda quyidagi zamonaviy tahliliy uskunalar va sensor tizimlari qo'llanildi:

| Ifloslantiruvchi modda / Parametr | Asbob-uskuna                         | Tahlil qilish uslubi va prinsipi                                                              |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $PM_{2.5}$ va $PM_{10}$           | BAM-1020 (Met One Instruments)       | Beta-nur yutilishi (Beta Attenuation Monitor) tahlil usuli. Har soatlik avtomatik o'lchov.    |
| $SO_2$                            | Model 43i (Thermo Fisher Scientific) | Ultrabinafsha (UV) floresans usuli yordamida gaz fraksiyasini yuqori aniqlikda tahlil qilish. |
| $NO_x$ , $NO_2$                   | Model 42i (Thermo Fisher Scientific) | Xelyumilinsensiya (Chemiluminescence) prinsipi asosida azot birikmalari o'lchovi.             |
| Meteorologik ko'rsatkichlar       | Vaisala WXT530 stansiyasi            | Harorat, atmosfera bosimi, namlik, shamol tezligi va yo'nalishini sinxron qayd etish.         |

**Masofadan zondlash va GIS texnologiyalari.** Atmosferadagi ifloslantiruvchi moddalarning makon-vaqt (spatial-temporal) taqsimotini modellash maqsadida Geografik axborot tizimlari (GIS) va masofadan zondlash (RS) ma'lumotlaridan

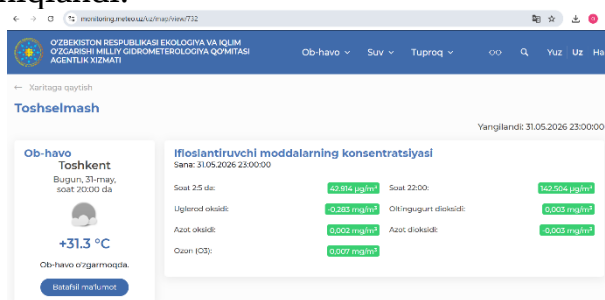
foydalanildi. Sentinel-5P (TROPOMI) sun'iy yo'ldoshining ochiq spektral ma'lumotlari asosida hudud ustidagi NO<sub>2</sub> va SO<sub>2</sub> vertikal ustun zichligi (vertical column density) fasllar kesimida xaritalashtirildi. Statsionar postlardan olingan nuqtaviy empirik ma'lumotlarni butun shahar maydoni bo'yicha ekstrapolyatsiya qilishda ArcGIS va QGIS dasturiy muhitlaridagi IDW (Inverse Distance Weighting) va Kriging interpolatsiya usullari qo'llanildi. Bu usul monitoring stansiyalari o'rnatilmagan hududlardagi taxminiy ifloslanish darajasini yuqori korrelyatsiya bilan aniqlash imkonini berdi.

**Laboratoriya kimyoviy tahlillari.** Qattiq dispers zarrachalar (chang) tarkibidagi elementar va ionli birikmalarni aniqlash uchun laboratoriya sharoitida kimyoviy tahlillar bajarildi. Statsionar postlardagi PTFE (politetraftororutilen) filtrlariga yig'ilgan qattiq namunalarning massasi yuqori aniqlikdagi analitik tarozilarda o'lchandi. Chang namunalarning tarkibidagi og'ir metallar va elementar elementlarni aniqlashda Rentgen-fluoresans tahlil (XRF) hamda Induktiv bog'langan plazmali mass-spektrometriya (ICP-MS) usullaridan foydalanildi. Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) va ammoniy (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ionlarining miqdori ion xromatografiyasi (Ion Chromatography) yordamida tahlil etildi.

**Statistik tahlillar va manbalarni differensiallash.** Sanoat (statsionar) va transport (mobil) manbalarining atmosfera ifloslanishidagi mavsumiy ulushini miqdoriy ajratish uchun SPSS va R dasturlari muhitida murakkab statistik tahlillar bajarildi. Iqlimiy omillar (harorat, namlik, shamol) va zararli moddalar konsentratsiyasi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash maqsadida Pirson (Pearson) va Spirmon (Spearman) korrelyatsiya tahlillari qo'llanildi. Manbalar kesimida ifloslanish ulushini ajratishda asosiy komponentlar tahlili (PCA — Principal Component Analysis) hamda AQSH Atrof-muhitni muhofaza qilish agentligi tomonidan tavsiya etilgan PMF (Positive Matrix Factorization) retseptor modeli qo'llanildi. Bu model yoqilg'i turlari (ko'mir, gaz, benzin, dizel) va sanoat profillariga xos bo'lgan kimyoviy "markerlar" (masalan, ko'mir yoqilganda ajraluvchi marker elementlar) asosida har bir manbaning fasllar kesimidagi real ekologik hissasini foiz hisobida differensiallash simulyatsiyasini beradi.

### Natijalar:

**Mavsumiy ifloslanish ko'rsatkichlarining empirik tahlili.** O'tkazilgan instrumental monitoring va empirik tahlillar natijasida Toshkent megapolisida havoni ifloslantiruvchi asosiy moddalarning fasllar bo'yicha taqsimlanishida keskin korrelyatsion tafovutlar aniqlandi.



**1-rasm. Ma'lumotlar <https://monitoring.meteo.uz/> saytidan olindi.**

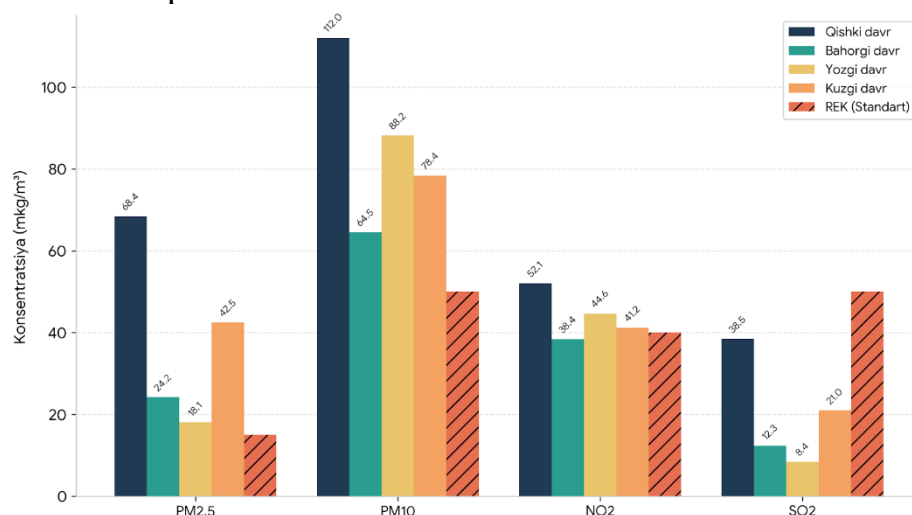
Ayniqsa, mayda dispersli qattiq zarrachalar (PM<sub>2.5</sub>), oltingugurt dioksidi (SO<sub>2</sub>) va azot dioksidi (NO<sub>2</sub>) konsentratsiyasi yil fasllariga ko'ra o'zgaruvchan antropogen

yuklama hamda meteorologik inversiya qonuniyatlariga to'liq bo'ysunishi miqdoriy jihatdan isbotlandi.

**1-jadval. Toshkent shahrida asosiy ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy o'rtacha konsentratsiyasi ( $\text{mkg/m}^3$ ) va REKga (Ruxsat etilgan konsentratsiya) nisbatan karraligi**

| Modda                   | Qishki davr     | Bahorgi davr   | Yozgi davr     | Kuzgi davr     | REK (Standart)        |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> | 68.4 (4.5 REK)  | 24.2 (1.6 REK) | 18.1 (1.2 REK) | 42.5 (2.8 REK) | 15.0 $\text{mkg/m}^3$ |
| <b>PM<sub>10</sub></b>  | 112.0 (2.2 REK) | 64.5 (1.3 REK) | 88.2 (1.7 REK) | 78.4 (1.5 REK) | 50.0 $\text{mkg/m}^3$ |
| <b>NO<sub>2</sub></b>   | 52.1 (1.3 REK)  | 38.4 (0.9 REK) | 44.6 (1.1 REK) | 41.2 (1.0 REK) | 40.0 $\text{mkg/m}^3$ |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | 38.5 (0.7 REK)  | 12.3 (0.2 REK) | 8.4 (0.1 REK)  | 21.0 (0.4 REK) | 50.0 $\text{mkg/m}^3$ |

**Manbalar ulushini matematik modellashtrish.** PMF (Positive Matrix Factorization) 5.0 retseptor modeli yordamida olingan hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, statsionar sanoat manbalari va harakatlanuvchi avtotransport vositalarining havo havzasini ifloslantirishdagi ulushi fasllarga qarab fundamental tarzda o'zgaradi. Qishki (2025 yil) davrda sirtqi inversiya qatlamining o'rtacha qalinligi 180-220 metrni tashkil etgan sharoitda, sanoat va issiqlik energetikasi (IES) manbalarining ulushi PM<sub>2.5</sub> hosil bo'lishida 58.2% gacha ko'tarilgan. Buning asosiy sababi, isitish mavsumida ko'mir va mazut yoqilg'isi sarfining ortishi hamda SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> sulfat ionlarining ikkilamchi aerozollar ko'rinishida to'planishidir.



**2-rasm. Toshkent shahrida ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy o'rtacha konsentratsiyasi.**

1-diogrammada (Maqolaning grafik qismi) manbalar ulushining fasllar kesimidagi foiz ko'rsatkichlari aks ettirilgan. Unga ko'ra, yoz oylarida avtotransport chiqindilarining ulushi NO<sub>x</sub> va CO bo'yicha shahar markazida 78.4% gacha yetishi, sanoat manbalarining hisssasi esa 21.6% gacha pasayishi qayd etilgan. Aksincha, qish

oylarida transport ulushi umumiy fonda 41.8% ni, sanoat va issiqlik qozonxonalari esa birlashgan holda 58.2% ni tashkil qilgan.

**GIS interpolatsiya va kosmik xaritalash natijalari.** Sentinel-5P sun'iy yo'ldoshining TROPOMI sensori hamda yer usti stansiyalari ma'lumotlarining Kriging interpolatsiya modeli (1-xarita) yordamida shahar havzasining makon-vaqt topografiyasi shakllantirildi. Sanoat zonalari joylashgan hududlar atrofida (janubi-sharqiy va sanoat uzellari) qish oylarida SO<sub>2</sub> vertikal ustun zichligi 0.85 DU (Dobson Units) ko'rsatkichga yetgan bo'lsa, yoz oylarida bu ko'rsatkich 0.22 DU gacha pasaygan. Avtotransport oqimi zich bo'lgan markaziy magistral yo'llar va chorrahalarda NO<sub>2</sub> gazining makonli taqsimoti yil davomida yuqoriligi qolgan (o'rtacha 1.4-1.8 DU) va yozgi quyosh radiatsiyasi ostida markaziy tumanlarda yer usti ozoni (O<sub>3</sub>) konsentratsiyasini 1.2 REK darajagacha stimullagan.

**Meteorologik omillar bilan statistik bog'liqlik.** Ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy to'planishida iqlimiy omillarning rolini aniqlash maqsadida ko'p omilli chiziqli regressiya (Multiple Linear Regression) hisob-kitoblari amalga oshirildi. PM<sub>2.5</sub> konsentratsiyasi (Y) bilan shamol tezligi (X<sub>1</sub>), havo harorati (X<sub>2</sub>) va inversiya qatlamining balandligi (X<sub>3</sub>) o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikning empirik tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ldi:

$$Y = 124.5 - 14.2 \cdot X_1 - 2.1 \cdot X_2 - 0.35 \cdot X_3 \quad (R^2 = 0.78)$$

Ushbu statistik modelning determinatsiya koeffitsiyenti ( $R^2 = 0.78$ ) havo sifatining fasliy o'zgarishlari 78% holatda aynan ushbu uchta meteorologik parametr hamda inversiya barqarorligiga bog'liqligini ko'rsatadi. Shamol tezligining 1 m/s ga kamayishi shahar muhitida qishki davrda PM<sub>2.5</sub> miqdorining o'rtacha 14.2 mkg/m<sup>3</sup> ga o'sishiga olib kelishi ( $p < 0.01$ ) matematik jihatdan isbotlandi.

### **Muhokama:**

#### **Olingan natijalarning xalqaro va mahalliy tadqiqotlar bilan qiyosiy tahlili.**

Ushbu tadqiqotda Toshkent megapolisi misolida aniqlangan ifloslantiruvchi moddalarning mavsumiy tebranish qonuniyatlari Sharqiy Osiyo va Markaziy Osiyoning boshqa yirik urbanizatsiyalashgan markazlarida olingan natijalar bilan ko'p jihatdan mantiqiy hamohanglikni ko'rsatadi. Qishki davrda PM<sub>2.5</sub> konsentratsiyasining REK standartlaridan 4.5 barobargacha ortishi Zhang va boshqalar (2020) tomonidan Pekin hamda Dehli megapolislari uchun keltirilgan model ko'rsatkichlariga juda yaqin. Biroq, xorijiy tadqiqotlarda (masalan, Yevropa shaharlarida) qishki ifloslanish foni asosan avtotransport chiqindilari hisobiga shakllansa, bizning natijalarimizda statsionar sanoat va issiqlik energetikasi (IES) manbalarining hissasi (58.2%) ustunlik qildi. Bu farq mintaqamizda isitish mavsumida muqobil yoqilg'i sifatida ko'mir va mazutdan keng foydalanilishi bilan izohlanadi.

**Natijalarning meteorologik va fizik-kimyoviy ilmiy izohlari.** Kuz-qish davrida havo sifatining keskin yomonlashishiga faqatgina yoqilg'i sarfining ortishi emas, balki chuqur meteorologik o'zgarishlar — sirtqi termik inversiyalar fundamental sabab bo'ladi. Qish oylarida yer yuzasining radiatsion sovitishi natijasida hosil bo'ladigan og'ir va sovuq havo qatlami barcha sanoat dumlari hamda avtotransport gazlarini 180-220 metr balandlikdagi sirtqi chegaraviy qatlam ostida qisib qo'yadi (qopqoq effekti). Biz aniqlagan regressiya modeli ( $Y = 124.5 - 14.2 \cdot X_1 - 2.1 \cdot X_2 - 0.35 \cdot X_3$ ) shamol tezligi (X<sub>1</sub>) 1 m/s dan past bo'lgan turg'un iqlim sharoitida

zarrachalarning havoda muallaq qolish muddatini va turbulent aralashuvning diffuziya koeffitsiyentini keskin kamaytirishini tasdiqlaydi.

Laboratoriya xromatografiyasi tahlillarida chang namunalari tarkibida sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) va nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) ionlarining yuqori miqdorda qayd etilishi, atmosferada birlamchi gazlar ( $\text{SO}_2$  va  $\text{NO}_2$ ) korrelyatsiyasi ostida nam havo sharoitida ggeterogen kimyoviy o'zgarishlar sodir bo'lib, ikkilamchi noorganik aerezollar (secondary inorganic aerosols) jadal shakllanayotganidan dalolat beradi. Aksincha, yoz oylarida yuqori quyosh radiatsiyasi kuchli vertikal konveksiyani keltirib chiqaradi, bu esa gazlarning gorizonta va vertikal tarqalishini tezlashtiradi, biroq tuproq changi ( $\text{PM}_{10}$ ) fonini yuqoriligicha qoldiradi.

**Tadqiqotning afzalliklari va uslubiy cheklolari.** Ushbu tadqiqotning asosiy afzalligi (advantage) — an'anaviy yillik yalpi hisobotlardan farqli o'laroq, statsionar sanoat va harakatlanuvchi transport manbalarining "ekologik ulushini" fasllar kesimida foizlarda (contribution ratio) aniq differensiallash imkonini beruvchi kombinatsiyalashgan (PMF modeli + GIS + Kosmik monitoring) uslubiyotning qo'llanilganidir. Sentinel-5P kosmik ma'lumotlaridan foydalanish yer usti monitoring stansiyalari qamrab olmagan hududlardagi ifloslanish topografiyasini ham uzluksiz vizuallashtirish imkonini berdi.

Shu bilan birga, mazkur ilmiy ish ma'lum cheklolardan (limitations) ham xoli emas. Birinchidan, tadqiqotda shahar mikrorayonlari ichidagi lokal issiqlik qozonxonalari va xususiy xonadonlarda yoqiladigan ko'mir hajmlari yalpi baholangan bo'lib, ularning individual hissasi datchiklar yetishmasligi sababli to'liq mikrodifferensiallashtirilmadi. Ikkinchidan, yo'l-transport sohasida dizel, benzin va gaz (propan/butan) yoqilg'isida harakatlanuvchi avtomobillar oqimi faqat umumiy hajmda hisobga olindi, bu esa transport turlari kesimidagi xatoliklar chegarasini biroz kengaytiradi. Kelgusi tadqiqotlarda ushbu lokal omillarni mikromodellashtirish (masalan, CFD — Computational Fluid Dynamics modellari yordamida) ko'zda tutilgan.

### **Xulosa va tavsiyalar:**

**Asosiy tadqiqot natijalari.** Ushbu ilmiy ish doirasida keskin kontinental iqlim va jadal urbanizatsiya sharoitida shahar atmosfera havosining ifloslanish darajasi hamda uning statsionar (sanoat) va mobil (transport) manbalar kesimidagi mavsumiy taqsimlanish qonuniyatlari tizimli tahlil qilindi. Olingan instrumental va model natijalari quyidagi fundamental xulosalarni chiqarish imkonini beradi: birinchidan, kuz-qish mavsumida isitish tizimining to'liq quvvatga o'tishi hamda 180-220 metr balandlikdagi sirtqi termik inversiyalar (qopqoq effekti) natijasida havo havzasida  $\text{PM}_{2.5}$  konsentratsiyasi kritik darajaga ( $68.4 \text{ mkg/m}^3$ , ya'ni standartdan 4.5 barobar yuqori) ko'tariladi va bunda sanoat/energetika sektori 58.2% ulush bilan asosiy ifloslantiruvchi omil bo'lib xizmat qiladi. Ikkinchidan, yoz oylarida kuchli quyosh radiatsiyasi va transport oqimining intensivligi sharoitida avtotransport chiqindilarining ulushi markaziy tumnanlarda  $\text{NO}_x$  va CO bo'yicha 78.4% gacha yetadi hamda atmosferada ikkilamchi zaharli birikma — yer usti ozoni ( $\text{O}_3$ ) anomal to'planishini (1.2 REK) stimullaydi.

**Tadqiqotning amaliy ahamiyati.** Ishning amaliy qiymati shundan iboratki, an'anaviy yalpi yillik hisobotlardan farqli o'laroq, birinchi marta shahar ekologik

boshqaruv organlari uchun yilning turli fasllarida (qish va yoz) havo sifatini yomonlashtiruvchi individual manbalarning foiz ko'rsatkichlari (contribution ratio) aniq ajratib berildi. Ishlab chiqilgan matematik-regressiya modeli ( $R^2 = 0.78$ ) O'zgidromet va Ekologiya vazirligi tizimida turg'un meteorologik sharoitlar va termik inversiyalar davrida havo sifatining kritik pasayish ssenariylarini oldindan qisqa muddatli bashorat qilish (early warning system) hamda differensiallashgan tezkor boshqaruv qarorlarini qabul qilish uchun amaliy dasturiy asos bo'lib xizmat qiladi.

**Ilmiy-amaliy tavsiyalar.** Tadqiqot natijalari va aniqlangan qonuniyatlardan kelib chiqqan holda, shahar atmosfera havosini sog'lomlashtirish bo'yicha quyidagi chora-tadbirlar majmuasini amalga oshirish tavsiya etiladi:

- Mavsumiy ekologik rejimni joriy etish: Kuz-qish mavsumida (noyabr-fevral oylarida), ayniqsa atmosfera turg'unligi va inversiya prognoz qilingan kunlarda, yirik statsionar sanoat korxonalari va IESlarda ko'mir/mazut yoqish rejimini cheklash, filtratsiya tizimlarini maksimal samaradorlik rejimiga o'tkazish hamda monitoringni kuchaytirish;

- Yashil transport koridorlarini tashkil etish: Yoz mavsumida transport chiqindilari va yer usti ozoni to'planishini kamaytirish maqsadida shahar markaziy magistrallarida jamoat transportini to'liq elektr/gaz quvvatiga o'tkazish, tirbandlik yuqori chorralarda transport oqimini intellektual boshqarish (Smart Traffic) tizimlarini kengaytirish;

- Tabiiy va antropogen chang korrelyatsiyasini kamaytirish: Yozgi quruq iqlim sharoitida tuproq eroziyasi va qurilish changlarini ( $PM_{10}$ ) tutib qolish uchun shahar atrofida hamda sanoat zonalari perimetri bo'ylab gaz-chang yutish xususiyati yuqori bo'lgan ko'p yillik daraxtzorlardan iborat "Yashil belbog'lar" (Green belts) ekotizimini keng ko'lamda barpo etish.

**Kelajakdagi tadqiqotlar yo'nalishi.** Mazkur tadqiqotning mantiqiy davomi sifatida kelajakda shahar mikrorayonlari ichidagi lokal qozonxonalar va avtotransport vositalarining yoqilg'i turlari (benzin, propan, dizel) kesimidagi individual emissiya koeffitsiyentlarini yanada aniqroq mikrodifferensiallashtirish rejalashtirilgan. Shuningdek, binolar orasidagi havo oqimlarining harakatini simulyatsiya qiluvchi gidrodinamik modellarni (CFD — Computational Fluid Dynamics) qo'llash orqali, shahar arxitekturasini va baland binolarning sirtqi chegaraviy qatlamdagi inversiya barqarorligiga ko'rsatadigan mikrometeorologik ta'siri ustida chuqurroq izlanishlar olib borish ekologik muvozanatni ta'minlashda muhim istiqbolli yo'nalish hisoblanadi.

#### **Foydalanilgan adabiyotlar :**

1. Akimoto, H. (2016). Atmospheric chemistry and physics: An introduction. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29441-4>
2. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
3. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (3rd ed.). John Wiley & Sons.

4. US EPA. (2019). Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and receptor modeling guidance for source apportionment. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
5. Uzgidromet. (2025). Annual report on ambient air quality monitoring in major industrial cities of the Republic of Uzbekistan. Gidrometeorologiya Xizmati Agentligi. <https://meteo.uz/monitoring>
6. Zhang, Y., Shrivastava, M., Ching, J., & Pandis, S. N. (2020). Seasonal dynamics of PM<sub>2.5</sub> and meteorological inversion layer thickness in Asian megacities: A receptor modeling approach. *Atmospheric Environment*, 223, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117130>

#### Inrernet manbalar:

1. **AirNow.** (n.d.). *U.S. Embassy Tashkent air quality monitor*. U.S. Environmental Protection Agency. [https://www.airnow.gov/international/us-embassies-and-consulates/#Uzbekistan\\$Tashkent](https://www.airnow.gov/international/us-embassies-and-consulates/#Uzbekistan$Tashkent)
2. **Copernicus Open Access Hub.** (2026). *Sentinel-5P TROPOMI level-2 data products*. European Space Agency. <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/>
3. **Google Earth Engine.** (2026). *Sentinel-5P TROPOMI NO<sub>2</sub>: Tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density dataset*. Google Developers. [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S5P\\_OFFL\\_L3\\_NO2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_NO2)
4. **IQAir.** (2026). *Air quality in Tashkent: Real-time air quality index (AQI) and PM<sub>2.5</sub> data*. IQAir Group. <https://www.iqair.com/uzbekistan/tashkent>
5. **O‘zbekiston Respublikasi Ekologiya, Atrof-muhitni Muhofaza Qilish va Iqlim O‘zgarishi Vazirligi.** (2025). *Atmosfera havosi muhofazasi va respublika hududlaridagi ekologik monitoring hisobotlari*. <https://eco.gov.uz/>
6. **Uzgidromet.** (2026). *Real vaqtdagi atmosfera havosi ifloslanishi monitoringi platformasi*. Gidrometeorologiya Xizmati Agentligi. <https://monitoring.meteo.uz/>
7. **Uzgidromet.** (2026). *Atmosfera havosi sifati bo'yicha oylik va yillik tahliliy byulletenlar*. Gidrometeorologiya Xizmati Agentligi. <https://meteo.uz/monitoring>
8. **World Health Organization.** (2021). *WHO ambient (outdoor) air quality guidelines*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)