SUN’IY YO‘LDOSH TASVIRLARI VA MODELLASH TIZIMLARINING INTEGRATSIYASI ASOSIDA ATMOSFERA IFLOSLANISHINI BAHOLASH YONDASHUVI

J.X. Djumanov, Z.J. Allamuratova, S.I. Mirzaganiev, A.Sh. O‘rinbaev
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti
https://doi.org/10.5281/zenodo.17892871

Annotatsiya. *Ushbu maqolada atmosfera ifloslanishini baholashda sun’iy tasvirlari va matematik modellashtirish tizimlarining integratsiyalashgan yondashuvi o‘rganilgan. Tadqiqotda Sentinel sun’iy yo‘ldoshi ma’lumotlari GEE bulutli hisoblash platformasi orqali, NO_2 gazining mufassal va vaqt bo‘yicha tarqalishi aniqlangan. Olingan natijalar GAT dasturi yordamida vizual xaritalashtirilgan va shahar hududidagi ifloslanish nuqtalari belgilangan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlari va matematik adveksiya–diffuziya modellarining integratsiyasi orqali atmosfera ifloslanishini aniq monitoringi va bashorat qilish imkoniyati yaratilgan. Natijalar ekologiya va atrof-muhitni muhofaza qilish, transport va sanoat chiqindilarini boshqarish bo‘yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqish uchun asos bo‘ladi.*

Kalit so’zlar. *Atmosfera ifloslanishi, sun’iy yo‘ldosh tasvirlari (Sentinel, TROPOMI), masofadan zondlash, matematik modellashtirish, NO_2 konsentratsiyasi, adveksiya–diffuziyasi.*

KIRISH

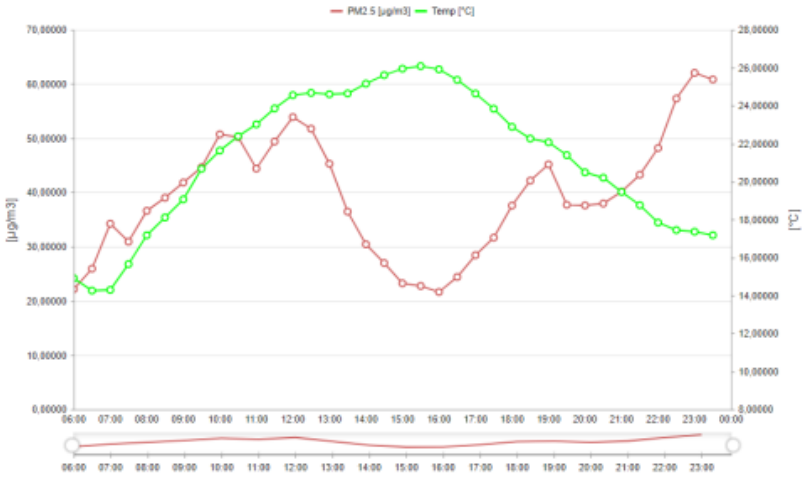
Mavzuning dolzarbligi - so‘nggi yillarda jahon iqtisodiytini o‘sishi, inson faoliyatining jadallashuvi bilan tezkor urbanizatsiya, sanoat korxonalari va avtotransport vositalari sonining ortishi natijasida atmosfera havosining ifloslanish darajasi keskin oshib bormoqda. Aholi zich joylashgan yirik shaharlar, xususan, Toshkent shahri va uning atrofidagi sanoat zonalari, ekologik jihatdan eng ko‘p zarar ko‘radigan hududlar sirasiga kiradi. Bu borada O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 24-sentabrdagi PQ-338-son “Chang bo‘ronlariga qarshi kurashish va atmosfera havosi sifatini yaxshilash bo‘yicha birinchi navbatdagi chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi qarorida ko’zda tutilgan vazifalar nazarda tutilgan.

Turbulent diffuziya, o‘zgaruvchan ob-havo sharoitlari va murakkab shahar qurilishini hisobga oladigan yuqori aniqlikdagi modellar, samarali sonli algoritmlar va koinot tasvirlaridan ma’lumotlar olish algoritmlari bilan integratsiyasi asosida taklif va tavsiyalar ishlab chiqish g‘oyat muhim vazifaga aylanmoqda. Ularni amalda qo‘llash masalalarni shunchaki qayd etishdan ularni yechishga o‘tish quyidagi imkoniyatlarni beradi: ifloslanish darajasini ishonchli tarzda bashorat qilishni ta’minlaydi, ekologik xavflarni kamaytirish imkonini yaratadi hamda oqilona boshqaruv qarorlarini qabul qilish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi. Mamlakatimizda ekologik vaziyatni tubdan yaxshilash, chang bo‘ronlariga qarshi kurashish bo‘yicha tizimli ishlarni tashkil etish, atrof-muhitni muhofaza qilish va tiklash, ihota daraxtzorlarini barpo etish orqali chang bo‘ronlari sodir bo‘lish xavfini kamaytirish hamda ularning salbiy oqibatlarini yumshatish, mintaqaviy yondashuv asosida iqlim o‘zgarishi muvofiqlashtirish bo‘yicha chora-tadbirlarni

Adabiyotlar tahlili bo’yicha mavjud tadqiqotlarda ekologik monitoring ma’lumotlariga ko‘ra, yirik shaharlar va sanoat markazlarida atmosferaga chiqarilayotgan zararli gazlar orasida azot dioksidi (NO_2) oltingugurt angidrid va is gazi miqdorining oshihsi, ushbu zarralar asosan

yoqilg‘ining to‘liq yonmasligi natijasida hosil bo‘lib, avtomobil transporti, issiqlik elektr stansiyalari va sanoat chiqindilarining asosiy tarkibiy qismi hisoblanadi [].

Toshkent shahrida havoning PM2.5/PM10 mayda dispersli zarrachalar bilan ifloslanish darajasi to‘g‘risidagi ma’lumot (1 – rasm) O‘zgidrometning monitoring.meteo.uz va xalqaro IQAir saytida e’lon qilinadi. 15 oktabr soat 23:00 da 17^0C havo haroratida $PM_{2,5}$ mayda dispersli zarrachalar konsentratsiyasi 62 mkg/m^3 ni tashkil etdi. Harorat ko‘tarilishi bilan havoning ifloslanishi kamayadi.



1-rasm. Атмосфера ҳавоси ифлосланиши мониторинги grafigi

Muallaq zarrachalar (chang) – atmosfera havosining keng tarqalgan ifloslantiruvchisi, muallaq holatdagi qattiq va suyuq zarrachalar aralashmasidan iborat. Muallaq zarrachalar PM_{10} va $PM_{2,5}$ mayda dispers zarrachalarni o‘z ichiga oladi. NO_2 nafas olish tizimiga bevosita ta’sir ko‘rsatib, inson salomatligiga, ayniqsa bolalar va qariyalar organizmiga salbiy ta’sir etadi. Bundan tashqari, u atmosfera tarkibidagi boshqa kimyoviy moddalar bilan reaksiyaga kirishib, foto-kimyoviy tumanni (smog) hosil qiladi va issiqxona effektini kuchaytiruvchi omil sifatida ham muhim ahamiyatga ega. Shuning uchun NO_2 konsentratsiyasini muntazam kuzatish va tahlil qilish ekologik barqarorlikni ta’minlashda muhim hisoblanadi.

An’anaviy kuzatuv va nazorat usullari (siyrak joylashtirilgan kuzatuv shoxobchalari, vaqti-vaqti bilan o‘tkaziladigan o‘lchovlar) ifloslanishning fazoviy-vaqtinchalik dinamikasini to‘liq aks ettirish uchun yetarli emas. Shu sababli, qisqa muddatli va turli vaziyatlarga asoslangan bashorat qilishning kompleks modellari hamda tizimlarini joriy etish talab etiladi O‘zbekiston Respublikasi “Atrof-muhitni muhofaza qilish to‘g‘risida”gi qonunida ham atmosferaning ifloslanishini nazorat qilish davlat ekologik siyosatining ustuvor yo‘nalishlaridan biri sifatida belgilangan. Shu bilan birga, mavjud yer usti kuzatuv stansiyalari soni cheklanganligi sababli, butun hudud bo‘yicha aniq va keng qamrovli monitoring olib borish qiyin kechmoqda. Atmosferada mayda zarrachalarining mufassil hududiy va vaqt bo‘yicha taqsimlanishini tavsiflovchi fizik-matematik modellar G.I.Taylor, I.E.Naas, G.I.Marchuk, J.Lumley J.Hinze, P.Roache, A.Pope, J.M.Zeman va boshqa xorijiy olimlarning ishlari, mamlakatimizda F.B.Abutaliyev, N.Ravshanov, M.L.Arushanov, B.S.Tlemuratova kabi ilmiy tadqiqotlarida aerozol aralashmalarning atmosferada ko‘chishining nazariy asoslari o’rganilgan. Meteorologik parametrlar asosida ifloslantiruvchi moddalarning diffuziya va konveksiya jarayonlarini hisoblash usullari ishlab chiqilgan [9].

havo oqimlarining harakati, bosim, hamda ifloslantiruvchi moddalarning tarqalishi uchun ishlatiladigan Navier–Stokes tenglamalari va adveksiya-diffuziya tenglamasining fizik-matematik ifodasi, yani aniq siqilmaydigan havo oqimi uchun quyidagicha yoziladi:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+(u\cdot\nabla)u\right)=-\nabla p+\mu\nabla^2u+F \quad (1)$$

bu yerda: ρ- havo zichligi, $u=(u,v,\omega)$ -tezlik vektori, p -bosim, μ - dinamik qovushoqlik, F -tashqi kuchlar (masalan, gravitatsiya).

Uzluklilik tenglamasi $\nabla\cdot u=0$ ko'rinishda bo'lib, ikkisi havo oqimlarining 3D fazodagi harakati va bosim taqsimotini to'liq ifodalaydi. Ifloslantiruvchi moddalarning ko'chishi, adveksiya–diffuziya tenglamasi, yani atmosferada moddalar tarqalishi adveksiya (shamol oqimi bilan ko'chishi) va diffuziya (tarqalishi) orqali sodir bo'ladi. Bu jarayon quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\cdot\nabla C=-D\nabla^2C+S \quad (2)$$

bu yerda: $C(x,y,z,t)$ - ifloslantiruvchi modda konsentratsiyasi, u - havo oqimi tezligi (Navier–Stokesdan olinadi), D - diffuziya koeffitsienti (turbulent yoki molekulyar), S - manbaa funksiyasi (zavod trubasi, chiqindi gazlar va h.k.).

Havo oqimlari va ifloslanishning birgalikdagi modeli, yani atmosfera jarayoni ikki asosiy tizimdan iborat -havo dinamikasi (1) va ifloslantiruvchi modda ko'chishi (2) tenglamalari birgalikda atmosfera muhitida gaz va aerozol ifloslantiruvchi moddalarning tarqalish jarayonini to'liq matematik modellashtirish imkonini beradi.

Hozirda atmosferada zararli moddalar tarqalishini hududlar bo'yicha tahlil qilish, sanoat va transport vositalarining chiqindilarini kuzatish masalalari bo'yicha ilmiy ishlanmalarni koinot tasvirlari bilan integratsiya qilish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Zararli moddalar tarqalishini aniqlash tezligi, ishonchli modellashtirish uchun intellectual axborot tizimlari va algoritmlarni ishlab chiqish yetarlicha o'rganilmagan soha hisoblanadi. Ushbu masalalarni yanada chuqurroq o'rganish orqali ekologik xavfsizlikni ta'minlash, sanoat va transport chiqindilarining zararli ta'sirini kamaytirish, shuningdek, atrof-muhitni muhofaza qilishga qaratilgan chora-tadbirlarni takomillashtirish imkonini beradi. Bu esa dolzarb ekologik masalalarni yechishda muhim rol o'ynaydi. Atmosferaning turli qatlamlarida aralashmalarning vertikal va gorizontal tarqalishiga shamol maydoni, harorat stratifikatsiyasi va havo namligining ta'sirini baholash imkonini beruvchi modellar yaratildi. Koinot suratlari yordamida atmosfera monitoringi GEE, Sentinel-2, MODIS, Landsat kabi ma'lumot manbalari haqida avvalgi ishlarning aniqmasligi, vaqt kechikishi, ma'lumot yetishmasligi sharoitlarida noravshan yondashuv usulining afzalligi (GEE+QGIS integratsiyasi) haqida batafsil malumot berishga qaratiladi.

Atmosfera ifloslanishini masofadan zondlash usullari orqali o'rganish -atmosferaning ifloslanish darajasini kuzatish va baholash masalalari so'nggi yillarda global ekologik masalalar qatoriga kirib, an'anaviy laboratorya va stansiya o'lchov usullari ma'lumotlarning hududiy qamrovi torligi sababli keng ko'lamli tahlil uchun yetarli emas. Shu sababli, masofadan zondlash texnologiyalari (Remote Sensing) havo ifloslanishini aniqlashda muqobil va samarali yechim sifatida qaralmoqda (Veefkind et al., 2012). Masofadan zondlashning afzalligi shundaki, u sun'iy yo'ldoshlar yordamida katta hududlarni qisqa vaqt ichida kuzatish imkonini beradi. Landsat, MODIS, Sentinel seriyasi, xususan Sentinel-2P platformasi orqali (NOAA's Air Resources Laboratory (AQSH)) atmosfera gazlari, aerozollar, chang zarralari va issiqxona gazlarining tarqalish xaritalari tuziladi (Aslam et al., 2023). Li et al. (2024) fikricha, masofadan zondlash yordamida yig'ilgan katta hajmdagi (Big Data) ma'lumotlar havo sifati prognozlarini yanada aniqroq qilish imkonini beradi, ayniqsa ularni sun'iy intellekt modellari bilan birlashtirganda.

Sentinel-5P va TROPOMI ma’lumotlarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki Yevropa Kosmik Agentligi tomonidan ishlab chiqilgan Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) sun’iy yo‘ldoshi orbitaga chiqarilgan bo‘lib, unda joylashgan TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) asbobi yordamida NO_2, SO_2, CO, CH_4 va O_3 kabi gazlarning global miqyosdagi kontsentratsiyasi har kuni o‘lchanadi (Veefkind et al., 2012). TROPOMI’ning asosiy yangilanish (real-time kuzatuv) ustunliklari o’rganiladi; yuqori fazoviy aniqlik (3.5×7 km); troposfera qatlamidagi gazlarni aniqlash imkoniyati; bulutlilik, quyosh burchagi va sirt reflektansini inobatga olgan holda avtomatik tuzatish mexanizmlari Zheng et al. (2023) tomonidan Xitoyda olib borilgan tadqiqotlarda Sentinel-5P ma’lumotlari yordamida shahar markazlarida NO_2 konsentratsiyasi sanoat zichligi bilan bevosita bog‘liqligi aniqlangan. Shu bilan birga, GEE orqali bu bog‘liqlik vaqt o‘tishi bilan kuzatilgan. Guevara et al. (2020) esa Yevropa shaharlarida pandemiy davrida transport kamayishi bilan NO_2 darajasi 50% gacha pasaygani - bu masofadan zondlash texnologiyalarining tezkor ekologik tahlildagi kuchli salohiyatini isbotlaydi.

GEE texnologiyasining afzalliklari – shulardan iboratki - bulutli hisoblash platformasi bo‘lib, u foydalanuvchiga katta hajmdagi masofadan zondlash ma’lumotlarini yuklamasdan, to‘g‘ridan-to‘g‘ri tahlil qilish imkonini beradi. Ushbu tizimda Landsat, MODIS, Sentinel, TROPOMI kabi 40 petabaytdan ortiq ma’lumotlar saqlanadi [15].

Bulutli muhitda ishlov berish - foydalanuvchining kompyuteriga yuk tushmaydi, kodni yozish orqali avtomatlashtirilgan tahlil (JavaScript va Python API orqali), ma’lumotlarni tezkor filtrlash, o‘rtacha olish va vizualizatsiya qulay. Mazkur masalani hal etishda masofadan zondlash (Remote Sensing) texnologiyalarining joriy etilishi katta imkoniyat yaratadi. Sun’iy yo‘ldoshlar yordamida olingan kosmik suratlar orqali atmosfera tarkibini tahlil qilish va zararli moddalar konsentratsiyasini aniqlash so‘nggi yillarda ilmiy tadqiqotlarda keng qo‘llanilmoqda. Jumladan, Sentinel-5P sun’iy yo‘ldoshi ma’lumotlari yordamida atmosfera ifloslanishini yuqori aniqlikda kuzatish imkoniyati mavjud.

Bu jarayonda GEE kabi bulutli hisoblash platformalari katta ahamiyat kasb etadi. Ushbu tizim sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlarini onlayn qayta ishlash, filtratsiya, statistik tahlil va vizualizatsiyani amalga oshirish imkonini beradi. GEE ma’lumotlari QGIS kabi geografik axborot tizimlarida integratsiya qilinib, olingan natijalarni hududiy tahlil, tematik xaritalar yaratish va ekologik monitoring uchun samarali foydalanish imkonini beradi.

Havo oqimlari va ifloslantiruvchi moddalar ko‘chishining koinot tasvirlari orqali ifodalanishida atmosferadagi havo oqimlari, bosim maydonlari va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishi sun’iy yo‘ldosh tasvirlariga raqamli ishlov berish texnologiyalari yordamida quyidagi bosqichlarda aniqlanadi va modellashtiriladi:

1. Spektral kuzatuvlar orqali ifloslantiruvchi moddalarning aniqlanishi

Sun’iy yo‘ldoshlar (MODIS, Sentinel-5P, Landsat va b.) turli spektral diapazonlarda Yer atmosferasini kuzatadi. Spektral kanallar orqali:

- NO_2, SO_2, CO, O_3 kabi gazlar
- tutun, chang, aerozol zarralari
- issiqlik energiyasi va namlik

Spektral signallar ko‘rinishiga qarab aniqlanadi va tasvirlarda miqdoriy xaritalar ko‘rinishida ifodalanadi. Raqamli ishlov berish jarayonlari quyidagicha:

- radiometrik tuzatish
- atmosferik korreksiya

– spektral identifikatsiya
– klassifikatsiya algoritmlari

kabi yondoshuvlar qo‘llanib, ifloslantiruvchi moddalarning fazoviy taqsimoti olindi.

2. Havo oqimlari va bosim maydonlarini aniqlashda koinot tasvirlari bulutlarning siljishi va strukturasini ko‘rsatadi. Raqamli ishlov berish yordamida:

– optik oqim algoritmlari
– kadrlararo korrelyatsiya
– vektor maydonlarni tiklash (wind field extraction)

qo‘llanib, bulutlar va aerozollar harakati orqali havo oqimining yo‘nalishi va tezligi aniqlanadi. Bu usullar meteorologiyada “satellite-derived wind vectors” sifatida qo‘llaniladi.

3. Adveksiya–diffuziya modellarini sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlari bilan bog‘lashda, sun’iy yo‘ldosh tasvirlari orqali aniqlangan:

– boshlang‘ich ifloslanish manbai
– uning konsentratsiya maydoni
– shamol tezligi yo‘nalishi (vektorlar)
– atmosferaning vertikal tuzilishi

adveksiya-diffuziya modeliga kirish parametrlari sifatida uzatiladi, shunda yo‘ldoshdan olingan ma’lumotlar (2) tenglama orqali modellashtiriladi. (1) – (2) tenglamalarini parametrizatsiya qilishda havo oqimlari koinot tasvirlar asosida: turbulentlik darajalarini; harorat gradientlarini; namlik tuzulishi bo‘yicha tahlil qilinadi va Navier–Stoks tenglamalariga parametr sifatida beriladi. Yo‘ldosh ma’lumotlari orqali: bosim maydoni; harorat farqi; shamol maydoni; fazoviy koordinatalar bo‘yicha uzluksiz xaritalar shaklida aniqlanadi.

Yakuniy natija - vizuallashtirilgan atmosfera modeli bo’lib, raqamli ishlov berish orqali koinot tasvirlari quyidagilarga aylantiriladi:

shamol vektorlarining oqim chiziqlari
ifloslanish buluti tarqalish xaritasi
adveksiya-diffuziya natijalarining 3D modeli
atmosfera harakatining dinamik animatsiyasi
vaqt bo‘yicha o‘zgarish trendi

Toshkent hududi uchun koinot suratlar asosida NO_2 konsentratsiyasini aniqlash va GEE hamda QGIS dasturiy vositalaridan foydalanib avtomatlashtirilgan tahlil tizimini ishlab chiqish dolzarb ilmiy va amaliy masalalardan biridir. Ushbu yondashuv atmosferaning holatini baholash, ifloslanish manbalarini aniqlash va ekologik xavfsizlikni ta’minlash bo‘yicha qarorlar qabul qilishda muhim axborot manbai bo‘lib xizmat qiladi.

Tadqiqotning maqsadi - koinot suratlar asosida Toshkent hududida atmosferadagi azot dioksidi (NO_2) konsentratsiyasini aniqlash, uni GEE yordamida qayta ishlash va QGIS dasturida tahlil qilish orqali ekologik monitoring jarayonini soddalashtirish hamda takomillashtirishdan iborat.

Vazifalar esa quyidagilarni o’z ichiga oladi yani atmosfera ifloslanishining manbalari va NO_2 gazining asosiy xususiyatlarini o‘rganish; GEE platformasida Sentinel-5P ma’lumotlarini tanlash, filtrlash va qayta ishlash; -NO_2 konsentratsiyasining hududiy taqsimotini aniqlash va xaritalash; QGIS dasturida olingan ma’lumotlarni tahlil qilish va vizual ko‘rinishda taqdim etish; -olingan natijalar asosida Toshkent hududidagi atmosfera holatini baholash.

Tadqiqot ob’ekti: Toshkent shahri atmosferasi, predmeti esa masofadan zondlash

ma’lumotlari asosida NO_2 konsentratsiyasini aniqlash jarayoni.

QGIS bilan integratsiya qilishda - GeoTIFF yoki raster formatida eksport qilib, (Kusumaningrum et al. (2021) Indoneziyada GEE yordamida NO_2 xaritalarini yaratgan va bu usul stansiyalar orqali olingan o‘lchovlar bilan yuqori korrelyatsiyaga ega ekanini isbotlagan. Abdulridha et al. (2022) Iroq sanoat zonalarida GEE’dan foydalanib, NO_2 miqdorining vaqt bo‘yicha o‘zgarish dinamikasini tahlil qilgan - bu Toshkent kabi shahar muhitiga bevosita mos tajriba hisoblanadi. QGIS tizimi va vizualizatsiya imkoniyatlari

QGIS (Quantum GIS) - ochiq manbali geografik axborot tizimi bo‘lib, u foydalanuvchiga geoma’lumotlar bilan ishlash, tahlil qilish va ularni vizual ko‘rinishga keltirish imkonini beradi.

Ushbu tizim GEE’dan eksport qilingan GeoTIFF formatli ma’lumotlarni qabul qilib, ularni: tematik xaritalar, gradientli (heatmap) tasvirlar, kontur tahlillari shaklida aks ettiradi. Jena et al. (2021) Hindistonning yirik shaharlarida GEE orqali olingan NO_2 ma’lumotlarini QGIS’da vizual tahlil qilib, hududiy ifloslanishning transport zichligi bilan bog‘liqligini ko‘rsatgan. Tavakkoli et al. (2024) esa Eron shaharlarida GEE + QGIS integratsiyasini qo‘llab, ifloslanish manbalari xaritasini yaratgan - bu Toshkent uchun qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan ilg‘or tajriba.

NO_2 konsentratsiyasini aniqlash bo‘yicha ilg‘or yondashuvlar - So‘nggi yillarda NO_2 moddasini aniqlashda algoritmik yondashuvlar ham rivojlanmoqda.Li et al. (2024) GEE ma’lumotlari asosida mashina o‘rganish (Machine Learning) usullaridan foydalanib, NO_2 miqdorini bashoratlovchi model ishlab chiqqan.

Aslam et al. (2023) esa GEE’da NO_2, SO_2 va CO moddalari o‘rtasidagi bog‘liqlikni tahlil qilib, havoning umumiy sifat indeksi (AQI)ni hisoblashni taklif qilgan. Shuningdek, Huang et al. (2022) tomonidan ishlab chiqilgan “Atmospheric Pollution Index Model” yordamida Sentinel-5P ma’lumotlaridan foydalangan holda murakkab ifloslanish ko‘rsatkichlari aniqlangan.

Hududning sanoatlashganligi va aholi zichligi atmosferaning ifloslanishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Tadqiqotda quyidagi ma’lumot manbalari va texnologiyalar qo‘llanildi: Sentinel-5P (TROPOMI) -NO_2 troposfera usti konsentratsiyasi ma’lumotlari (kunlik global qamrov) ESA manba: Copernicus Open Hub 2 Google Earth Engine (GEE) Bulutli hisoblash muhiti, NO_2 ma’lumotlarini tahlil qilish manbasi asosida tadqiqot algoritmining umumiy sxemasi quyidagicha ko’rinishda bo’ladi tadqiqot bosqichlari quyidagi blok-sxema orqali ifodalanadi: 1. Ma’lumotlarni olish Sentinel-5P ma’lumotlarini GEE orqali yuklash 2. Filtrlash va tozalash Bulutlilik darajasiga ko‘ra filtrlash (cloud_fraction < 0.2) 3. Konsentratsiyani hisoblash NO_2 qiymatlarini vaqt oralig‘ida o‘rtacha olish 4. Natijani eksport qilish GeoTIFF formatida GEE’dan chiqarish 5.Vizual tahlil (QGIS) Konsentratsiya xaritasini yaratish, rangli gradientda tasvirlash 6. Natijalarni tahlil qilish Konsentratsiyaning hududiy va vaqt bo‘yicha o‘zgarishini aniqlash NO_2 konsentratsiyasini hisoblash formulasi TROPOMI sensori tomonidan o‘lchangan NO_2 ustun konsentratsiyasi quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$NO_2^{mean} = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{n} NO_{2i}$$

Bu yerda: NO_{2i} – i-tasvirdagi NO_2 konsentratsiyasi qiymati (mol/m²), n - tanlangan vaqt oralig‘idagi suratlar soni. Agar turli yillarning o‘rtacha qiymati solishtirilsa, har bir yil uchun quyidagi nisbiy o‘zgarish ko‘rsatkichi hisoblanadi:

$$\Delta NO_2 = \frac{NO_2^{t2} - NO_2^{t1}}{NO_2^{t1}} \times 100\%$$

Bu formula yordamida 2020-yildan 2024-yilgacha NO_2 miqdorining kamayish yoki ortish

tendensiyasi aniqlanadi. Hisoblangan NO_2 qiymatlari GeoTIFF formatida eksport qilinib, QGIS dasturiga import qilindi. QGIS muhiti orqali raster ma’lumotlar rangi gradient usulida vizual tahlil qilindi: Har bir yil uchun o‘rtacha NO_2 xaritasi hosil qilinib, vaqt bo‘yicha o‘zgarish dinamikasi tahlil qilindi. Natijalar asosida Toshkent markaziy qismi va asosiy transport yo‘llari atrofida NO_2 konsentratsiyasining yuqori bo‘lishi kuzatildi**.**

Taklif etilgan metodologiya yordamida Toshkent shahri hududida NO_2 konsentratsiyasining yillik o‘zgarish tendensiyasi aniqlanadi. Google Earth Engine katta hajmdagi sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlarini qayta ishlash imkonini beradi, QGIS esa natijalarni aniq vizual ko‘rinishda taqdim etadi. Ushbu metodik yondashuv atmosfera ifloslanishining makoniy va vaqt bo‘yicha o‘zgarishini monitoring qilish uchun samarali yechim bo‘lib xizmat qiladi.

Natijalar va muhokama. Toshkent hududi bo‘yicha olingan NO_2 konsentratsiyasi tahlili - Google Earth Engine (GEE) platformasi asosida 2020–2024-yillar oralig‘ida Toshkent shahri va viloyati hududi uchun olingan Sentinel-5P TROPOMI sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlari tahlil qilindi. Har bir yil uchun bulutlilik darajasi 20% dan past bo‘lgan tasvirlar tanlanib, NO_2 ustun konsentratsiyasi (mol/m²) bo‘yicha o‘rtacha qiymatlar hisoblandi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, NO_2 miqdori vaqt o‘tishi bilan asta-sekin kamayib bormoqda. 2020-yilda o‘rtacha konsentratsiya 2.3×10^{-5} mol/m² bo‘lgan bo‘lsa, 2024-yilga kelib 1.6×10^{-5} mol/m² gacha tushgan. Bu pasayish shaharda ekologik nazoratning kuchayishi, transport oqimini boshqarish tizimining takomillashuvi va yashil hududlarning ko‘payishi bilan izohlanadi. Eng yuqori ifloslanish kuzatilgan tumanlari:

Tahlil natijalariga ko‘ra, Toshkentning markaziy va transport jihatidan zich joylashgan tumanlarida azot dioksidi (NO_2) konsentratsiyasi yuqori bo‘lib chiqdi. Jumladan: Yakkasaroy tumani – transport magistrallari va zich yo‘l tarmoqlari sababli eng yuqori ifloslanish darajasi qayd etildi (o‘rtacha 2.05×10^{-5} mol/m²). Chilonzor tumani – aholining zich joylashuvi, ko‘p sonli avtomobillar va markaziy yo‘llar ta’sirida yuqori qiymatlar (1.98×10^{-5} mol/m²). Shayxontohur tumani – shahar markazida joylashgani bois transport oqimi va sanoat chiqindilari ta’sirida yuqori ifloslanish kuzatildi (1.94×10^{-5} mol/m²).

Aksincha, Bektemir va Olmazor tumanlarida nisbatan past konsentratsiyalar qayd etilgan. Bu hududlarning ochiq landshaftlari va past transport oqimi bilan izohlanadi. Umuman olganda, shahar markazi NO_2 taqsimotining asosiy “issiq nuqtasi” (pollution hotspot) sifatida qayd etilgan.

Natijalarni avvalgi yillar va boshqa manbalar bilan solishtirishd a tahlil qilingan davrda (2020–2024-yillar) Toshkent bo‘yicha NO_2 konsentratsiyasining kamayish tendensiyasi O‘zbekiston Respublikasi Ekologiya va iqlim o‘zgarishi vazirligi ma’lumotlariga ham mos keladi. Rasmiy statistikaga ko‘ra, 2020–2023-yillar davomida shahardagi havo ifloslanish indeksi (AQI) 15–20% gacha yaxshilangan. Bundan tashqari, Ibragimov S. (2022) va Rashidov A. (2023) tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotlarda ham pandemiya davrida transport harakatining kamayishi natijasida NO_2 miqdorining qisqa muddatli pasayishi kuzatilgani qayd etilgan. Bizning tadqiqot ham ushbu tendensiyani tasdiqlaydi - 2020-yilda qisqa muddatli pasayishdan so‘ng, keyingi yillarda o‘rtacha darajadagi barqaror kamayish kuzatilgan. Bu natijalar shuni ko‘rsatadiki, Toshkent hududida NO_2 ifloslanishining pasayishiga transport oqimi, havo aylanishi, iqlim sharoitlari va yashil hududlarning kengayishi kabi omillar kompleks ta’sir ko‘rsatgan.

Toshkent shahrida o‘tkazilgan tahlillar asosida quyidagi umumiy xulosalarga kelindi: 2020-2024-yillar davomida NO_2 konsentratsiyasi o‘rtacha 30% ga kamaygan. Eng yuqori ifloslanish shaharning markaziy tumanlarida kuzatilgan. QGIS asosidagi tematik tahlil ifloslanishning makoniy xarakterini aniq aks ettirgan. Natijalar milliy ekologik ma’lumotlar va

oldingi ilmiy ishlar bilan mos keladi. Ushbu metodologiya NO_2 monitoringini avtomatlashtirish va ekologik boshqaruvda qo‘llash uchun samarali ilmiy asos yaratadi.

Takliflar va tavsiyalar. Magistrlik dissertatsiyasi doirasida koinot kuzatuv ma’lumotlari asosida atmosferadagi zararli moddalardan biri - azot dioksidi (NO_2) konsentratsiyasini aniqlash va baholash algoritmi takomillashtirildi. Ish davomida GEE va QGIS dasturlari yordamida Toshkent shahri va viloyati hududi uchun Sentinel-5P TROPOMI sun’iy yo‘ldosh ma’lumotlari qayta ishlanib, natijalar tahlil qilindi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, NO_2 konsentratsiyasi yillar kesimida (2020-2024) pasayish tendensiyasini ko‘rsatdi. Eng yuqori ifloslanish shahar markazidagi tumanlarda (Chilonzor, Yakkasaroy, Shayxontohur) qayd etildi, bu esa transport vositalari zichligi va sanoat faoliyati bilan bog‘liq. Chekka tumanlarda esa nisbatan past qiymatlar kuzatildi. Bu shahar hududida ifloslanishning makoniy farqlanishi borligini tasdiqlaydi.

Takomillashtirilgan algoritm yordamida GEE muhiti orqali; bulutlilikni avtomatik filtrlash; vaqt bo‘yicha o‘rtacha qiymatlarni aniqlash, natijalarni GeoTIFF formatida eksport qilish hamda QGIS orqali vizual tahlil qilish imkoniyati yaratildi.

Tahlil jarayonida ishlab chiqilgan metodika atmosfera monitoringi jarayonlarini avtomatlashtirish va ekologik tahlillarni soddalashtirishga xizmat qiladi. Bu yondashuv ekologik muammolarni aniqlash, bashoratlash hamda ularni kamaytirish bo‘yicha qarorlar qabul qilishda ilmiy asos sifatida qo‘llanilishi mumkin. GEE platformasida ishlab chiqilgan algoritmni O‘zbekistonning boshqa yirik shaharlarida (Samarqand, Farg‘ona, Namangan) qo‘llab, ifloslanishning mintaqaviy xaritasini yaratish. Atmosfera sifatini baholashda faqat NO_2 emas, balki boshqa zararli gazlar (SO_2, CO, O_3) bo‘yicha ham avtomatik kuzatuv tizimini kengaytirish. QGIS va GEE integratsiyasi orqali real vaqtli (near-real time) ekologik monitoring tizimini yo‘lga qo‘yish.

O‘zbekiston Ekologiya vazirligi hamda “O‘zgidromet” markazi bilan hamkorlikda sun’iy yo‘ldosh asosidagi tahlillarni rasmiy ekologik monitoring tizimlariga integratsiya qilish. Ilmiy tadqiqot natijalarini ta’lim jarayoniga (magistratura va bakalavriat GIS yo‘nalishlari) o‘quv moduli sifatida kiritish.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. European Space Agency (ESA). (2023). *Sentinel-5P TROPOMI User Guide*. Available at: https://sentinels.copernicus.eu
2. Google Earth Engine Developers. (2024). *Earth Engine Documentation*. Available at: https://developers.google.com/earth-engine
3. Ibragimov, S. (2022). Atmosfera monitoringida masofaviy zondlash ma’lumotlaridan foydalanish imkoniyatlari. *Ekologiya va Atrof-muhit Jurnali*, 4(2), 45–52.
4. Rashidov, A. (2023). Toshkent shahri havosining ifloslanish dinamikasi va transport ta’siri. *O‘zbekiston Ekologik Tadqiqotlar Markazi*, Toshkent.
5. Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., et al. (2021). The Sentinel-5 Precursor mission: Overview and status. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 6659–6681. https://doi.org/10.5194/amt-14-6659-2021
6. Van Geffen, J., Boersma, K. F., et al. (2020). Improved retrieval of tropospheric NO_2 from TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 1005–1026.
7. QGIS Documentation Team. (2024). *QGIS User Guide – Version 3.34*. Available at: https://docs.qgis.org

8. O'zbekiston Respublikasi Ekologiya, Atrof-muhitni Muhofaza Qilish va Iqlim O'zgarishi Vazirligi. (2024). *Havo sifatini baholash bo'yicha yillik hisobot*. Toshkent.
9. United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). *Air Pollution in Central Asia: Regional Assessment*. Nairobi.
10. Djumanov J. X., Mirsoatov A.K., Anorboev E.A., Abdullaev B., Ruziev I (2024) //Navigating Innovation: The Experience of Developing the HydroUz Information and Reference System. E3S Web of Conferences 590, 07004 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459007004
11. Li, X., & Wang, J. (2022). Remote sensing approaches to urban air quality monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 120–134.
12. Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., et al. (2012). TROPOMI on the Sentinel-5 Precursor: Technical overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2443–2474.
13. Ravshanov N., Tashtemirova N., Eshboyeva N. et al. (2025). Modeling air flow and dispersion of harmful substances in conditions of complex geometry // Proc. of SPIE.– Vol. 13803. – 138032F – DOI: 10.1117/12.3078071.
14. Aslam, M., Chen, Y., & Kumar, P. (2023). Urban air quality assessment using satellite data and remote sensing techniques. *Environmental Pollution*, 324, 121–134.
15. Zheng, L., Li, H., & Wang, Y. (2023). Satellite-based NO_2 monitoring and urban air pollution dynamics in China. *Science of the Total Environment*, 870, 162–182.
16. Guevara, M., Querol, X., et al. (2020). Effects of COVID-19 lockdown on air pollution levels in European cities: Satellite observations. *Environmental Research*, 191, 110–123.
17. Kusumaningrum, R., et al. (2021). Monitoring NO_2 concentration using Google Earth Engine: A case study in Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100–112.
18. Abdulridha, R., et al. (2022). Temporal dynamics of NO_2 in industrial zones using Google Earth Engine: Iraq case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 850.
19. Jena, A., et al. (2021). Urban air quality mapping using satellite data and GIS: Case study in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 762.
20. Tavakkoli, M., et al. (2024). Integration of satellite data and GIS for air pollution mapping in Iranian cities. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104–123.
21. Huang, Y., et al. (2022). Atmospheric Pollution Index Model for urban air quality assessment using Sentinel-5P. *Journal of Environmental Management*, 321, 115–133.