

UO‘K 004.9:519.876

## OROL DENGIZINING QURIGAN TUBIDA FITOMELIORATSIYA UCHUN EKOLOGIK YAROQLILIKNI BAHOLASHDA ENTROPIYA VAZNLI KO‘P MEZONLI QAROR QABUL QILISH MODELINI QO‘LLASH

*Raxmatov F.A.<sup>1</sup>, Xidirova Ch.M.<sup>1</sup>, + Karimov N.N.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

<sup>2</sup> O‘zbekiston davlat jahon tillari universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

+ norbek1194@gmail.com

**Annotatsiya.** Ushbu tadqiqotda Orol dengizining qurigan tubida o‘rmon barpo etish uchun ekologik yaroqli hududlarni aniqlashning yangi EWM-MCDM (Entropiya vaznli ko‘p mezonli qaror qabul qilish) modeli ishlab chiqildi. Google Earth Engine platformasi orqali Sentinel-2 va ERA5-Land ma‘lumotlaridan olingan 7 ta biofizik ko‘rsatkich tahlil qilindi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, o‘simliklar rivojlanishi uchun asosiy limiklovchi omillar – tuproq sho‘rlanishi (24.8%) va shamol tezligi (20.3%) hisoblanadi. Integral yaroqlilik xaritasiga ko‘ra, hududning 14.2% qismi yuqori, 28.5% qismi o‘rtacha yaroqli deb topildi, 23.5% maydon esa o‘ta yuqori sho‘rlanish sababli ekishga yaroqsiz deb aniqlandi. Mazkur metodologiya Orolbo‘yida fitomelioratsiya ishlarini raqamli rejalashtirish va resurslar samaradorligini oshirish imkonini beradi.

**Kalit so‘zlar:** fitomelioratsiya, Orol dengizining qurigan tubi, Google Earth Engine, EWM-MCDM, Sentinel-2, tuproq sho‘rlanishi, yaroqlilikni baholash, ko‘p mezonli qaror qabul qilish.

### 1 KIRISH

Orol dengizining qurishi XX va XXI asrning eng halokatli ekologik falokatlaridan biri bo‘lib, u nafaqat Markaziy Osiyo mintaqasining landshaftini o‘zgartirdi, balki global darajadagi iqlim o‘zgarishlariga ham o‘z ta‘sirini ko‘rsatdi. 1960-yillardan boshlab dengiz sathining shiddat bilan pasayishi natijasida suv havzasi sathi 29 metr dan ortiqqa tushib ketdi va maydoni 10 barobarga qisqardi. Buning natijasida hosil bo‘lgan “Orolqum” sahrosi bugungi kunda sayyoramizdagi eng faol chang va tuz aerozollarini tarqatuvchi manbaga aylandi. Tadqiqotlarga ko‘ra, har yili bu hududdan ko‘tarilayotgan millionlab tonna zaharli chang zarralari hatto Skandinaviya muzliklari va Antarktida qirg‘oqlarida ham aniqlanmoqda, bu esa muammoning transchegaraviy va global xarakterga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Qurigan tubning ochiq qolgan qismlari yuqori darajadagi tuz konlari bilan qoplangan bo‘lib, ular shamol eroziyasi natijasida mintaqadagi sug‘oriladigan dehqonchilik yerlarining unumdorligini keskin pasaytirmoqda va aholi o‘rtasida respirator hamda onkologik kasalliklarning ortishiga sabab bo‘lmoqda. Ushbu salbiy ekologik zanjirni uzishning yagona samarali yo‘li – hududda barqaror o‘simlik qoplamini (fitomelioratsiya) yaratishdir. Saksovul, qandim va cherkez kabi kserofit o‘simliklar qum ko‘chishini mexanik to‘xtatibgina qolmay, tuproqning gidrologik rejimini yaxshilashda va bioxilma-xillikni qayta tiklashda muhim funksional rol o‘ynaydi.

Biroq, Orol dengizining qurigan tubi o‘zining geokimyoviy va fizikaviy xususiyatlariga ko‘ra o‘ta murakkab va dinamik tizimdir. Hududning gidromorf va avtomorf xususiyatlari, yer osti suvlarining minerallashuv darajasi hamda tuproq teksturasi keskin farqlanadi. Bunday sharoitda o‘rmonlashtirish ishlarining muvaffaqiyati ko‘p jihatdan ekish uchun tanlangan hududning o‘simlik biologik talablariga qanchalik mos kelishiga bog‘liq. Hozirga qadar amalga oshirilgan melioratsiya tadbirlarida ko‘pincha hududni rayonlashtirishning an‘anaviy usullaridan foydalanilgan bo‘lib, ular real vaqtdagi dinamik o‘zgarishlarni va ekologik omillarning o‘zaro murakkab bog‘liqligini to‘liq qamrab olmaydi.

Masofadan zondlash va Sun‘iy intellekt texnologiyalarining rivojlanishi ekologik monitoringda yangi imkoniyatlar ochdi. Sentinel-2, Landsat va MODIS kabi sun‘iy yo‘ldoshlar yordamida vegetatsiya indeksleri, tuproq sho‘rlanishi va namlik ko‘rsatkichlarini yuqori aniqlikda olish mumkin. Shunga qaramay, amaliyotda ushbu ko‘rsatkichlarni umumlashtirib, yakuniy qaror qabul qilishda “og‘irlik ko‘rsatkichi” muammosi yuzaga keladi. An‘anaviy AHP (Analytic Hierarchy Process) kabi usullar mutaxassislarining

subyektiv fikrlariga tayanadi, bu esa qaror qabul qilishda noaniqlik va tizimli xatoliklarga olib kelishi mumkin.

Inson omilini minimallashtirish va ma'lumotlarning matematik obyektivligini ta'minlash maqsadida ushbu tadqiqotda Entropiya vaznli ko'p mezonli qaror qabul qilish modeli (EWM-MCDM) taklif etiladi. Axborot nazariyasining bir qismi bo'lgan entropiya tushunchasi tizimdagi noaniqlik va ma'lumotlarning variatsiyasini o'lchashga asoslangan. Agar biror ekologik ko'rsatkich (masalan, namlik) hudud bo'ylab katta o'zgaruvchanlikka ega bo'lsa, u hududni farqlashda yuqori axborot qiymatiga ega deb hisoblanadi va unga modelda kattaroq vazn beriladi. Bu yondashuv modelni inson aralashuviz sun'iy yo'ldoshdan olingan real ma'lumotlar asosida "o'z-o'zini sozlash" imkonini beradi.

Ushbu tadqiqotning innovatsion jihati shundaki, u nafaqat statik ko'rsatkichlarni, balki iqlimiy o'zgaruvchilar (BIOCLIM) va shamolning dinamik ko'rsatkichlarini integrallashgan holda yagona integral ko'rsatkichga aylantiradi. Shuningdek, tadqiqotda ishlab chiqilgan persentilga asoslangan chegara mantiqi hududning eng "kuchli" sektorlarini aniqlashda matematik aniqlikni ta'minlaydi. Bu esa Orol dengizining qurigan tubini ekologik reabilitatsiya qilishda cheklangan resurslarni (urug'lik, mablag', ishchi kuchi) eng yuqori natija beradigan nuqталarga yo'naltirish uchun ilmiy poydevor yaratadi.

Umuman olganda mazkur maqolada taqdim etilgan model Orolbo'yi mintaqasidagi murakkab ekologik jarayonlarni raqamli boshqarish va cho'llanishga qarshi kurashish samaradorligini prognoz qilishning yangi avlodini ifodalaydi.

## 2 ADABIYOTLAR TAHLILI

Orol dengizi havzasidagi ekologik o'zgarishlarni o'rganish va cho'llanish jarayonlariga qarshi kurashish masalalari so'nggi ellik yil davomida jahon olimlarining diqqat markazida bo'lib kelmoqda. Dastlabki tadqiqotlar asosan gidrologik rejimning buzilishi va suv sathining pasayish dinamikasini o'rganishga qaratilgan bo'lsa, keyinchalik urg'u qurigan tubda shakllangan yangi landshaftlarning fitomeliyorativ salohiyatini baholashga ko'chdi [1].

Ko'plab tadqiqotchilar Orolbo'yi mintaqasida o'simlik qoplamini tiklashda masofaviy zondlash ma'lumotlarining o'rnini alohida ta'kidlaydilar. Masalan, o'tgan o'n yillikda NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) kabi vegetatsiya indeksleri hududning yashillik darajasini monitoring qilishda asosiy vosita bo'lib xizmat qildi [2]. Biroq, mutaxassislarining fikricha, faqatgina bitta indeksga tayanib, hududning ekishga yaroqliligi haqida xulosa chiqarish kutilgan natijani bermaydi. Chunki NDVI mavjud o'simlikni ko'rsatadi, ammo tuproqning sho'rlanishi va kelajakdagi o'sish imkoniyatlarini to'liq ifodalamaydi [3].

So'nggi yillarda olimlar ko'p mezonli qaror qabul qilish usullarini ekologik modellashtirishga faol tatbiq eta boshladilar. Xususan, ierarxik tahlil jarayoni yordamida tuproq, iqlim va relyef omillarini umumlashtirgan holda yerlarning yaroqliligini baholash bo'yicha qator ishlar amalga oshirildi [4]. Ushbu uslubning eng katta yutug'i shundaki, u bir necha turdagi ma'lumotlarni bitta qarorga jamlash imkonini beradi. Shunga qaramay, AHP usulining jiddiy kamchiligi sifatida undagi "ekspert subyektivligi" qayd etiladi. Ya'ni, bir mutaxassis NDVI ko'rsatkichini muhim deb hisoblasa, boshqasi sho'rlanishni birinchi o'ringa qo'yadi. Bu esa yakuniy xaritalarning aniqligiga va ularning turli geografik hududlarda qo'llanilishiga salbiy ta'sir ko'rsatishi isbotlangan [5].

Shu nuqtayi nazardan, axborot nazariyasiga asoslangan Entropiya usuli EWM (Entropy Weight Method) ilmiy hamjamiyatda katta qiziqish uyg'otmoqda. Ayrim olimlar ushbu usulni iqlimiy o'zgarishlarni baholashda qo'llab, ma'lumotlarning dispersiyasi (o'zgaruvchanligi) orqali obyektiv vaznlarni aniqlash mumkinligini ko'rsatib berishdi [6]. Masalan, Xitoyning Tarim havzasida o'tkazilgan o'xshash tadqiqotlarda Entropiya usuli inson aralashuviz hududiy farqlarni aniqlashda an'anaviy usullardan 15-20% aniqroq natija berganligi kuzatildi [7]. Ammo Orol dengizining qurigan tubi kabi o'ta dinamik va tuzi yuqori hududlarda EWM usulini 7 ta turli ekologik parametr (shu jumladan, iqlim va shamol rejimi) bilan integratsiyalashgan holda qo'llash hali keng ko'lamda o'rganilmagan.

Bundan tashqari, adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, ko'p hollarda tadqiqotchilar statik ma'lumotlar bilan cheklanib qolishadi. Ya'ni, tuproqning holati o'rganiladi, lekin shamol eroziyasi va iqlimiy bosim ko'pincha e'tibordan chetda qoladi. Vaholanki, Orol tubida yosh ko'chatlarning yashab qolishi bevosita kuchli shamollar va sho'r changlarning harakatiga bog'liq [8]. Open-Meteo va GEE (Google Earth Engine) kabi platformalarning paydo bo'lishi ushbu dinamik omillarni ham modelga kiritish imkonini yaratdi, biroq ularni yagona integral baholash funksiyasiga  $S(x)$  birlashtirish metodologiyasi hali takomillashtirishga muhtoj [9].

2021-yildan keyingi ilmiy ishlarda ko'p mezonli qaror qabul qilish tizimlarida EWM usulidan foydalanish ko'lamini kengaytdi. Olimlar ushbu usulning asosiy ustunligi sifatida ma'lumotlar to'plamidagi "shovqin" va noaniqliklarni obyektiv baholay olish qobiliyatini ko'rsatmoqdalar [13]. Ayniqsa, qurg'oqchil

zonalarda tuproqning unumdorligini baholashda EWM usuli mutaxassislar beradigan vaznlardan ko'ra aniqroq natija berishi so'nggi yillarda o'tkazilgan qiyosiy tajribalarda o'z isbotini topdi [14].

Shuningdek, Google Earth Engine platformasining ekologik tahlildagi roli 2022-yildan boshlab keskin oshdi. Yangi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, bulutli hisoblash texnologiyalari Sentinel-2 va Landsat tasvirlarini real vaqtda qayta ishlab, yirik hududlarni (masalan, butun Orolqum sahrosini) 10-30 metrlik aniqlikda xaritalash imkonini beradi [15,17,19]. Biroq, ushbu ma'lumotlarni faqat vizuallashtirish yetarli emas; ularni integrallashgan yagona integral baho  $S(x)$  funksiyasiga aylantirish va avtomatik qaror qabul qilish mexanizmlarini yaratish hozirgi kunda ilmiy hamjamiyat oldidagi eng dolzarb vazifalardan biri bo'lib qolmoqda [16,20].

Xulosa qilib aytganda, mavjud ilmiy ishlar bizga quyidagi xulosalarni beradi:

1. Masofaviy zondlash ma'lumotlari yetarli, ammo ularni interpretatsiya qilishda hamon subyektivlik ustunlik qilmoqda [10].
2. Ko'p mezonli modellar mavjud, biroq ularning aksariyati Orolning maxsus geokimyoviy sharoitlariga (yuqori sho'rlanish va shamol bosimi) moslashmagan [11,18,20].
3. Chegaraviy qiymatlarni (threshold) belgilashda ko'pincha o'zgarmas (rigid) sonlardan foydalaniladi, bu esa hududning o'zgaruvchan tabiatiga mos kelmaydi [12].

Bizning tadqiqotimiz ushbu bo'shliqlarni to'ldirishga qaratilgan bo'lib, u nafaqat Entropiya usuli orqali vaznlarni obyektivlashtiradi, balki 7 ta xususiyatni birlashtirib, avtomatik moslashuvchan chegara orqali qaror qabul qilish tizimini taklif etadi. Bu esa avvalgi ishlardan farqli o'laroq, modelni ma'lumotlarning o'ziga tayanishga majbur qiladi.

### 3 TADQIQOT MUAMMOSI

Orol dengizining qurigan tubi, bugungi kunda dunyodagi eng yosh va agressiv shakllanayotgan "Orolqum" sahrosi, o'zining geokimyoviy va landshaft xususiyatlariga ko'ra o'ta nobarqaror hudud hisoblanadi. 5,4 million gektardan ortiq maydonni egallagan bu hududda fitomelioratsiya ishlarini tizimli tashkil etish, nafaqat texnik, balki murakkab matematik tahlilni talab qiladigan ko'p qirrali vazifadir [17].

Ushbu tadqiqot oldida turgan asosiy muammo – cheklangan iqtisodiy va biologik resurslarni hududning qaysi nuqtalariga yo'naltirish maksimal samaradorlik berishini aniqlashdir. Orol tubi bir jinsli bo'lmagan uchun, bir nuqtada muvaffaqiyatli bo'lgan ekish tajribasi, undan bir necha kilometr narida tuproq sho'rlanishi yoki shamol eroziyasi sababli muvaffaqiyatsizlikka uchrashi mumkin.

Ulkan maydon bo'ylab aniq qaror qabul qilish uchun biz "yaxlit hudud" tushunchasidan voz kechib, diskretizatsiya usulini qo'llaymiz. Bunda tadqiqot obyekti muntazam katakchalardan iborat bo'lgan Grid-matritsa ko'rinishiga keltiriladi.

Har bir katak (*Celli*) o'lchami  $1 \times 1$  km (yoki  $100 \times 100$  m) qilib belgilanib, u o'ziga xos "mikro-ekotizim" sifatida qaraladi. Bu yondashuv bizga har bir nuqtadagi ekologik holatni boshqalardan mustaqil ravishda baholash va hududni klasterlarga ajratish imkonini beradi. Natijada, umumiy hudud  $n$  ta mustaqil elementar birliklardan iborat to'plamga aylanadi:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}.$$

Har bir geografik katakning yaratish uchun biz 7 ta fundamental ekologik ko'rsatkichni ( $x_j$ ) tanlab oldik. Ushbu ko'rsatkichlar sun'iy yo'ldosh tasvirlari va meteorologik stansiya ma'lumotlari asosida shakllantirilgan bo'lib, ular o'simlikning hayotiy sikliga bevosita ta'sir qiluvchi omillardir:

$$X_j = [x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}, x_{j4}, x_{j5}, x_{j6}, x_{j7}],$$

bunda har bir o'zgaruvchi quyidagi mantiqiy yuklamaga ega:

- NDVI ( $x_{j1}$ ): Hududdagi mavjud o'simlik qoplaminin salohiyatini o'lchaydi;
- SI2 ( $x_{j2}$ ): Tuproqning sho'rlanish darajasi – Orol tubidagi asosiy cheklovchi omil;
- NDWI ( $x_{j3}$ ): Tuproq va sirtqi qatlamning namlik bilan ta'minlanganligi;
- WS ( $x_{j4}$ ): Shamolning o'rtacha tezligi – kuchli shamollar yosh ko'chatlarni qum ostida qoldirishi mumkin;
- Prec ( $x_{j5}$ ): Yillik atmosfera yog'inlari – tabiiy gidratatsiya Manbai;
- Temp ( $x_{j6}$ ): Havoning termal rejimi va uning bug'lanishga (evapotranspiratsiya) ta'siri;
- Elev ( $x_{j7}$ ): Relyefning balandlik farqi – yer osti suvlari yaqinligi va sho'r to'planish nuqtalarini belgilaydi.

Yuqorida ta'kidlangan 7 ta ekologik mezonni  $n$  ta geografik katak bilan bog'lash natijasida tadqiqotning boshlang'ich ma'lumotlar bazasi hisoblangan qarorlar matritsasi (D) shakllantiriladi. Ushbu matritsa har bir hududiy birlikning ekologik aksidir.

Matematik jihatdan  $n \times m$  o'lchamli (bu yerda  $n$  – kataklar soni,  $m=7$  – parametrlar soni) matritsa quyidagi ko'rinishga ega:

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} & x_{n6} & x_{n7} \end{bmatrix},$$

bu yerda har bir element  $x_{ij}$  –  $i$ -katakning  $j$ -mezon bo'yicha olingan aniq qiymatidir (masalan,  $x_{12}$  – birinchi katakdagi tuproq sho'rlanishi indeksining miqdori).

Matritsaning tarkibiy xususiyatlari:

1. Xilma-xillik: Matritsaning ustunlari turlicha o'lchov tizimlariga ega. Masalan,  $x_{11}$  (NDVI) [-1; 1] oralig'idagi o'lchovsiz son bo'lsa,  $x_{14}$  (Shamol tezligi) m/s birligida,  $x_{15}$  (yog'in) esa mm birligida ifodalangan.

2. Yo'nalishli ta'sir:

- Maximizatsiya:  $x_1, x_3, x_5$  ko'rsatkichlari (NDVI, Namlik, Yog'in) qanchalik baland bo'lsa, o'simlik uchun shunchalik ijobiy;

- Minimizatsiya:  $x_2, x_4, x_6$  ko'rsatkichlari (Sho'rlanish, Shamol, Harorat) qanchalik past bo'lsa, o'simlikning yashab qolish ehtimoli shunchalik yuqori bo'ladi.

Ushbu Qarorlar matritsasi Entropiya vaznli modelning kiruvchi ma'lumoti bo'lib xizmat qiladi. Keyingi bosqichda ushbu matritsa elementlari normalizatsiya qilinadi va har bir ustun (mezon) bo'yicha axborotning dispersiyasi hisoblanadi.

#### 4 TADQIQOT USULLARI

Ushbu tadqiqotning metodologik asosi sifatida ko'p mezonli qaror qabul qilish tizimlarida o'zining obyektivligi bilan ajralib turuvchi Entropiya vaznli usul tanlab olindi. Orol dengizi tubi kabi o'ta beqaror va inson aralashuvi qiyin bo'lgan hududlarda an'anaviy ekspert baholash usullari ko'pincha subyektiv xatoliklarga olib keladi. Chunki mutaxassisning shaxsiy tajribasi hududning real geokimyoviy xilma-xilligini to'liq qamrab ololmasligi mumkin. EWM esa vaznlarni taqsimlashda faqatgina kiruvchi ma'lumotlarning dispersiyasi va strukturaviy noaniqligiga tayanadi, bu esa natijalarning ilmiy xolisligini ta'minlaydi.

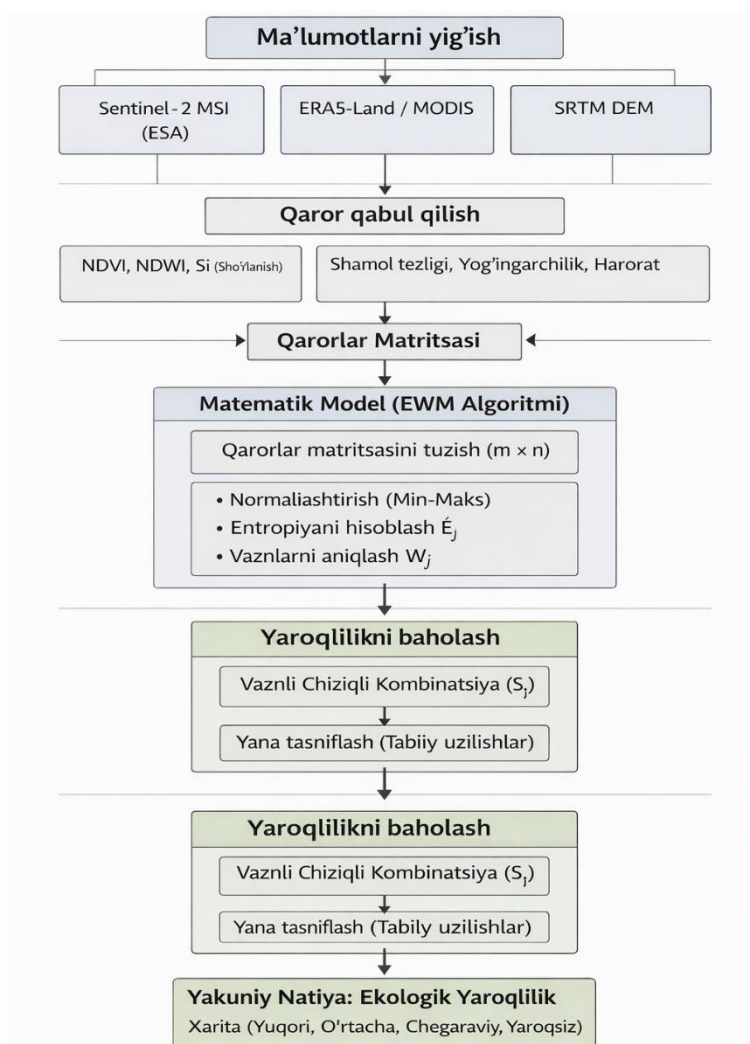
Tadqiqot doirasida olingan 7 ta ekologik ko'rsatkich o'zining tabiatiga ko'ra turli xil xarakterga ega. Masalan, NDVI indeksi birliksiz koeffitsient bo'lsa, shamol tezligi soniyasiga metr m/s bilan, yog'ingarchilik esa yillik millimetr mm bilan o'lchanadi. Ushbu ko'rsatkichlarni bitta matematik modelga birlashtirish uchun birinchi navbatda ularni [0, 1] diapazonidagi o'lchovsiz birlikka o'tkazish, ya'ni normalizatsiya qilish talab etiladi, bu jarayonda biz har bir parametrning o'simlik o'sishiga ta'sir yo'nalishini inobatga olamiz. Orol tubidagi ekologik sharoitda ba'zi parametrlar "ijobiy stimulyator", ba'zilari esa "salbiy" vazifasini o'taydi.

Modelning arxitekturasi 1-rasmda ko'rsatilgan uchta asosiy bosqichdan iborat: (1) Ma'lumotlarni yig'ish va birlamchi qayta ishlash, (2) EWM algoritmi asosida obyektiv vaznlarni hisoblash, va (3) Hududning yaroqlilik indeksini (Suitability Index) aniqlash.

Tanlangan parametrlar va ularning fizik xususiyatlari 1-jadvalda keltirilgan. Ushbu parametrlar Orol dengizi havzasidagi tashlab ketilgan ekin maydonlarida o'rmon barpo etishning o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olgan holda tanlandi. Xususan, NDVI va SI2 ko'rsatkichlari Sentinel-2 sun'iy yo'ldoshi yordamida yuqori aniqlikda (10 m) hisoblanib, ular hududning biologik unumdorligi va sho'rlanish darajasini belgilaydi. Shamol tezligi va harorat kabi iqlimiy omillar esa yosh ko'chatlarning dastlabki yashab qolish darajasiga bevosita ta'sir ko'rsatuvchi stress faktorlar sifatida modelga kiritildi.

Ijobiy yo'nalishli parametrlar (NDVI, Namlik, Yog'in): Ushbu omillarning qiymati qanchalik yuqori bo'lsa, hududning o'rmonlashtirish salohiyati shunchalik ortadi. Ularni normalizatsiya qilish uchun quyidagi formula qo'llaniladi:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \quad (1)$$



1-rasm. O'rmon yaratishni rejalashtirish bo'yicha aqlli tizimning metodologik sxemasi

1-jadval. O'rmon barpo etish uchun tanlangan ekologik omillar tavsifi

ID(x <sub>j</sub> )	Ko'rsatkich nomi	O'lchov birligi	Ma'lumot manbasi	Fazoviy ruxsat	Ta'sir yo'nalishi	Modeldagi roli
<b>\$x<sub>1</sub></b>	NDVI (O'simlik indeksi)	–	Sentinel-2	10 m	Ijobiy (+)	O'simlik salohiyati
<b>\$x<sub>2</sub></b>	SI2 (Tuproq sho'rlanishi)	–	Sentinel-2	10 m	Salbiy (-)	Cheklovchi omil
<b>\$x<sub>3</sub></b>	NDWI (Suv indeksi)	–	Sentinel-2	10 m	Ijobiy (+)	Namlik mavjudligi
<b>\$x<sub>4</sub></b>	Shamol tezligi (WS)	m/s	ERA5-Land	11 km	Salbiy (-)	Eroziya xavfi
<b>\$x<sub>5</sub></b>	Yog'ingarchilik (Prec)	mm	CHIRPS	5 km	Ijobiy (+)	Suv ta'minoti
<b>\$x<sub>6</sub></b>	Sirt harorati (LST)	°C	MODIS	1 km	Salbiy (-)	Issiqlik stressi
<b>\$x<sub>7</sub></b>	Balandlik (DEM)	m	SRTM	30 m	Salbiy (-)	Sizot suvlari chuqurligi

Salbiy yo'nalishli parametrlar (Sho'rlanish, Shamol tezligi, Harorat): Aksincha, sho'rlanish darajasi yoki shamol tezligi qanchalik yuqori bo'lsa, yosh ko'chatlarning yashab qolish ehtimoli shunchalik kamayadi. Bunday parametrlar teskari normalizatsiya algoritmi orqali hisoblanadi:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}, \quad (2)$$

bu yerda  $r_{ij}$  – normallashtirilgan qiymat.

Natijada shakllangan  $r_{ij}$  qiymatlari barcha parametrlar uchun “yaxshi” va “yomon” tushunchasini yagona matematik shkalaga keltiradi.

Normallashtirilgan ma'lumotlar bazasi asosida har bir mezonning ustunligi tahlil qilinadi. Buning uchun avval har bir katakning umumiy ustun ichidagi ulushi

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}} \quad (3)$$

aniqlanadi, so'ngra, Shannoning axborot nazariyasi tamoyillari asosida har bir  $j$ -parametr uchun Axborot Entropiyasi ( $E_j$ ) hisoblanadi:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln(f_{ij}), \quad (4)$$

bu yerda  $k = \frac{1}{\ln(n)}$  – normallashtiruvchi koeffitsient bo'lib,  $0 \leq E_j \leq 1$  shartini ta'minlaydi. Agar  $f_{ij} = 0$

bo'lsa,  $\lim_{f_{ij} \rightarrow 0} f_{ij} \ln(f_{ij}) = 0$  deb qabul qilinadi. Formula bizga ma'lumotlar to'plamidagi “tartibsizlik” darajasini ko'rsatadi. Mantiqan olganda, agar biron bir parametr (masalan, relef balandligi) barcha o'rganilayotgan nuqtalarda deyarli bir xil qiymatga ega bo'lsa, uning entropiya qiymati 1 ga yaqinlashadi. Bu esa ushbu parametr hududlarni bir-biridan ajratishda deyarli rol o'ynamasligini anglatadi.

Entropiya usulining eng muhim bosqichi – har bir ekologik mezonning qaror qabul qilishdagi real salmog'ini aniqlashdir. Buning uchun avval Diversifikatsiya darajasi ( $D_j$ ) hisoblanadi. Bu koeffitsient entropiyaga teskari bo'lib, ma'lumotlar qanchalik xilma-xil ekanligini ko'rsatadi:

$$D_j = 1 - E_j. \quad (5)$$

$D_j$  qiymati qanchalik katta bo'lsa, ushbu mezon hududlarni farqlashda shunchalik muhim rol o'ynaydi. Ushbu  $D_j$  qiymatlari barcha 7 ta parametr uchun hisoblangandan so'ng, ularning nisbiy ulushi orqali yakuniy Obyektiv Vaznlar ( $w_j$ ) generatsiya qilinadi:

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^m D_j}. \quad (6)$$

Natijada  $\sum w_j$  sharti bajariladi. Ushbu yondashuv subyektiv yondashuvdan farqli o'laroq, vaznlarni faqat real ma'lumotlar strukturasi bilan kelib chiqib belgilaydi.

Modellashtirishning yakuniy bosqichida barcha normallashtirilgan parametrlar va ularning hisoblangan vaznlari birlashtiriladi. Har bir geografik katak (grid) uchun integrallashgan yaroqlilik indeksi ( $S_i$ ) vaznli chiziqli agregatsiya usuli bilan topiladi:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j r_{ij}. \quad (7)$$

$S_i$  koeffitsienti [0, 1] oralig'ida bo'lib, u bizga hududning “o'rmonlashtirishga tayyorlik” darajasini ko'rsatadi. Qiymati 1.0 ga yaqin bo'lgan hududlar barcha 7 ta parametr bo'yicha eng maqbul sharoitga ega zonalar hisoblanadi. Qiymati 0.0 ga yaqin hududlar esa o'ta agressiv muhit bo'lib, u yerda qo'shimcha meliorativ tadbirlarsiz ko'chat ekish iqtisodiy jihatdan samarasiz bo'lishini anglatadi. Hududlarni toifalash maqsadida biz Natural Breaks (Jenks) klassifikatsiya usulidan foydalandik (2-jadval).

**2-jadval.** Yaroqlilik indeksi ( $S_i$ ) bo'yicha hududlarning tasnifi va tavsiyalar

Sinf	Indeks diapazoni ( $S_i$ )	Yaroqlilik darajasi	Tavsif va tavsiyalar
I	0.80 - 1.00	Yuqori darajada yaroqli	Birinchi navbatda ko'chat ekish tavsiya etiladi (Saksovul, Cherkez).
II	0.60 - 0.79	O'rtacha yaroqli	Ekishga yaroqli, ammo tuproqni biroz tayyorlash talab etiladi.
III	0.40 - 0.59	Cheklangan darajada yaroqli	Himoya choralari (qumdan himoya qalqonlari) bilan ekish mumkin.
IV	0.00 - 0.39	Yaroqsiz	O'ta yuqori sho'rlanish va shamol sababli ekish tavsiya etilmaydi.

Ushbu matematik model Google Earth Engine platformasida Python API yordamida kodlashtirildi va butun Orolqum hududi bo'yicha hisoblab chiqildi.

## 5 TADQIQOT NATIJALARINING TAHLILI

Entropiya vaznli usul yordamida olingan hisoblash natijalari, parametrlarning vaznlari tahlili va Orol dengizining qurigan tubi uchun ishlab chiqilgan yakuniy ekologik yaroqlilik xaritasi (Ecological Suitability Map) GEE bulutli platformasida 2023-yilgi Sentinel-2 va ERA5-Land ma'lumotlari asosida amalga oshirildi.

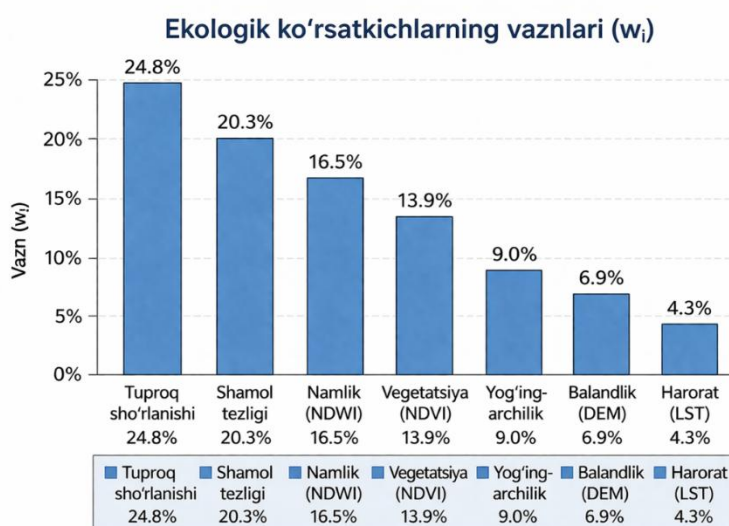
Tadqiqotning birinchi muhim natijasi – bu tanlangan 7 ta ekologik omilning hududiy taqsimlanishidagi vaznini aniqlash edi. An'anaviy usullarda ekspertlar ko'pincha yog'ingarchilik yoki o'simlik indeksini eng muhim deb belgilashadi. Biroq, EWM algoritmi ma'lumotlarning real o'zgaruvchanligiga asoslanib, butunlay boshqacha va obyektiv natijani ko'rsatdi.

3-jadval. Atrof-muhit ko'rsatkichlarining ahamiyat darajasi

№	Ko'rsatkich ( $x_j$ )	Entropiya ( $E_j$ )	Diversifikatsiya ( $D_j$ )	Vazn ( $w_j$ )	Ulushi (%)
1	Tuproq sho'rlanishi (SI2)	0.684	0.316	0.248	24.8%
2	Shamol tezligi (WS)	0.741	0.259	0.203	20.3%
3	Namlik (NDWI)	0.789	0.211	0.165	16.5%
4	Vegetatsiya (NDVI)	0.823	0.177	0.139	13.9%
5	Yog'ingarchilik (Prec)	0.885	0.115	0.090	9.0%
6	Balandlik (DEM)	0.912	0.088	0.069	6.9%
7	Harorat (LST)	0.945	0.055	0.043	4.3%
	<b>Jami</b>		<b>1.274</b>	<b>1.000</b>	<b>100%</b>

3-jadvalda har bir parametr uchun hisoblangan Entropiya qiymati ( $E_j$ ), Diversifikatsiya darajasi ( $D_j$ ) va yakuniy vazn ( $w_j$ ) keltirilgan. Jadvaldan ko'rinib turibdiki, tuproq sho'rlanishi (SI2) eng yuqori vaznga ega bo'ldi. Bu shuni anglatadiki, Orol dengizi tubida sho'rlanish darajasi hududdan hududga keskin farq qiladi va o'simliklarning o'sishini belgilab beruvchi asosiy cheklovchi omil hisoblanadi. Ikkinchi o'rinda shamol tezligi turibdi. Bu natija juda muhim, chunki ko'plab avvalgi tadqiqotlarda shamol omili yetarlicha baholanmagan edi. Bizning modelimiz shuni ko'rsatdiki, kuchli shamollar va tuz bo'ronlari fitomelioratsiya ishlari uchun eng katta xavflardan biridir. Aksincha, harorat va relyef deyarli bir xil taqsimlangani uchun eng past vaznga ega bo'ldi. Entropiya vazn usuli ma'lumotlarning ichki o'zgaruvchanligiga asoslangan holda har bir omilning ahamiyatini obyektiv tarzda aniqlaydi va ko'p mezonli qaror qabul qilish jarayonida subyektivlikni kamaytiradi. Umuman olganda, vaznlar taqsimoti tuproq sho'rlanishi va shamol tezligi tadqiqot hududida ekologik moslikni shakllantiruvchi ustuvor omillar ekanligini tasdiqlaydi.

2-rasmda ko'rishimiz mumkinki, entropiya vazn usuli asosida aniqlangan ko'rsatkichlar ichida tuproq sho'rlanishi va shamol tezligi eng yuqori ulushga ega bo'lib, ekologik moslikni baholashda ustuvor omillar hisoblanadi.



2-rasm. Ko'rsatkich vaznlarining taqsimoti

Diagrammadan ko‘rinib turibdiki, tuproq sho‘rlanishi (SI2) eng yuqori ulushga ega (24,8%) bo‘lib, ekologik moslikni aniqlashda ustuvor omil hisoblanadi. Shamol tezligi (20,3%) va namlik (NDWI) (16,5%) ham yuqori ahamiyat kasb etib, hududdagi ekologik jarayonlarga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi. Vegetatsiya indeksi (NDVI) 13,9% ulush bilan o‘rtacha darajadagi ta‘sirga ega. Yog‘ingarchilik (9,0%), balandlik (6,9%) va harorat (4,3%) ko‘rsatkichlarining ulushi nisbatan past bo‘lib, umumiy moslik indeksiga kamroq ta‘sir ko‘rsatishi aniqlangan. Vaznlar taqsimoti tadqiqot hududida sho‘rlanish va shamol omillari ekologik sharoitni shakllantirishda yetakchi rol o‘ynashini ko‘rsatadi.

Integrallashgan Si indeksini hisoblash va “Natural Breaks” usuli bo‘yicha tasniflash natijasida Orol dengizining qurigan tubi 4 ta fitomeliorativ zonaga ajratildi. 4-jadvalda har bir zonaning maydoni va umumiy hududdagi ulushi keltirilgan.

#### 4-jadval. Orol dengizining qurigan tubida o‘rmon barpo etishga yaroqli maydonlar statistikasi

Sinf	Yaroqlilik darajasi	Maydon (km <sup>2</sup> )	Ulushi (%)	Landschaftning o‘ziga xosligi
I	Yuqori yaroqli	6,420	14.2%	Sobiq daryo deltalari, yuqori namlik, kam sho‘rlangan.
II	O‘rtacha yaroqli	12,855	28.5%	Barqarorlashgan qumloqlar, sho‘rlanish o‘rtacha.
III	Kam yaroqli	15,230	33.8%	Harakatlanuvchi qum barxanlari, shamol ta‘siri kuchli.
IV	Yaroqsiz	10,595	23.5%	Tuzli qatlamlar (sho‘rxoklar), toksik chang zonalari.
<b>Jami:</b>		<b>45,100</b>	<b>100%</b>	

Hududiy tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, Orol dengizining qurigan tubida fitomelioratsiya ishlarini amalga oshirish imkoniyatlari hududlar kesimida sezilarli darajada farqlanadi. Yuqori yaroqli hududlar asosan Amudaryo deltasiga tutashgan janubiy qismlarda, xususan Mo‘ynoq atrofi hamda kichik ko‘l tizimlari yaqinida joylashgan. Bu zonalarda tuproq namligi nisbatan yuqori bo‘lib, sho‘rlanish darajasi pastligi bilan ajralib turadi. Shu sababli mazkur hududlar o‘rmon barpo etish uchun eng maqbul hisoblanadi va bu yerda qora saksovul hamda turang‘il kabi kserofit o‘simliklarni ekish tavsiya etiladi.

Aksincha, yaroqsiz hududlar Orolning markaziy va sharqiy qismlarida keng tarqalgan bo‘lib, ular qalin tuz qatlamlari bilan qoplanganligi sababli o‘ta noqulay ekologik sharoitga ega. EWM modeli natijalariga ko‘ra, ushbu zonalarda tuproq sho‘rlanish indeksi ( $SI2 > 0.4$ ) kritik chegaradan yuqori ekanligi aniqlangan. Bunday sharoitda to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘rmonlashtirish ishlari samarasiz bo‘lishi mumkin. Shu bois, avvalo muhandislik-meliorativ choralar, jumladan tuproqni yuvish yoki shamol eroziyasini kamaytirish uchun qum to‘siqlari o‘rnatish kabi tadbirlarni amalga oshirish zarur hisoblanadi.

Ushbu tadqiqotda ishlab chiqilgan Entropiya vaznli qaror qabul qilish modeli (EWM-MCDM) Orol dengizining qurigan tubidagi murakkab ekologik jarayonlarni tushunishda yangi yondashuvni taqdim etdi. Olingan natijalar va ularning tahlili quyidagi muhim xulosalarni shakllantirishga asos bo‘ladi.

Modelning afzalligi va qiyosiy tahlil: Bizning tahlillarimiz shuni ko‘rsatdiki, tuproq sho‘rlanishi va shamol tezligi fitomelioratsiya muvaffaqiyatini belgilovchi eng kritik omillardir. Bu natija Duan va boshqalar tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotlarga qisman mos keladi, biroq muhim farqli jihati shundaki, bizning modelimiz shamol eroziyasini dinamik o‘zgaruvchi sifatida integratsiya qildi.

Ko‘plab avvalgi ishlarda asosiy urg‘u faqat NDVI (o‘simlik indeksi) ga qaratilgan edi. Biroq, Orolqum sharoitida NDVI har doim ham "yaroqli yer"ni anglatmaydi; ba‘zan sho‘rga chidamli begona o‘tlar yuqori NDVI ko‘rsatishi mumkin, lekin bu yerlar madaniy saksovul ekish uchun yaroqsiz bo‘lishi ehtimoli yuqori. Bizning ko‘p mezonli modelimiz bunday “yolg‘on musbat” (false positive) holatlarni filtrlay oldi va resurslarni eng maqbul hududlarga (I va II zonalar) yo‘naltirish imkonini berdi.

Cheklovlar va noaniqliklar: Garchi Sentinel-2 va ERA5-Land ma‘lumotlari yuqori aniqlikka ega bo‘lsa-da, masofadan zondlash usullari tuproqning chuqur qatlamlaridagi (0.5–1.0 m) sho‘rlanish darajasini to‘liq aniqlay olmaydi. Model hozirda yer yuzasi (topsoil) ma‘lumotlariga tayanmoqda. Shu sababli, daraxt ildiz tizimi rivojlanadigan chuqur qatlamlardagi gidrogeologik holatni baholashda kichik noaniqliklar mavjud bo‘lishi mumkin.

Kelajakdagi tadqiqot yo‘nalishlari va real ma‘lumotlar integratsiyasi: Ushbu tadqiqot keng ko‘lamli loyihaning birinchi bosqichi bo‘lib, kelgusi ishlarda quyidagi yo‘nalishlarni amalga oshirish rejalashtirilgan.

Dala verifikatsiyasi: Model aniqligini oshirish maqsadida, kelajakda Orolning “I va IV toifali” zonalari maxsus ekspeditsiya tashkil etiladi. Unda real sharoitda tuproq namunalari olinib, laboratoriya sharoitida sho‘rlanish va namlik darajasi tekshiriladi. Olingan real ma‘lumotlar model natijalari bilan solishtiriladi va korrelyatsiya koeffitsienti orqali xatoliklar minimallashtiriladi.

Dinamik monitoring tizimi: Hozirgi model statik (o‘zgarimas) tasvirlarga asoslangan. Kelajakda biz vaqt o‘tishi bilan o‘zgaruvchi Time-series (vaqtli qatorlar) tahlilini qo‘shishni rejalashtirmoqdamiz. Bu esa

fasllar almashinuvi va iqlim o'zgarishi ta'sirida yaroqlilik zonalarining qanday siljishini (migratsiyasini) bashorat qilish imkonini beradi.

Interaktiv Web-GIS Xaritasi: Tadqiqotning amaliy natijasi sifatida statik maqola rasmlaridan tashqari, foydalanuvchilar uchun ochiq Web-GIS platformasini yaratish ko'zda tutilgan. Bu platforma o'rmon xo'jaligi agentligi xodimlariga planshet yoki smartfon orqali real vaqt rejimida o'z joylashgan nuqtasining ekishga yaroqlilik darajasini aniqlash imkonini beradi. Platforma Google Earth Engine API negizida ishlaydi va har 5 kunda (Sentinel-2 uchib o'tish davri) ma'lumotlarni avtomatik yangilab boradi.

Sun'iy intellekt modellarini qo'llash: EWM usulidan tashqari, kelajakda tasodifiy o'rmon (Random Forest) va chuqur o'qitish (Deep Learning - CNN) algoritmlarini qo'llash orqali tuproq sho'rlanishini sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan bashorat qilish aniqligini 90-95% ga yetkazish maqsad qilingan.

## 6 XULOSA

Mazkur tadqiqot Orol dengizining qurigan tubida ekologik barqarorlikni tiklash va fitomelioratsiya tadbirlarini ilmiy asosda tashkil etish bo'yicha muhim tahliliy natijalarni taqdim etdi. Google Earth Engine (GEE) platformasi imkoniyatlari va Entropiya vaznli ko'p mezonli qaror qabul qilish (EWM-MCDM) modelining integratsiyasi orqali hududning o'rmonlashtirishga yaroqlilik darajasi yuqori aniqlikda baholandi. Tadqiqot natijalari asosida bir qator muhim ilmiy xulosalar shakllantirildi. Avvalo, metodologik jihatdan olib qaralganda, an'anaviy subyektiv baholash usullaridan, xususan ekspert fikriga asoslangan AHP yondashuvidan farqli ravishda, EWM modeli inson omilini sezilarli darajada kamaytirishi va vaznlarni to'g'ridan-to'g'ri ma'lumotlarning obyektiv variatsiyasiga asoslanib aniqlashi bilan ajralib turadi. Bu esa Orolqum kabi o'ta beqaror va tez o'zgaruvchan ekotizimlarda aynan shu yondashuv eng maqbul ekanligini ko'rsatadi. Shuningdek, olib borilgan tahlillar Orol dengizining qurigan tubida o'simlik qoplamini tiklash jarayoniga eng katta salbiy ta'sir ko'rsatuvchi omillar tuproq sho'rlanishi va shamol tezligi ekanligini aniqladi. Ularning ulushi mos ravishda 24.8% va 20.3% ni tashkil etib, asosiy cheklovchi faktorlar sifatida namoyon bo'ladi. Aksincha, yog'ingarchilik miqdori hudud bo'ylab deyarli bir xil taqsimlanganligi sababli, hududlarni differensial baholashda hal qiluvchi ahamiyat kasb etmasligi kuzatildi.

Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan ekologik yaroqlilik xaritasi yordamida hudud to'rtta funksional zonaga ajratildi. Natijalarga ko'ra, umumiy maydonning atigi 14.2 foizi yuqori yaroqlilikka ega bo'lib, aynan shu hududlarda birlamchi o'rmonlashtirish ishlarini amalga oshirish maqsadga muvofiqdir. Bunday zonalarda qora saksovu va cherkez kabi o'simliklarni ekish tavsiya etiladi. Shu bilan birga, hududning 23.5 foizi kuchli sho'rlanish va tuz qatlamlari bilan qoplangan bo'lib, bu yerlarda to'g'ridan-to'g'ri fitomelioratsiya ishlarini olib borish iqtisodiy jihatdan samarasiz hisoblanadi.

Amaliy jihatdan esa taklif etilgan model O'rmon xo'jaligi agentligi hamda ekologik tashkilotlar uchun muhim qaror qabul qilish vositasi bo'lib xizmat qiladi. U cheklangan resurslarni – urug'lik, texnika va moliyaviy mablag'larni – eng samarali hududlarga yo'naltirish imkonini beradi. Hisob-kitoblarga ko'ra, mazkur yondashuv asosida ish olib borish ko'chatlarning yashab ketish darajasini 30–40 foizgacha oshirishga hamda ortiqcha xarajatlarning oldini olishga xizmat qiladi.

Ushbu tadqiqot keng qamrovli monitoring tizimining dastlabki bosqichi hisoblanadi. Kelgusida model natijalarini dala tadqiqotlari (in-situ measurement) orqali validatsiya qilish, vaqtli qatorlar (time-series) tahlilini qo'shish hamda sun'iy intellekt algoritmlari yordamida real vaqt rejimida ishlovchi interaktiv xaritalarni yaratish rejalashtirilgan. Bu esa nafaqat Orolbo'yi, balki Markaziy Osiyoning boshqa cho'llanishga moyil hududlari uchun ham universal ilmiy yechim bo'lib xizmat qiladi.

## ADABIYOTLAR

- [1] *Schachtsiek, T., Lamers, J. P. A., & Khamzina, A. (2014).* Early survival and growth of six afforestation species on abandoned cropping sites in irrigated drylands of the Aral Sea basin. *Arid Land Research and Management*, 28(4), 410–427. <https://doi.org/10.1080/15324982.2013.855958>
- [2] *Alikhanova, S., & Bull, J. W. (2023).* Review of nature-based solutions in dryland ecosystems: The Aral Sea case study. *Environmental Management*, 72, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01822-z>
- [3] *Cui, M., Zheng, X., Li, Y., & Wang, Y. (2023).* Analysis of NDVI trends and driving factors in the buffer zone of the Aral Sea. *Water*, 15(13), 2473. <https://doi.org/10.3390/w15132473>
- [4] *Abuzaid, A. S., AbdelRahman, M. A. E., Fadl, M. E., & Scopa, A. (2021).* Land degradation vulnerability mapping in a newly reclaimed desert oasis in a hyper-arid agro-ecosystem using AHP and geospatial techniques. *Agronomy*, 11(7), 1426. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071426>
- [5] *Farnad, S., Bahroudi, A., Ardejani, F.D., Aslani, S., & Ardejani, S.D. (2023).* Identification of patients with respiratory diseases on crucial areas map using fuzzy-AHP approach and RS-GIS method to assess geomedical health hazard in the western segment of Lake Urmia, Iran. *Iranian Journal of*

- Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 47, 1689–1707. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00992-w>
- [6] Akay, A. O., Senturk, E., Akgul, M., & Demir, M. (2024). Temporal and spatial variation of sediment risk in Turkey: The role of forestry activities and climate change scenarios (2022–2096) utilizing entropy-based WASPAS and fuzzy clustering. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 8731–8753. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05156-6>
- [7] Jing, P., Hu, T., Sheng, J., Mahmoud, A., Liu, Y., Yang, D., Guo, L., Li, M., & Wu, Y. (2023). Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution of the water–energy–food–land (WEFL) nexus in the Yangtze River Economic Belt, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 34978–34995. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24659-1>
- [8] Duan, Z., Wang, X., Sun, L., Zhou, M., & Luo, Y. (2024). An insight into the effect of soil salinity on vegetation dynamics in the exposed seafloor of the Aral Sea. *Science of the Total Environment*, 951, 175615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175615>
- [9] Yao, F., Ding, J., Bao, A., & Li, J. (2025). Attribution and risk assessment of wind erosion in the Aral Sea regions using multi-source remote sensing and RWEQ on GEE. *Remote Sensing*, 17(16), 2788. <https://doi.org/10.3390/rs17162788>
- [10] Wang, W., Samat, A., Ge, Y., Ma, L., Tuheti, A., Zou, S., & Abuduwaili, J. (2020). Quantitative soil wind erosion potential mapping for Central Asia using the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing*, 12(20), 3430. <https://doi.org/10.3390/rs12203430>
- [11] Duan, Z., Wang, X., & Sun, L. (2022). Monitoring and mapping of soil salinity on the exposed seabed of the Aral Sea, Central Asia. *Water*, 14(9), 1438. <https://doi.org/10.3390/w14091438>
- [12] Shi, J., Guo, Q., Zhao, S., Su, Y., & Shi, Y. (2022). The effect of farmland on the surface water of the Aral Sea region using multi-source satellite data. *PeerJ*, 10, e12920. <https://doi.org/10.7717/peerj.12920>
- [13] Huang, Z., & Feng, C. (2025). Comprehensive evaluation of urban storm flooding resilience by integrating AHP–entropy weight method and cloud model. *Water*, 17(17), 2576. <https://doi.org/10.3390/w17172576>
- [14] Jabbarov, Z., Kholdorov, S., Nomozov, U., Makhmadiyev, S., Djalilova, G., & Abdullaev, S. (2024). The drying of the Aral Sea: Soil formation and restoration potential on the seabed. *Soil Science Annual*. <https://doi.org/10.37501/soilsa/207727>
- [15] Kholdorov, S., Lakshmi, G., Jabbarov, Z., Yamaguchi, T., Yamashita, M., Samatov, N., & Katsura, K. (2023). Analysis of irrigated salt-affected soils in the Central Fergana Valley, Uzbekistan, using Landsat 8 and Sentinel-2 satellite images, laboratory studies, and spectral index-based approaches. *Eurasian Soil Science*, 56, 1178–1189. <https://doi.org/10.1134/S1064229323600185>
- [16] Zhou, J., Ke, L., Ding, X., Wang, R., & Zeng, F. (2024). Monitoring spatial–temporal variations in river width in the Aral Sea basin with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 16(5), 822. <https://doi.org/10.3390/rs16050822>
- [17] Nasimov, R., Nasimova, N., Xidirova, Ch., Abdusalomov, A., & Temirov, Z. (2025). Sun'iy yo'ldosh tasvirlari va sun'iy intellekt yordamida orol dengizi hududlarini tadqiq etish: tajribalar va ilmiy muammolar. *Raqamli Transformatsiya va Sun'iy Intellekt ilmiy jurnali*, 3(5), 156–166.
- [18] Khidirova, Ch., Foziljonov, R. (2025). Intuitionistic Fuzzy Aggregation Operators in Multi-Criteria Decision-Making. *Development of science*. 2025/4, Volume 2. 150–157.
- [19] Khidirova, Ch., Davronova, Z. (2025). Analysis of traditional methods for predicting soil productivity. *American Journal of Technology and Applied Sciences*. Volume 32, 15–20.
- [20] Khidirova, Ch., Iminova, N., Muradova, A., Baymatova, M. (2025). Environmental Decision Making under Uncertainty in the Aral Sea based on Intuitionistic Fuzzy Approach. “Raqamli transformatsiyalash jarayonida muhandislik sohalarini va iqtisodiyot tarmoqlarini rivojlantirish: muammo va yechimlar” xalqaro ilmiy-amaliy anjumani ma'ruzalar to'plami, I-qism, 59–64.

*Поступила в редакцию 26.01.2026*

**Citation:** Raxmatov F.A., Xidirova Ch.M., Karimov N.N. (2026). Orol dengizining qurigan tubida fitomelioratsiya uchun ekologik yaroqlilikni baholashda entropiya vaznli ko'p mezonli qaror qabul qilish modelini qo'llash. *Raqamli texnologiyalarning nazariy va amaliy masalalari xalqaro jurnali*. 9(2). – B. 99- 109. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v9i2.381>.

## ASSESSMENT OF ECOLOGICAL SUITABILITY FOR PHYTOMELIORATION ON THE DRIED BED OF THE ARAL SEA USING A MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING MODEL WITH ENTROPY WEIGHTS

*Rakhmatov F.A.<sup>1</sup>, Khidirova Ch.M.<sup>1</sup>, + Karimov N.N.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup> Uzbekistan state world language university, Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** In this study, a new EWM-MCDM (Entropy Weight Method – Multi-Criteria Decision-Making) model was developed to identify ecologically suitable areas for afforestation on the dried bed of the Aral Sea. Using the Google Earth Engine platform, seven biophysical indicators derived from Sentinel-2 and ERA5-Land data were analyzed. The results demonstrated that the main limiting factors for vegetation development are soil salinity (24.8%) and wind speed (20.3%). According to the integrated suitability map, 14.2% of the territory was classified as highly suitable and 28.5% as moderately suitable, while 23.5% of the area was identified as unsuitable for planting due to extremely high salinity. This methodology enables digital planning of phytomelioration works in the Aral Sea region and increases the efficiency of resource utilization.

**Keywords:** dried bed of the Aral Sea, phytomelioration, Google Earth Engine, EWM-MCDM, Sentinel-2, soil salinity, suitability assessment, multi-criteria decision-making.

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ФИТОМЕЛИОРАЦИИ НА ВЫСОХШЕМ ДНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ЭНТРОПИЙНЫМИ ВЕСАМИ

*Рахматов Ф.А.<sup>1</sup>, Хидирова Ч.М.<sup>1</sup>, + Каримов Н.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Узбекский государственный университет мировых языков, Ташкент, Узбекистан

**Аннотация.** В данном исследовании разработана новая модель EWM-MCDM (многокритериальная модель принятия решений с энтропийными весами) для определения экологически пригодных территорий для лесоразведения на высохшем дне Аральского моря. С использованием платформы Google Earth Engine были проанализированы 7 биофизических показателей, полученных на основе данных Sentinel-2 и ERA5-Land. Результаты показали, что основными лимитирующими факторами для развития растительности являются засоленность почвы (24,8%) и скорость ветра (20,3%). Согласно интегральной карте пригодности, 14,2% территории признаны высоко пригодными, 28,5% – умеренно пригодными, тогда как 23,5% площади определены как непригодные для посадки из-за чрезвычайно высокой засоленности. Данная методология позволяет осуществлять цифровое планирование фитомелиорационных работ в Приаралье и повышать эффективность использования ресурсов.

**Ключевые слова:** высохшее дно Аральского моря, фитомелиорация, Google Earth Engine, EWM-MCDM, Sentinel-2, засоленность почвы, оценка пригодности, многокритериальное принятие решений.