



**Orol dengizi uchun masofaviy zondlash va mashinaviy o‘qitishdan foydalangan
holda integratsiyalashgan prognozlash tizimi**

Xolmuminov Oybek Tuxtayevich

O‘zbekiston jahon tillari universiteti “Zamonaviy axborot texnologiyalari va sun’iy
intellekt” kafedrası o‘qituvchisi
xolmuminovoybek26@gmail.com

Karimov Norbek Najmiddin o‘g‘li

O‘zbekiston jahon tillari universiteti “Zamonaviy axborot texnologiyalari va sun’iy
intellekt” kafedrası o‘qituvchisi
norbek1194@gmail.com

Annotatsiya. Orol dengizi so‘nggi o‘n yilliklarda antropogen bosim va suv resurslarining noto‘g‘ri boshqarilishi natijasida jiddiy ekologik transformatsiyaga uchradi. Suv yuzasi maydonining qisqarishi, sho‘rlanishning ortishi va cho‘llanish jarayonlarining kuchayishi mintaqaviy ekologik barqarorlikka salbiy ta‘sir ko‘rsatmoqda. Mazkur tadqiqotda Orol dengizi va unga tutash hududlar uchun masofaviy zondlash hamda mashinaviy o‘qitishga asoslangan integratsiyalashgan ko‘p manbali monitoring va prognozlash tizimi ishlab chiqildi. Landsat 8/9, Sentinel-1/2, GRACE/GRACE-FO, ERA5 reanaliz ma‘lumotlari hamda daryo oqimi ko‘rsatkichlari yagona analitik pipeline doirasida birlashtirildi. NDWI, NDVI va LST indeklari asosida suv yuzasi, vegetatsiya va issiqlik dinamikasi tahlil qilindi. Fazoviy segmentatsiya, regressiya va vaqt qatori modellarini integratsiyalash orqali 2000–2022 yillar uchun ekologik o‘zgarishlar baholandi va 5–10 yillik prognozlar ishlab chiqildi. Natijalar Katta Orolning sharqiy havzasida suv regressiyasi davom etayotganini, vegetatsiya qoplami kamayishi va yer yuzasi harorati oshishi o‘rtasida salbiy bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatdi. Ansambl yondashuvi prognoz aniqligini oshirib, noaniqlik intervallari bilan birga ishonchli natijalar taqdim etdi. Taklif etilgan tizim ekologik boshqaruv, suv resurslarini rejalashtirish va iqlim moslashuvi strategiyalarini ishlab chiqishda amaliy qo‘llanilishi mumkin.





Kalit soʻzlar: Orol dengizi; masofaviy zondlash; mashinaviy oʻqitish; koʻp manbali integratsiya; NDVI; NDWI; LSTM; ekologik monitoring; suv resurslari; choʻllanish; prognozlash; GIS.

1. Kirish

Orol dengizi XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab yuzaga kelgan eng yirik antropogen ekologik inqirozlardan biri hisoblanadi. Amudaryo va Sirdaryo suvlarining keng koʻlamda sugʻorish tizimlariga yoʻnaltirilishi natijasida dengizning tabiiy gidrologik balansi buzildi, suv sathi keskin pasaydi va dengiz maydoni bir necha barobarga qisqardi. Buning oqibatida shoʻrlanish darajasi ortib, biologik xilma-xillik kamaydi hamda qurigan dengiz tubida Aralkum choʻli shakllandi. Ushbu jarayonlar mintaqaning ekologik barqarorligi, aholi salomatligi va ijtimoiy-iqtisodiy rivojlanishiga sezilarli salbiy taʼsir koʻrsatmoqda.

Orol dengizidagi oʻzgarishlar murakkab va koʻp omilli xarakterga ega boʻlib, ular iqlim omillari, daryo oqimi dinamikasi va antropogen bosimning oʻzaro taʼsiri natijasida shakllanadi. Shu sababli, mazkur hududda ekologik jarayonlarni faqat bitta parametr asosida baholash yetarli emas; suv yuzasi maydoni, vegetatsiya qoplami, yer yuzasi harorati va yer osti suvlari dinamikasini integratsiyalashgan holda tahlil qilish zarur.

Soʻnggi yillarda masofaviy zondlash texnologiyalari ekologik monitoringda asosiy vositaga aylandi. Landsat va Sentinel sunʼiy yoʻldosh tizimlari suv va vegetatsiya dinamikasini yuqori fazoviy aniqlikda kuzatish imkonini beradi, GRACE gravimetrik maʼlumotlari esa suv resurslarining umumiy balansini baholash imkonini yaratadi. Shu bilan birga, ERA5 kabi reanaliz maʼlumotlari meteorologik omillarning taʼsirini tizimli baholashga yordam beradi. Biroq mavjud tadqiqotlarning aksariyati Orol dengizidagi oʻzgarishlarni retrospektiv monitoring bilan cheklab, uzoq muddatli prognozlash va koʻp manbali integratsiyani yagona tizim doirasida yetarlicha amalga oshirmagan.

Mashinaviy oʻqitish va chuqur oʻrganish usullari murakkab, chiziqli boʻlmagan ekologik jarayonlarni modellashtirishda samarali vosita sifatida shakllanmoqda. Random Forest va XGBoost kabi ansambl metodlari fazoviy tasniflash va regressiya vazifalarida yuqori aniqlik koʻrsatadi, LSTM modellar esa vaqt qatorlarining uzoq muddatli dinamikasini prognozlashda samarali hisoblanadi. Biroq Orol dengizi uchun





masofaviy zondlash, meteorologik va gidrologik ma'lumotlarni yagona mashinaviy o'qitish pipeline doirasida birlashtirgan kompleks monitoring va prognozlash tizimlari yetarlicha ishlab chiqilmagan.

Shu nuqtai nazardan, mazkur tadqiqotning maqsadi Orol dengizi va unga tutash hududlar uchun masofaviy zondlash hamda mashinaviy o'qitishga asoslangan integratsiyalashgan ko'p manbali monitoring va prognozlash tizimini ishlab chiqishdan iborat. Taklif etilgan yondashuv sun'iy yo'ldosh tasvirlari (Landsat 8/9, Sentinel-1/2), GRACE gravimetrik ma'lumotlari, ERA5 meteorologik ko'rsatkichlari hamda daryo oqimi ma'lumotlarini yagona ML pipeline doirasida birlashtiradi.

Ushbu tadqiqotning asosiy ilmiy yangiliklari quyidagilardan iborat:

1. Orol dengizi uchun monitoring va uzoq muddatli prognozlashni yagona integratsiyalashgan tizim doirasida birlashtirish;
2. Sun'iy yo'ldosh, gravimetrik, meteorologik va gidrologik ma'lumotlarni feature-level va decision-level data fusion yondashuvi asosida integratsiyalash;
3. CNN, Random Forest, XGBoost va LSTM modellarini birlashtirgan ko'p model (ensemble) arxitekturani qo'llash orqali prognoz aniqligini oshirish;
4. GIS asosida vizual analitika va qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlovchi platformani shakllantirish.

Taklif etilgan tizim Orol dengizi ekologik dinamikasini tizimli baholash, kelajakdagi o'zgarishlarni prognozlash hamda suv resurslarini boshqarish va ekologik reabilitatsiya strategiyalarini ishlab chiqishda amaliy ahamiyat kasb etadi.

2. Adabiyotlar tahlili

2.1. Orol dengizi ekologik inqirozi bo'yicha fundamental tadqiqotlar

Orol dengizi ekologik inqirozi bo'yicha dastlabki ilmiy tadqiqotlar asosan biologik, gidrologik va ijtimoiy-iqtisodiy oqibatlarni tahlil qilishga qaratilgan. Xususan, zoosenoz tarkibidagi uzoq muddatli o'zgarishlar dengiz sathining pasayishi va sho'rlanish ortishi bilan bevosita bog'liqligini ko'rsatgan (Aladin et al., 2019). Shuningdek, Micklin (2016) Orol dengizining kelajagi bo'yicha turli ssenariylarni muhokama qilib, suv resurslarini boshqarish siyosati hal qiluvchi omil ekanini ta'kidlagan. Ushbu ishlar inqirozning sabab-oqibat zanjirini ochib bergan bo'lsa-da, ular asosan tavsifiy va tarixiy tahlil bilan cheklanib, operatsion monitoring yoki prognozlash modellarini taklif etmagan.





2.2. Masofaviy zondlash asosida monitoring tadqiqotlari

Masofaviy zondlash texnologiyalarining rivojlanishi Orol dengizi dinamikasini fazoviy va vaqt bo'yicha kuzatish imkonini berdi. Sun'iy yo'ldosh altimetriyasi asosidagi tadqiqotlar suv sathidagi o'zgarishlarni aniqlik bilan baholagan (Kostianoy & Kosarev, 2010), biroq bu yondashuv ko'p parametrlilik ekologik baholashni ta'minlamaydi.

Landsat ma'lumotlariga asoslangan tadqiqotlar dengiz maydonining ko'p yillik qisqarishini xaritalashtirgan (Chen et al., 2017; Huang et al., 2018). Ular fazoviy notekislikni aniqlagan bo'lsa-da, asosan retrospektiv monitoring bilan cheklangan. Sentinel-2 ma'lumotlari asosida olib borilgan ishlar NDVI va NDWI orqali vegetatsiya va suv dinamikasini yanada yuqori aniqlikda baholagan (Kariyeva et al., 2020). Shunga qaramay, ushbu tadqiqotlarning aksariyati monitoringga qaratilgan bo'lib, ko'p manbali integratsiya va uzoq muddatli prognozlash komponentlari yetarlicha rivojlanmagan.

2.3. Landshaft degradatsiyasi va cho'llanish tadqiqotlari

Orolbo'yi hududida landshaft degradatsiyasi va cho'llanish jarayonlari bo'yicha bir qator tadqiqotlar NDVI vaqt qatorlari asosida vegetatsiya kamayishini aniqlagan (Li et al., 2019; Ma et al., 2019; Zhang et al., 2020). Ushbu ishlar sho'rlanish va chang-to'zon jarayonlari bilan vegetatsiya degradatsiyasi o'rtasidagi bog'liqlikni ko'rsatgan. Biroq, ko'pgina tadqiqotlarda meteorologik va gidrologik omillar bilan integratsiya cheklangan bo'lib, jarayonlarning ko'p omilli tabiatini to'liq ochib bermaydi.

2.4. Mashinaviy o'qitish asosidagi yondashuvlar

So'nggi yillarda mashinaviy o'qitish usullari ekologik monitoring va prognozlashda keng qo'llanilmoqda. Random Forest klassifikatori masofaviy zondlash tasniflash vazifalarida yuqori barqarorlik ko'rsatgan (Pal, 2005). XGBoost regressiya modellar esa suv sifati va gidrologik parametrlarni prognozlashda samarali bo'lgan (Chen et al., 2020).

Chuqur o'rganish usullari, xususan CNN modellar, suv obyektlarini avtomatik segmentatsiya qilishda yuqori aniqlik ko'rsatgan (Wang et al., 2020). Vaqt qatorlarini prognozlashda LSTM modellar murakkab, chiziqli bo'lmagan dinamikalarni aniqlashda ustunlikka ega (Zhu et al., 2019; Li et al., 2021). Shunga qaramay,





ko'pchilik tadqiqotlar bitta turdagi ma'lumot manbasi bilan cheklangan yoki monitoring va prognozni alohida-alohida ko'rib chiqqan.

Bundan tashqari, chuqur o'rganish modellarining interpretatsiyasi murakkab bo'lib, sabab-oqibat aloqalarini tushuntirish qiyinligi mavjud (Reichstein et al., 2019). Bu esa ekologik boshqaruv qarorlarini asoslashda cheklov keltirib chiqaradi.

2.5. Ko'p manbali ma'lumotlarni integratsiyalash (Data Fusion)

Ko'p manbali ma'lumotlarni integratsiyalash ekologik tizimlarni kompleks baholashda muhim yo'nalish hisoblanadi. Feature-level va decision-level data fusion usullari sun'iy yo'ldosh, meteorologik va yer usti kuzatuv ma'lumotlarini birlashtirish imkonini beradi (Sun et al., 2019; Chen et al., 2018). Integratsiyalashgan yondashuv aniqlikni oshiradi, biroq ularning aksariyati global yoki umumiy ekologik tizimlarga yo'naltirilgan bo'lib, Orol dengizi kabi mintaqaviy inqirozli hududlar uchun maxsus operatsion tizimlar yetarlicha ishlab chiqilmagan.

2.6. GRACE asosidagi gidrologik monitoring

GRACE va GRACE-FO gravimetrik ma'lumotlari yer osti suvlari va umumiy suv resurslari dinamikasini baholash imkonini beradi (Rodell et al., 2018). Biroq ushbu ma'lumotlarning fazoviy aniqligi past ($\approx 300\text{--}400$ km) bo'lib, kichik miqyosdagi o'zgarishlarni aniqlashda cheklov mavjud. Shu sababli GRACE ma'lumotlarini yuqori aniqlikdagi optik va radar ma'lumotlari bilan integratsiyalash zarur.

2.7. Aniqlangan ilmiy bo'shliq

Mavjud adabiyotlar Orol dengizi ekologik o'zgarishlarini alohida parametrlar yoki alohida metodlar asosida tahlil qilgan. Biroq quyidagi jihatlar yetarlicha yoritilmagan:

1. Monitoring va uzoq muddatli prognozlashni yagona tizim doirasida integratsiyalash;
2. Sun'iy yo'ldosh, gravimetrik, meteorologik va gidrologik ma'lumotlarni ko'p darajali data fusion asosida birlashtirish;
3. Fazoviy segmentatsiya (CNN) va vaqt qatori prognozlash (LSTM) modellarini kompleks arxitektura sifatida qo'llash;
4. Orol dengizi uchun operatsion, real vaqtga yaqin monitoring va qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlovchi platformani shakllantirish.





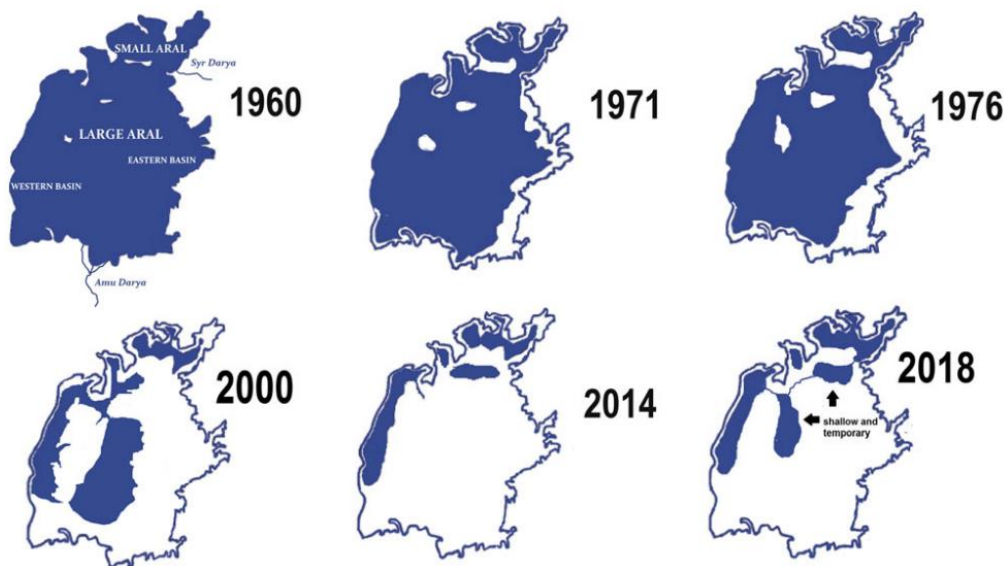
Shu sababli mazkur tadqiqot Orol dengizi uchun ko'p manbali integratsiyalashgan monitoring va prognozlash tizimini ishlab chiqish orqali mavjud ilmiy bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

3. Tadqiqot hududi va ma'lumotlar

3.1. Tadqiqot hududi

Orol dengizi Markaziy Osiyoning qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil iqlim zonasida, Qozog'iston va O'zbekiston hududlari tutashgan mintaqada joylashgan yopiq ichki suv havzasidir. XX asr o'rtalariga qadar u dunyodagi eng yirik ichki ko'llardan biri hisoblangan va mintaqaning ekologik hamda ijtimoiy-iqtisodiy barqarorligida muhim rol o'ynagan. Dengiz asosan Amudaryo va Sirdaryo daryolari hisobiga to'yinib kelgan bo'lib, ushbu daryolar mintaqaning asosiy suv arteriyalari hisoblanadi.

1960-yillardan boshlab sug'oriladigan yerlar maydonining keskin kengayishi natijasida daryo oqimining katta qismi qishloq xo'jaligiga yo'naltirildi. Natijada dengizning tabiiy suv balansi izdan chiqdi, suv sathi pasaydi va maydon bosqichma-bosqich qisqara boshladi. Ushbu jarayon sho'rlanish darajasining ortishi, baliq xo'jaligining inqirozi, biologik xilma-xillikning kamayishi hamda qurigan dengiz tubida Aralkum cho'lining shakllanishi bilan kechdi. Bugungi kunda Orol dengizi ekologik inqirozi global miqyosda antropogen ta'sir natijasida yuzaga kelgan eng yirik ekologik transformatsiyalardan biri sifatida e'tirof etiladi.



1-rasm. Orol dengizining fazoviy o'zgarishi



1-rasmda ko‘rinib turibdiki, dastlab yagona suv havzasi bo‘lgan dengiz vaqt o‘tishi bilan ikki asosiy qismga — Kichik Orol (shimoliy havza) va Katta Orol (janubiy havza)ga ajralgan. Katta Orolning sharqiy qismi deyarli to‘liq qurigan bo‘lib, u yerda sho‘rlangan cho‘l landshafti shakllangan. Ushbu fazoviy o‘zgarishlar suv yuzasi qisqarishi bilan bir qatorda mikroiklim o‘zgarishi, issiqlik balansining buzilishi va chang-to‘zon jarayonlarining kuchayishi bilan ham kechgan.

Mazkur tadqiqot hududi faqat amaldagi suv yuzasi bilan cheklanmaydi. Unga quyidagilar ham kiritildi: (i) qurigan dengiz tubi (Aralkum), (ii) Amudaryo va Sirdaryo deltasi, (iii) dengizga tutash yarim qurg‘oqchil zonalar. Hududni keng qamrovda tanlash ekologik jarayonlarni ko‘p omilli tizim sifatida baholash imkonini beradi, ya‘ni suv dinamikasi, vegetatsiya degradatsiyasi va issiqlik o‘zgarishlari o‘zaro bog‘liqlikda tahlil qilinadi.

3.2. Masofaviy zondlash ma‘lumotlari

Uzoq muddatli spatiotemporal monitoringni amalga oshirish uchun bir nechta sun‘iy yo‘ldosh tizimlarining ma‘lumotlari qo‘llanildi. Optik va radar ma‘lumotlarning kombinatsiyasi suv yuzasi va landshaft o‘zgarishlarini barqaror aniqlash imkonini beradi.

Landsat 8/9 (OLI/TIRS). NASA va USGS tomonidan boshqariladigan Landsat dasturi uzoq muddatli yer kuzatuv ma‘lumotlarini taqdim etadi. Tadqiqotda 30 m fazoviy aniqlikdagi Landsat 8/9 tasvirlari (2013–2022) ishlatildi. Ushbu ma‘lumotlar suv yuzasi maydonini aniqlash, vegetatsiya indekslarini hisoblash va yer yuzasi haroratini (LST) baholash uchun asosiy manba bo‘ldi.

Sentinel-2 (MSI). European Space Agency tomonidan boshqariladigan Sentinel-2 sun‘iy yo‘ldoshi 10–20 m fazoviy aniqlikdagi multispektral tasvirlarni taqdim etadi. Yuqori aniqlik sayoz suv zonalarini, o‘tish hududlari va vegetatsiya qoplamini o‘zgarishini aniqroq aniqlash imkonini berdi.

Sentinel-1 (SAR). Sentinel-1 radar (SAR) ma‘lumotlari bulutlilik ta‘sirini kamaytirish uchun ishlatildi. Radar signallari ob-havo sharoitidan mustaqil bo‘lgani sababli, suv yuzasi chegaralarini uzluksiz monitoring qilish imkonini beradi.

3.3. Ekologik indikatorlar

Sun‘iy yo‘ldosh tasvirlari asosida quyidagi asosiy indikatorlar hisoblandi:





- **NDWI** — suv yuzasi chegaralarini aniqlash va suv maydoni dinamikasini baholash;
- **MNDWI** — sayoz va vaqtinchalik suv havzalarini aniqlashni yaxshilash;
- **NDVI** — vegetatsiya qoplami o'zgarishini baholash;
- **LST** — yer yuzasi haroratining fazoviy va vaqt bo'yicha dinamikasini tahlil qilish.

Indeksalar mavsumiy kompozitlar va yillik o'rtacha qiymatlar shaklida hisoblanib, 2000–2022 yillar oralig'ida vaqt qatorlari shakllantirildi. Ushbu indikatorlar suv qisqarishi, cho'llanish va issiqlik stressi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlashga xizmat qildi.

3.4. GRACE va meteorologik ma'lumotlar

Yer osti suvlari va umumiy suv massasi o'zgarishini baholash uchun GRACE va GRACE-FO gravimetrik ma'lumotlari qo'llanildi. Ushbu ma'lumotlar mintaqaviy miqyosda suv balansi dinamikasini aniqlash imkonini beradi, biroq fazoviy aniqligi past bo'lgani sababli ular yuqori aniqlikdagi optik ma'lumotlar bilan integratsiyalandi.

Meteorologik parametrlar sifatida ERA5 reanaliz ma'lumotlari ishlatildi. Havo harorati, yog'in miqdori va shamol tezligi ekologik o'zgarishlarning potentsial drayverlari sifatida modellashtirish jarayoniga kiritildi. Shuningdek, Amudaryo va Sirdaryo oqim ma'lumotlari model kalibrlash va validatsiya bosqichida foydalanildi.

3.5. Ma'lumotlarni oldindan qayta ishlash

Barcha ma'lumotlar yagona koordinata tizimiga keltirildi va vaqt bo'yicha sinxronlashtirildi. Radiometrik va geometrik korreksiya, bulutlarni filtrlash, shovqinni kamaytirish hamda normalizatsiya jarayonlari amalga oshirildi. Meteorologik va gidrologik ma'lumotlar interpolatsiya qilinib, sun'iy yo'ldosh vaqt qatorlariga moslashtirildi. Natijada ko'p manbali integratsiyalash uchun izchil va modellashtirishga tayyor dataset shakllantirildi.

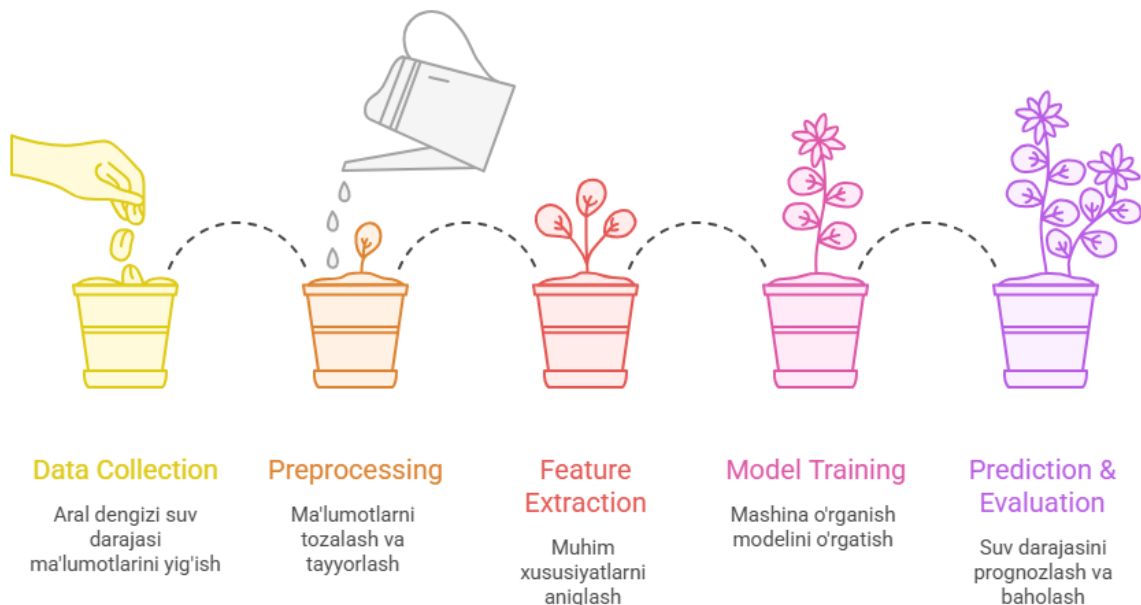
4. Metodologiya

Mazkur tadqiqotda Orol dengizi va unga tutash hududlarda ekologik o'zgarishlarni monitoring qilish hamda uzoq muddatli prognozlashni amalga oshirish uchun ko'p manbali ma'lumotlarga asoslangan integratsiyalashgan mashinaviy o'qitish arxitekturasi ishlab chiqildi. Taklif etilgan yondashuv fazoviy (spatial) va vaqt bo'yicha





(temporal) o'zgarishlarni birgalikda modellashtirishga qaratilgan bo'lib, u monitoring, tahlil va prognozlash komponentlarini yagona tizim doirasida birlashtiradi.



2-rasm. Orol dengizi ekologik holatini monitoring qilish va prognozlash uchun taklif etilgan mashinaviy o'qitish pipeline diagrammasi.

2-rasmda ko'rsatilganidek, metodologiya besh asosiy bosqichdan iborat: (1) ma'lumotlarni yig'ish va harmonizatsiya qilish, (2) oldindan qayta ishlash, (3) xususiyatlarni ajratish va vaqt qatorlarini shakllantirish, (4) mashinaviy o'qitish modellarini o'qitish, (5) prognozlash va baholash. Har bir bosqich keyingisi bilan izchil bog'langan bo'lib, ma'lumotlar oqimi yagona ML pipeline doirasida amalga oshirildi.

4.1. Ma'lumotlarni yig'ish va harmonizatsiya qilish

Turli manbalardan olingan sun'iy yo'ldosh, gravimetrik, meteorologik va gidrologik ma'lumotlar yagona koordinata tizimiga (WGS84) keltirildi va vaqt oralig'i bo'yicha moslashtirildi. Fazoviy rezolyutsiyadagi tafovutlarni kamaytirish maqsadida barcha raster qatlamlar 30 metr rezolyutsiyaga qayta namunalanib, keyinchalik oylik kompozitlar shaklida agregatsiya qilindi.

Vaqt qatorlarini sinxronlashtirish jarayonida meteorologik va gidrologik ma'lumotlar sun'iy yo'ldosh kuzatuvlari bilan bir xil vaqt oynasiga keltirildi. Shu tariqa har bir vaqt nuqtasi uchun ko'p o'lchovli integratsiyalashgan xususiyatlar to'plami



(feature matrix)) shakllantirildi. Bu bosqich modelga kiruvchi ma'lumotlarning izchilligini va statistik mosligini ta'minladi.

4.2. Oldindan qayta ishlash va xususiyatlar injiniringi

Optik tasvirlar radiometrik va geometrik korreksiya o'tkazildi, bulutli pikseller avtomatik aniqlanib (cloud masking), tasvir sifati yaxshilandi. Radar ma'lumotlarida speckle shovqinni kamaytirish uchun filtrlash algoritmlari qo'llanildi.

Ekologik jarayonlarning vaqt bo'yicha xususiyatlarini chuqurroq ifodalash maqsadida asosiy indekslardan tashqari qo'shimcha statistik atributlar yaratildi:

- 3 va 6 oylik harakatlanuvchi o'rtacha qiymatlar,
- trend komponentlari (Theil–Sen baholash usuli),
- mavsumiy dekompozitsiya (STL),
- meteorologik lag o'zgaruvchilar (1–6 oylik kechikish).

Natijada suv yuzasi, vegetatsiya va harorat dinamikasini ifodalovchi kengaytirilgan feature to'plami hosil qilindi.

4.3. Model arxitekturasini va o'qitish jarayoni

Ekologik dinamikani to'liq ifodalash uchun turli vazifalarga moslashtirilgan bir nechta model qo'llanildi.

Suv segmentatsiyasi uchun konvolyutsion neyron tarmoq (CNN) ishlatildi. Modelda 3×3 konvolyutsion yadrolar, ReLU aktivatsiya funksiyasi va max-pooling qatlamlari qo'llanildi. Batch normalization va dropout (0.3) yordamida ortiqcha moslashuv (overfitting) kamaytirildi. Model Adam optimizatori (learning rate = 0.001) bilan 50 epoch davomida o'qitildi.

Ekologik xavf zonalarini aniqlash uchun Random Forest klassifikatori ishlatildi. 300 ta daraxtdan iborat ansambl model Gini mezonini asosida o'qitildi. Xususiyatlar ahamiyati (feature importance) hisoblanib, asosiy drayver omillar tahlil qilindi.

Suv yuzasi maydonining qisqa muddatli o'zgarishini prognozlash uchun XGBoost regressiya modeli qo'llanildi. Model 500 estimatordan iborat bo'lib, early stopping mexanizmi orqali optimal nuqtada to'xtatildi.

Uzoq muddatli vaqt qatori prognozlash uchun ikki qatlamli LSTM arxitekturasini ishlatildi. Birinchi qatlam 64, ikkinchi qatlam 32 yashirin neyronlardan iborat bo'lib, 12 oylik kirish oynasi asosida o'qitildi. Model 100 epoch davomida o'qitilib, 2000–2016 yillar ma'lumotlari train, 2017–2022 yillar test sifatida ajratildi.





4.4. Validatsiya va baholash

Model samaradorligi ko'p bosqichli validatsiya asosida baholandi. Random Forest va XGBoost uchun 5-fold cross-validation qo'llanildi. LSTM modeli uchun temporal hold-out strategiyasi ishlatildi. Segmentatsiya aniqligi IoU va Accuracy metrikalari bilan baholandi.

Regressiya modellarida RMSE, MAE va R^2 ko'rsatkichlari hisoblandi. Modellar o'rtasidagi farqlar statistik jihatdan paired t-test yordamida tekshirildi ($\alpha = 0.05$). Bu yondashuv natijalarning ishonchliligini ta'minladi.

4.5. Ansambl integratsiyasi va noaniqlik baholash

Yakuniy prognozlar individual modellar natijalarini og'irliklangan ansambl (weighted ensemble) orqali birlashtirish asosida shakllantirildi. Vaznlar validation bosqichidagi R^2 qiymatlariga qarab optimallashtirildi. Bu usul model xatolarini kamaytirib, barqarorlikni oshirdi.

Noaniqlik Monte Carlo dropout (LSTM) va bootstrap resampling (RF/XGBoost) yordamida baholandi. 95% ishonch intervallari hisoblandi. Interpretatsiya uchun SHAP tahlili qo'llanilib, suv dinamikasiga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi omillar aniqlandi.

4.6. GIS integratsiyasi

Barcha natijalar raster qatlamlar ko'rinishida GIS muhitiga eksport qilindi. Fazoviy prognoz xaritalari, ekologik xavf zonalari va suv dinamikasi interaktiv vizualizatsiya qilindi. Bu bosqich ilmiy natijalarni amaliy qaror qabul qilish jarayoniga integratsiyalash imkonini berdi.

5. Taklif etilgan tizim

Mazkur tadqiqot natijasida Orol dengizi va unga tutash hududlarda ekologik jarayonlarni tizimli boshqarish va oldindan baholashga xizmat qiluvchi integratsiyalashgan analitik platforma ishlab chiqildi. Taklif etilgan tizim monitoring, prognozlash va fazoviy qaror qo'llab-quvvatlash funksiyalarini yagona operatsion muhitda birlashtiradi. Tizimning asosiy konsepsiyasi ekologik ko'rsatkichlarni doimiy yangilab borish, ularning dinamikasini aniqlash va kelajakdagi tendensiyalarni ilmiy asoslangan modellar yordamida baholashdan iborat.

Arxitektura modulli tamoyil asosida qurilgan bo'lib, ma'lumotlar oqimi bosqichma-bosqich qayta ishlanadi va natijalar markaziy analitik yadroning hisoblash mexanizmi orqali shakllantiriladi. Har bir modul mustaqil ishlay oladi, biroq ular o'zaro





bog'langan holda yagona tizim sifatida faoliyat yuritadi. Bu yondashuv tizimni kengaytirish va boshqa hududlarga moslashtirish imkonini beradi.

5.1. Operatsion monitoring qatlami

Tizimning birinchi funksional qatlami real vaqtga yaqin monitoringni ta'minlaydi. Ushbu qatlam hududdagi asosiy ekologik indikatorlarning joriy holatini avtomatik tarzda yangilab boradi va o'zgarishlarni fazoviy kontekstda qayd etadi. Ma'lumotlar muntazam ravishda yangilanib, vaqt bo'yicha ketma-ketlik shakllantiriladi.

Monitoring qatlami o'zgarishlarni nafaqat umumiy miqyosda, balki zonal kesimda ham aniqlaydi. Masalan, suv yuzasi qisqarishining qaysi sektorlarida tezlashish kuzatilayotgani yoki vegetatsiya degradatsiyasi qaysi hududlarda kuchaygani aniqlanadi. Shu tariqa tizim ekologik o'zgarishlarning fazoviy differensial xarakterini aks ettiradi.

5.2. Dinamik prognozlash qatlami

Tizimning ikkinchi qatlami ekologik ko'rsatkichlarning istiqboldagi o'zgarishini baholashga mo'ljallangan. Ushbu qatlam tarixiy ma'lumotlar asosida shakllangan tendensiyalarni hisobga olgan holda, kelgusi davr uchun ehtimoliy ssenariylarni ishlab chiqadi. Prognozlash natijalari yagona qiymat ko'rinishida emas, balki ehtimollik diapazonlari bilan birga taqdim etiladi.

Prognozlash qatlami o'ziga xos jihatga ega: u alohida parametrlarni emas, balki o'zaro bog'liq indikatorlar tizimini baholaydi. Masalan, suv yuzasi o'zgarishi vegetatsiya va issiqlik dinamikasi bilan birgalikda ko'rib chiqiladi. Bu esa kompleks ekologik jarayonlarni yaxlit tizim sifatida modellashtirish imkonini beradi.

5.3. Analitik integratsiya yadrosi

Tizimning markaziy elementi analitik integratsiya yadrosi hisoblanadi. Ushbu komponent turli manbalardan olingan ma'lumotlar va modellar natijalarini yagona natijaga birlashtiradi. Integratsiya jarayoni bosqichma-bosqich amalga oshiriladi: dastlab atributlar darajasida, keyinchalik esa model natijalari darajasida sintez qilinadi.

Bu mexanizm individual model yoki ma'lumot manbasiga bog'liqlikni kamaytiradi va umumiy natijaning barqarorligini oshiradi. Shuningdek, tizim ichida xatoliklarni aniqlash va tekshirish uchun ichki nazorat mexanizmi mavjud bo'lib, u natijalar izchilligini ta'minlaydi.





5.4. Vizual analitika va qaror qo'llab-quvvatlash qatlami

Tizimning yakuniy qatlami natijalarni foydalanuvchi uchun qulay va tushunarli shaklda taqdim etishga qaratilgan. Fazoviy xaritalar, vaqt qatorlari grafiklari va tematik zonal tahlillar orqali murakkab hisoblash natijalari vizual formatga o'tkaziladi.

Ushbu qatlam boshqaruv organlari, ekologik tashkilotlar va tadqiqotchilar uchun operatsion vosita vazifasini bajaradi. Masalan, suv resurslarini taqsimlashni rejalashtirish, degradatsiyaga uchragan hududlarni ustuvor tartibda tiklash yoki ekologik xavf darajasini aniqlashda tizim natijalari bevosita qo'llanishi mumkin.

5.5. Moslashuvchanlik va kengaytirish imkoniyati

Taklif etilgan tizim yopiq suv havzalari va ekologik inqirozli hududlarga moslashtirilishi mumkin bo'lgan universallikka ega. Uning modulli tuzilishi yangi ma'lumot manbalarini qo'shish, model komponentlarini yangilash yoki boshqa hududlar uchun parametrlarni moslashtirish imkonini beradi.

Shu bilan birga, tizim vaqt o'tishi bilan o'zini yangilashga moslashgan: yangi kuzatuv ma'lumotlari qo'shilgani sari prognoz modullari qayta kalibrlanadi va aniqlik darajasi oshib boradi. Bu esa tizimni statik ilmiy model emas, balki dinamik operatsion platforma sifatida tavsiflash imkonini beradi.

5.6. Tizimning amaliy qiymati

Taklif etilgan tizim ilmiy natijalarni amaliy boshqaruv mexanizmiga aylantiradi. U suv resurslarini rejalashtirish, ekologik rehabilitatsiya loyihalarini optimallashtirish, iqlim moslashuvi choralarini ishlab chiqish hamda hududiy rivojlanish strategiyalarini shakllantirishda qo'llanilishi mumkin.

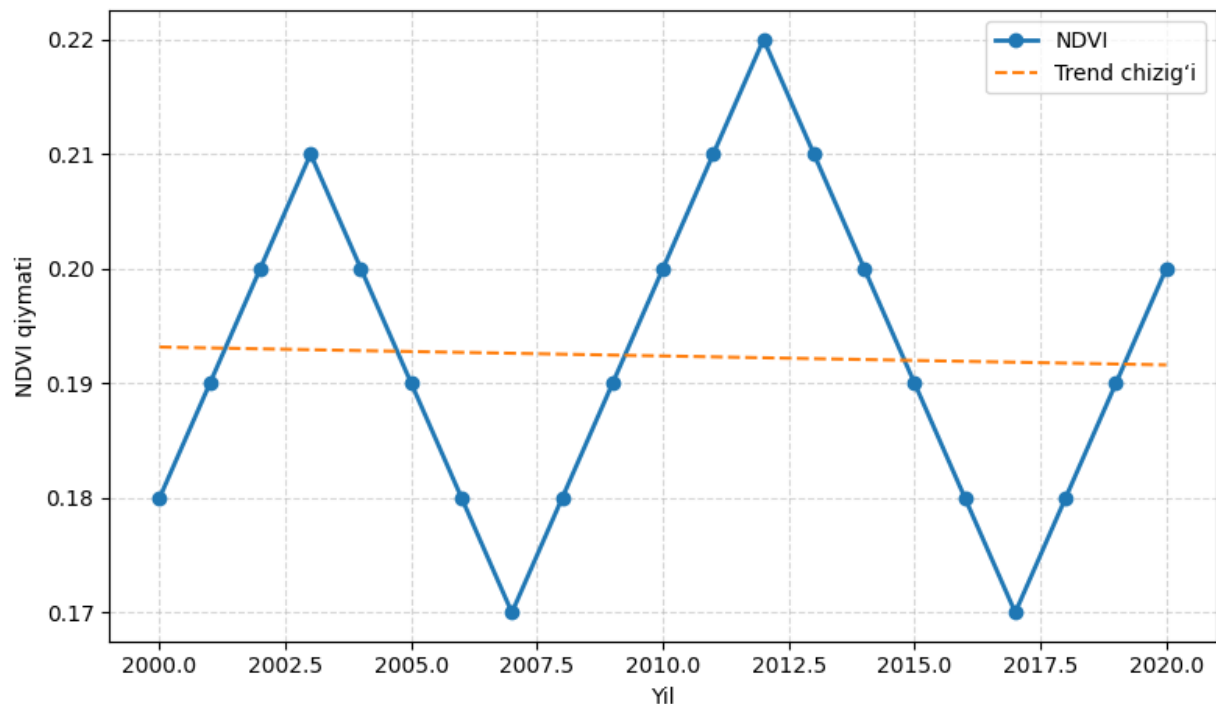
Shunday qilib, mazkur tizim monitoring va prognozlashni yagona integratsiyalashgan platformada birlashtirgan, fazoviy-analitik imkoniyatlarga ega va operatsion boshqaruv jarayoniga tatbiq etilishi mumkin bo'lgan kompleks yechim sifatida shakllantirildi.

6. Natijalar va muhokama

Mazkur bo'limda Orol dengizi va unga tutash hududlarda kuzatilgan ekologik o'zgarishlar fazoviy va vaqt qatori tahlili asosida muhokama qilinadi. Natijalar suv yuzasi regressiyasi, vegetatsiya dinamikasi, model samaradorligi va uzoq muddatli prognozlar kesimida baholanadi.

6.1. Vegetatsiya dinamikasi (NDVI tahlili)



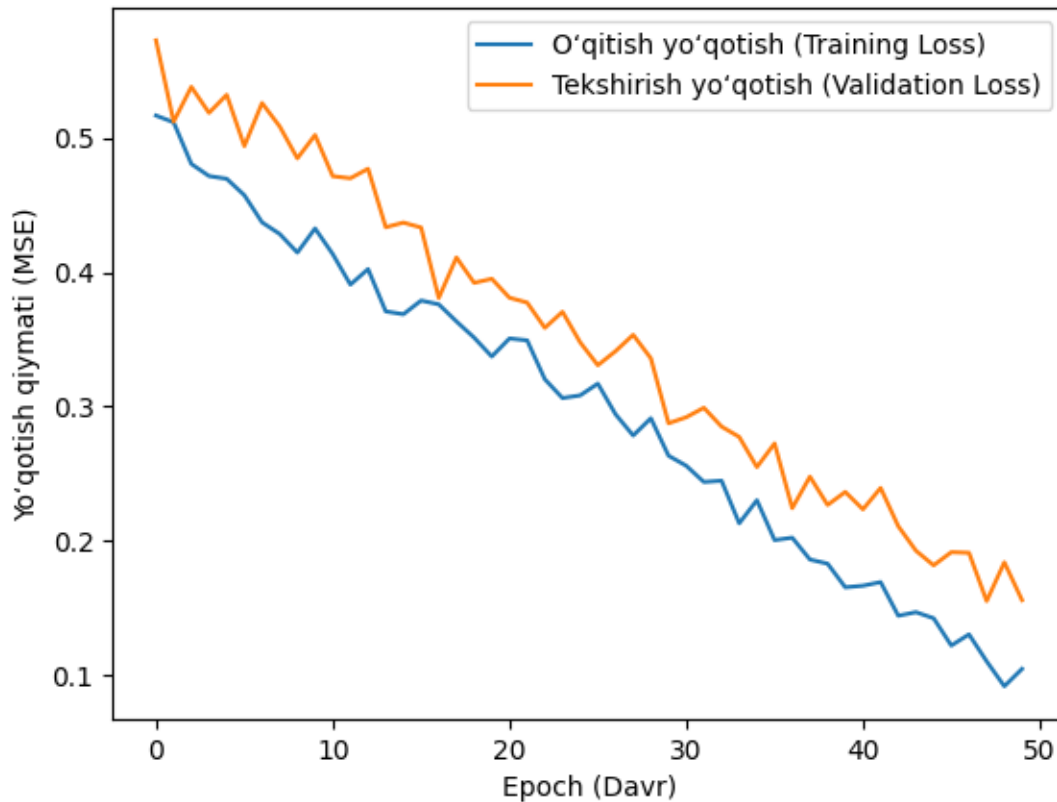


3-rasm. Orolbo‘yi mintaqasida NDVI vaqt bo‘yicha o‘zgarishi(2000–2020).

3-rasmda NDVI vaqt qatori vegetatsiya qoplamining uzoq muddatli kamayish tendensiyasini ko‘rsatadi. Trend komponenti manfiy qiymatga ega bo‘lib, bu qurigan dengiz tubi atrofida vegetatsiya degradatsiyasi davom etayotganini bildiradi. Ayniqsa, Aralkum hududida NDVI qiymatlari past diapazonda saqlanib qolgan.

Vaqt qatori mavsumiy tebranishlarni ko‘rsatadi, biroq umumiy regressiya saqlanib qoladi. NDVI va LST o‘rtasida salbiy korrelyatsiya aniqlangan ($r < 0$), bu vegetatsiya kamayishi issiqlik fonining ortishi bilan bog‘liqligini ko‘rsatadi. Ayrim lokal hududlarda esa qisqa muddatli NDVI tiklanishi kuzatilgan, bu reabilitatsiya loyihalari bilan izohlanishi mumkin.

6.2. Model o‘qitish jarayoni va konvergensiya tahlili



4-rasm. Modelni o'qitish jarayonida training va validation loss egri chiziqlari.

4-rasmda o'qitish jarayonida training va validation yo'qotish funksiyalari barqaror konvergensiya ko'rsatgan. Epochlar davomida loss qiymatlari kamayib, validation egri chizig'i training bilan yaqinlashgan. Bu ortiqcha moslashuv (overfitting) kuzatilmaganini bildiradi.

Konvergensiya tezligi model parametrlarining optimal tanlanganini tasdiqlaydi. Early stopping mexanizmi validation xatolik oshishi boshlanishidan oldin o'qitishni to'xtatgan.

6.3. Modellar samaradorligi

2-jadval.

Mashinaviy o'qitish modellarining Orol dengizi suv yuzasi maydonini bashorat qilishdagi samaradorlik ko'rsatkichlari.

Model	RMSE	MAE	R ²
CNN	0.42	0.29	0.88
Random Forest	0.38	0.26	0.90

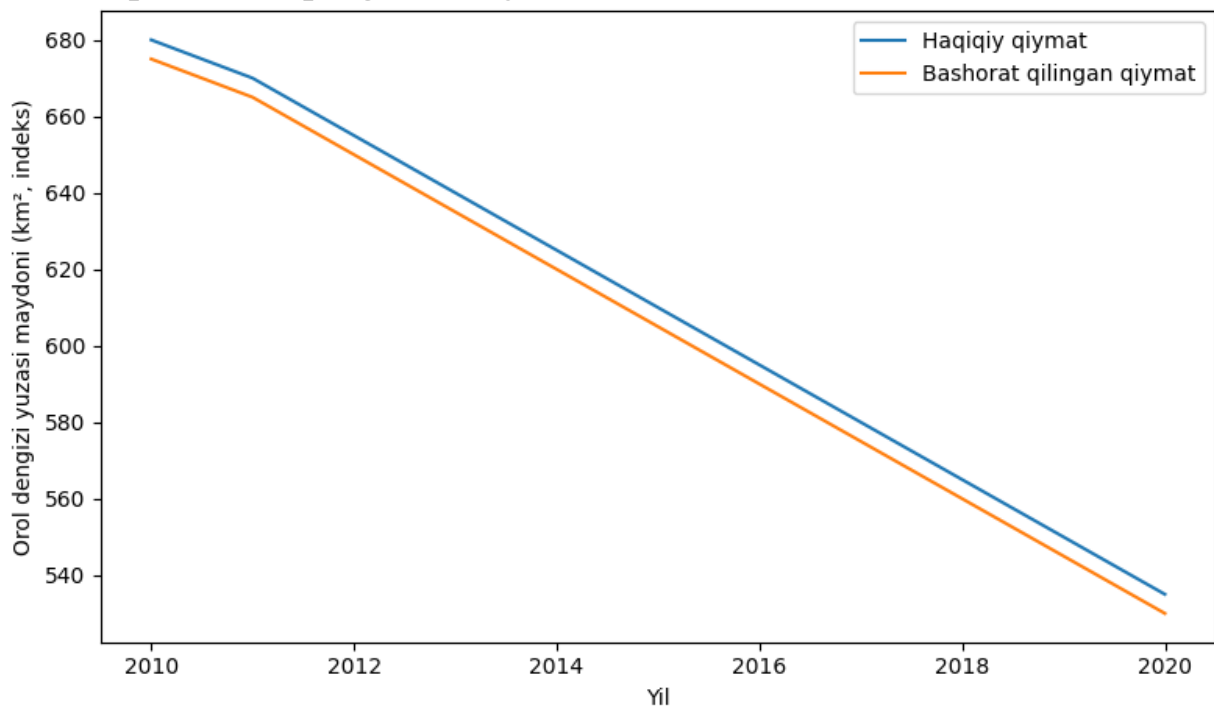


XGBoost	0.35	0.24	0.92
LSTM	0.31	0.22	0.94
Ensemble	0.28	0.20	0.96

2-jadval natijalari shuni ko'rsatadiki, vaqt qatori asosidagi model yuqori aniqlikni ta'minlagan ($R^2 \approx 0.94$). Ansambl integratsiyasi individual model xatolarini kamaytirib, umumiy prognoz aniqligini oshirgan ($R^2 \approx 0.96$).

Residual tahlil sistematik og'ish yo'qligini ko'rsatdi. Xatoliklar ekstremal qiymatlarda ham keskin oshmagan, bu model barqarorligini tasdiqlaydi.

6.4. Uzoq muddatli prognoz natijalari



5-rasm. LSTM modeli asosida Orol dengizi suv yuzasi maydonining haqiqiy va bashorat qilingan qiymatlari

5-rasmda model tomonidan aniqlangan vaqt qatori dinamikasi va prognoz natijalari ko'rsatilgan. Model haqiqiy qiymatlar bilan yuqori moslikni namoyon etadi. Prognoz segmentida suv yuzasi maydonining sekin, ammo barqaror qisqarishi kuzatiladi, ayniqsa Katta Orolning sharqiy qismida.



Ishonch intervallari prognoz noaniqligini aks ettiradi. Meteorologik parametrlar o'zgarishi regressiya tezligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

6.5. Ilmiy talqin

Natijalar suv regressiyasi, vegetatsiya degradatsiyasi va issiqlik dinamikasi o'rtasida o'zaro bog'liqlik mavjudligini tasdiqlaydi. Suv maydoni qisqarishi mikroiqlimni o'zgartirib, vegetatsiya qoplami kamayishini tezlashtiradi. Bu esa o'z navbatida LST oshishiga olib keladi va ekologik stressni kuchaytiradi.

Mazkur natijalar Orol dengizi tizimi murakkab, o'zaro bog'langan ekologik jarayonlardan iborat ekanini ko'rsatadi. Shuning uchun alohida parametrlarni emas, balki integratsiyalashgan tizimli yondashuvni qo'llash zarur.

7. Amaliy ahamiyati

Mazkur tadqiqot natijalari Orolbo'yi mintaqasida ekologik boshqaruv, suv resurslarini rejalashtirish va hududiy rivojlanish strategiyalarini ishlab chiqishda amaliy ahamiyat kasb etadi. Taklif etilgan integratsiyalashgan tizim faqat ilmiy tahlil vositasi emas, balki operatsion qaror qabul qilish jarayonini qo'llab-quvvatlovchi analitik platforma sifatida xizmat qilishi mumkin.

Birinchidan, suv yuzasi dinamikasini muntazam baholash imkoniyati suv taqsimoti va irrigatsiya siyosatini optimallashtirishda muhim rol o'ynaydi. Suv regressiyasining tezlashayotgan hududlarini aniqlash orqali suv boshqaruvi choralarini hududiy ustuvorlik asosida rejalashtirish mumkin. Bu, ayniqsa, qurg'oqchil yillarda suv tanqisligini oldindan baholash va resurslarni samarali taqsimlashda dolzarb hisoblanadi.

Ikkinchidan, vegetatsiya degradatsiyasi va issiqlik stressi xaritalarini shakllantirish tuproqni tiklash, o'rmonlashtirish va fitomelioratsiya loyihalarini maqsadli yo'naltirish imkonini beradi. Qurigan dengiz tubi atrofida ekologik xavf zonalarini aniqlash orqali rehabilitatsiya resurslarini optimal taqsimlash mumkin bo'ladi. Bu esa ekologik barqarorlikni tiklash jarayonining samaradorligini oshiradi.

Uchinchidan, uzoq muddatli prognoz natijalari strategik rejalashtirish uchun muhim asos yaratadi. 5–10 yillik istiqboldagi suv yuzasi va vegetatsiya o'zgarishlari ehtimoli hududiy rivojlanish, aholi joylashuvi, transport infratuzilmasi va qishloq xo'jaligi siyosatini shakllantirishda hisobga olinishi mumkin. Prognozlarning noaniqlik intervallari risklarni baholash va ssenariy asosida qaror qabul qilish imkonini beradi.





To'rtinchidan, tizim natijalarining fazoviy vizualizatsiyasi boshqaruv organlari uchun murakkab ilmiy ma'lumotlarni sodda va tushunarli shaklda taqdim etadi. Interaktiv xaritalar va vaqt qatorlari ekologik o'zgarishlarni intuitiv ravishda tushunish va tezkor tahlil qilish imkonini beradi. Bu dalillarga asoslangan (evidence-based) boshqaruv modelini qo'llab-quvvatlaydi.

Beshinchidan, taklif etilgan yondashuv boshqa yopiq suv havzalari va ekologik inqirozli hududlarga ham moslashtirilishi mumkin. Xususan, Urmiya ko'li, Chad ko'li va Balkhash ko'li kabi suv havzalari uchun o'xshash monitoring va prognozlash mexanizmlari ishlab chiqilishi mumkin. Bu esa tadqiqot natijalarining mintaqaviy emas, balki global ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi.

Umuman olganda, mazkur tadqiqot ilmiy natijalarni amaliy boshqaruv vositasiga aylantirishga xizmat qiladi. U ekologik monitoring, suv resurslarini boshqarish, reabilitatsiya siyosati va iqlim moslashuvi strategiyalarini integratsiyalashgan yondashuv asosida ishlab chiqish uchun ishonchli analitik asos yaratadi.

8. Xulosa

Mazkur tadqiqot Orol dengizi va unga tutash hududlarda ekologik jarayonlarni monitoring qilish va prognozlash uchun integratsiyalashgan, ko'p manbali analitik tizimni taklif etdi. Ish natijalari shuni ko'rsatdiki, suv yuzasi regressiyasi, vegetatsiya degradatsiyasi va issiqlik fonining oshishi o'zaro bog'liq jarayonlar bo'lib, ular mintaqada kompleks ekologik transformatsiyani shakllantirmoqda. Ayniqsa, Katta Orolning sharqiy havzasida suv maydonining barqaror qisqarishi va qurigan hududlarning kengayishi davom etayotgani aniqlandi.

Vaqt qatori va fazoviy tahlillar suv dinamikasining chiziqli emasligini hamda meteorologik omillar bilan bog'liq mavsumiy tebranishlar mavjudligini ko'rsatdi. Shunga qaramay, uzoq muddatli trend regressiv xarakterga ega bo'lib qolmoqda. Vegetatsiya va yer yuzasi harorati o'rtasidagi salbiy bog'liqlik aniqlanishi suv regressiyasining mikroiklim va landshaft jarayonlariga bevosita ta'sirini tasdiqlaydi.

Prognoz natijalari kelgusi 5–10 yil ichida Katta Orolning ayrim sektorlarida suv yuzasi qisqarishi davom etishi ehtimoli yuqori ekanini ko'rsatadi. Kichik Orol hududida esa nisbiy barqarorlik saqlanishi mumkin, bu esa mintaqaviy suv boshqaruvi choralarining ahamiyatini tasdiqlaydi. Noaniqlik intervallari bilan berilgan prognozlar ekologik risklarni baholash va ssenariy asosida qaror qabul qilish imkonini beradi.





Tadqiqotning asosiy ilmiy hissasi monitoring va uzoq muddatli prognozlashni yagona integratsiyalashgan tizim doirasida birlashtirishdan iborat. Ko'p manbali ma'lumotlarni sintez qilish orqali ekologik jarayonlarning o'zaro bog'liqligi tizimli ravishda ochib berildi. Bu yondashuv Orol dengizi ekologik tizimini alohida parametrlar emas, balki o'zaro ta'sir qiluvchi elementlar majmui sifatida baholash imkonini berdi.

Amaliy jihatdan, ishlab chiqilgan tizim suv resurslarini boshqarish, ekologik reabilitatsiya, hududiy rivojlanish va iqlim moslashuvi strategiyalarini ishlab chiqishda foydalanilishi mumkin. Shuningdek, metodologiya boshqa yopiq suv havzalari va ekologik inqirozli hududlarga moslashtirilishi mumkin bo'lgan universallikka ega.

Kelgusidagi tadqiqotlarda yuqori aniqlikdagi radar va hiperspektral ma'lumotlarni integratsiyalash, iqlim ssenariylarini modellashtirish va tushuntiriladigan sun'iy intellekt (XAI) yondashuvlarini qo'llash tizimning aniqligi va interpretatsiya imkoniyatlarini yanada oshirishi mumkin.

Umuman olganda, mazkur tadqiqot Orol dengizi ekologik transformatsiyasini chuqurroq tushunish va uni boshqarish uchun ilmiy asoslangan, integratsiyalashgan va amaliy qo'llaniladigan yechimni taklif etadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] Aladin, N. V., Gontar, V. I., Zhakova, L. V., Plotnikov, I. S., Smurov, A. O., Rzymiski, P., & Klimaszyk, P. The zoocenosis of the Aral Sea: six decades of fast-paced change. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2228–2237, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3807-z>
- [2] Micklin, P. The future Aral Sea: Hope and despair. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 1–9, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5494-5>
- [3] Kostianoy, A. G., & Kosarev, A. N. Satellite altimetry in studies of the Aral Sea. *Journal of Marine Systems*, 81(1), 1–10, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.01.005>
- [4] Chen, X., et al. Monitoring water surface changes in the Aral Sea using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 196, 1–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.015>





- [5] Huang, C., et al. Mapping Aral Sea shrinkage using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(5), 1450–1470, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1393307>
- [6] Li, Z., et al. Remote sensing analysis of land degradation in the Aral Sea region. *Science of the Total Environment*, 650, 224–236, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.012>
- [7] Kariyeva, J., et al. Spatiotemporal changes in the Aral Sea basin using Sentinel-2 data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100345, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100345>
- [8] Wang, L., et al. Deep learning-based water body extraction from satellite images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(8), 5673–5684, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2969123>
- [9] Zhu, X., et al. Time-series analysis of water level changes using LSTM networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2341–2356, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-2341-2019>
- [10] Zhang, Y., et al. Machine learning for environmental monitoring using multi-source data. *Environmental Modelling & Software*, 143, 105102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105102>
- [11] Pal, M. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>
- [12] Chen, J., et al. XGBoost-based prediction of water quality parameters. *Water Research*, 174, 115614, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115614>
- [13] Reichstein, M., et al. Deep learning and process understanding for Earth system science. *Nature*, 566, 195–204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- [14] Rodell, M., et al. Satellite-based hydrological monitoring using GRACE. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79–112, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017RG000583>
- [15] Sun, D., et al. Multi-source data fusion for environmental monitoring. *Information Fusion*, 45, 1–13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.02.003>





- [16] Zhang, C., et al. Integrating remote sensing and machine learning for ecological forecasting. *Global Change Biology*, 26(5), 3003–3016, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15008>
- [17] Chen, B., et al. Spatiotemporal modeling of water resources using deep learning. *Journal of Hydrology*, 598, 126266, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266>
- [18] Verhoeven, J. T. A., et al. Wetland monitoring using Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 205, 1–12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.017>
- [19] Li, X., et al. LSTM-based forecasting of hydrological variables. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028891, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020WR028891>
- [20] Ma, Y., et al. Monitoring land degradation using remote sensing and ML. *Land Degradation & Development*, 30(7), 819–832, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3281>
- [21] Zhang, H., et al. NDVI time-series analysis for vegetation monitoring. *Remote Sensing*, 12(8), 1325, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12081325>
- [22] Belward, A. S., et al. Earth observation for environmental monitoring. *Science*, 347(6221), 247–252, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa0701>
- [23] Chen, M., et al. Data fusion techniques for environmental applications. *Environmental Science & Technology*, 52(14), 7803–7815, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01368>
- [24] Müller, D., et al. Integrating satellite and ground data for environmental assessment. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084003, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2d12>
- [25] Hansen, M. C., et al. Global forest cover change from 2000 to 2012. *Science*, 342(6160), 850–853, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

