METTERNICHT YONDASHUVI ASOSIDA SUG‘ORILADIGAN QISHLOQ XO‘JALIGI YERLARINING SHO‘RLANISH DARAJASINI NORAVSHAN BAHOLASH MODELI

Abduvakilov Bunyod Abduvakilovich[1], Primqulov Oybek Dilmurot o‘g‘li[2]

O‘zbekiston Milliy universiteti Jizzax filiali assistenti
O‘zbekiston Milliy universiteti Jizzax filiali dotsenti
E-mail: primqulovoybek1@gmail.com, abduvakilovbunyod@gmail.com

K E Y W O R D S

tuproq sho‘rlanishi, sug‘oriladigan yerlar, masofadan zondlash, Sentinel-2, multispektral tahlil, spektral indekslar, NDVI, Salinity Index, red-edge, noravshan mantiq, fuzzy classification, membership function, Mamdani inferensiyasi, Metternicht yondashuvi, EC_e, sho‘rlanishni modellashtirish, model kalibrlash, model validatsiyasi.

A B S T R A C T

Ushbu tadqiqotda sug‘oriladigan qishloq xo‘jaligi yerlarining tuproq sho‘rlanishini masofadan zondlash ma’lumotlari asosida noravshan baholash usuli ishlab chiqilgan. Metodologik asos sifatida Metternichtning fuzzy classification va fuzzy overlay yondashuvlari qabul qilinib, Sentinel-2 MSI ma’lumotlari asosida NDVI, Salinity Index (keyingi o‘rinlarda “SI”) va red-edge asosidagi indikatorlari hisoblanadi. Mazkur indikatorlar noravshan membership funksiyalari orqali [0;1] oralig‘idagi tegishlilik qiymatlariga o‘tkazilib, Mamdani inferensiya tizimi yordamida integral sho‘rlanish indeksiga birlashtiriladi. Integral indeksni tuproqning elektr o‘tkazuvchanligi bilan kalibrlash orqali modelning miqdoriy baholash imkoniyati ta’minlanadi. Taklif etilayotgan yondashuv sho‘rlanishning uzluksiz fazoviy o‘zgarishini hisobga olish va turli spektral indikatorlarni yagona noravshan modelda integratsiyalash imkonini beradi.

1. Kirish

Tuproq sho‘rlanishi qishloq xo‘jaligi yerlarining mahsuldorligi va oziq-ovqat xavfsizligiga ta’sir qiluvchi asosiy degradatsiya jarayonlaridan biridir. FAOning 2024-yilgi global baholashiga ko‘ra, dunyoda 1,381 milliard gektardan ortiq yer, ya’ni global quruqlik maydonining qariyb 10,7 foizi tuz ta’sirlangan tuproqlar qatoriga kiradi. Ayniqsa, sug‘oriladigan hududlarda suv-tuz rejimining buzilishi, sizot suvlarining sathga yaqinlashishi va yuqori bug‘lanish sho‘rlanish jarayonining kuchayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli sho‘rlangan yerlarni tezkor, keng hududda va takroriy baholash imkonini beruvchi usullarni ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi.

Tuproq sho‘rlanishini an’anaviy baholash dala namunalarini olish va laboratoriya tahlillariga asoslanadi. Bunday usullar yuqori aniqlikdagi mahalliy ma’lumotlarni ta’minlasa-da, katta hududlarni muntazam monitoring qilish uchun ko‘p vaqt va resurs talab etadi. Sho‘rlanishni miqdoriy tavsiflashda tuproqning elektr o‘tkazuvchanligi, xususan, to‘yingan tuproq pastasi ekstraktining elektr o‘tkazuvchanligi EC_e muhim diagnostik ko‘rsatkich hisoblanadi. Shu sababli ECe masofadan zondlash asosidagi modellarni kalibrlash va validatsiya qilishda etalon o‘zgaruvchi sifatida qo‘llanishi mumkin.

Masofadan zondlash texnologiyalarining rivojlanishi sho‘rlanishni katta hududlarda tezkor baholash imkoniyatlarini kengaytirdi. Sun’iy yo‘ldosh tasvirlarining spektral xususiyatlari tuproq yuzasidagi tuz to‘planishi hamda sho‘rlanish ta’sirida yuzaga keladigan vegetatsion stressni aniqlash imkonini beradi. Xususan, Sentinel-2 sun’iy yo‘ldoshlarining MultiSpectral Instrument sensori 13 ta spektral kanalga ega bo‘lib, 10, 20 va 60 m fazoviy aniqlikdagi ma’lumotlarni taqdim etadi. Ko‘rinadigan, red-edge va yaqin infraqizil diapazonlarning mavjudligi ushbu ma’lumotlardan sho‘rlanishni bevosita va bilvosita ifodalovchi spektral indikatorlarni shakllantirishda foydalanish imkonini beradi.

(cc) BY

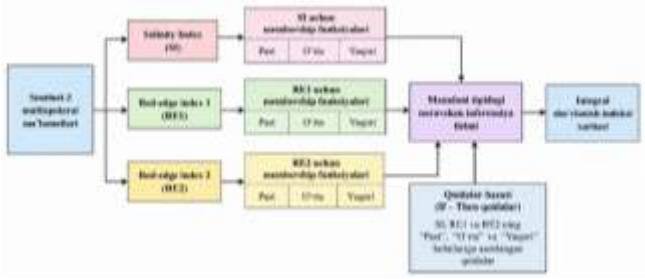
Sho‘rlanishni masofadan zondlash asosida baholashda NDVI, turli Salinity Indexlar va red-edge asosidagi vegetatsion indekslardan foydalanish mumkin. NDVI sho‘rlanishning o‘simlik rivojlanishiga ta’sirini bilvosita ifodalasa, Salinity Indexlar tuproq yuzasining spektral xususiyatlarini tavsiflaydi. Red-edge indikatorlari esa vegetatsiyaning stress holatiga qo‘shimcha sezgirlikni ta’minlaydi. Biroq ushbu indikatorlarning EC_e bilan bog‘liqligi tuproq, namlik, vegetatsiya va iqlim sharoitlariga qarab o‘zgarishi mumkin. Shu sababli ularni oddiy arifmetik birlashtirish barcha noaniqliklarni yetarli darajada aks ettirmaydi.

Sho‘rlanishni baholashdagi yana bir muhim muammo uning tabiatda qat’iy chegaralangan sinflar ko‘rinishida namoyon bo‘lmasligidir. Sho‘rlanish darajasi odatda makonda uzluksiz o‘zgaradi va “sho‘rlanmagan”, “o‘rta” yoki “yuqori” kabi sinflar o‘rtasida o‘tish holatlari mavjud bo‘ladi. Bundan tashqari, tuproq namligi, teksturasi, o‘simlik qoplami va yuzadagi tuz qobig‘i spektral signalga ta’sir qiladi. Bunday sharoitda noravshan to‘plamlar nazariyasi obyektning ma’lum bir sho‘rlanish holatiga tegishlilik darajasini (0) dan (1) gacha uzluksiz qiymat bilan ifodalash imkonini beradi.

Noravshan yondashuvning tuproq sho‘rlanishini baholashdagi imkoniyatlari Metternicht va Zinck tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda asoslab berilgan. Ushbu tadqiqotlarda masofadan zondlash, tuproq xususiyatlari va dala ma’lumotlarini fuzzy classification hamda fuzzy overlay yondashuvlari bilan birlashtirish orqali sho‘rlanish va ishqorlanishning fazoviy tarqalishini baholash masalalari o‘rganilgan. Taklif etilgan yondashuv sho‘rlanish sinflari o‘rtasidagi noaniq chegaralarni hisobga olish va turli axborot manbalarini yagona tizimda integratsiyalash imkonini beradi.

O‘zbekiston sharoitida mazkur masala ayniqsa dolzarb bo‘lib, mamlakat qishloq xo‘jaligining katta qismi sug‘orishga bog‘liq. Sirdaryo, Jizzax, Buxoro, Xorazm va Qoraqalpog‘iston hududlarida tuproq sho‘rlanishi, sizot suvlarining mineralizatsiyasi va meliorativ holat bo‘yicha turli yillarda dala, laboratoriya, GIS va masofadan zondlash asosidagi tadqiqotlar olib borilgan. Ushbu hududlarning tabiiy va gidromeliorativ sharoitlari turlicha bo‘lishi sho‘rlanishni umumlashtirilgan matematik model yordamida baholash masalasining dolzarbligini oshiradi.

Tadqiqot natijasida Metternichtning fuzzy baholash konsepsiyasi zamonaviy Sentinel-2 multispektral ma’lumotlari va matematik jihatdan parametrlashtirilgan fuzzy inference tizimi bilan integratsiyalanadi. Modelda Salinity Index va red-edge asosidagi uchta asosiy spektral indikator sifatida qabul qilinadi. Ularning “Past”, “O‘rta” va “Yuqori” sho‘rlanish holatlariga tegishlilik darajasi membership funksiyalari orqali aniqlanib, Mamdani tipidagi noravshan inferensiya yordamida yagona integral sho‘rlanish indeksiga birlashtiriladi. Ushbu jarayon 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. Sentinel-2 multispektral ma’lumotlari asosida fuzzy baholash va integral sho‘rlanish indeksini aniqlash modeli.

Tadqiqotning asosiy maqsadi - Sentinel-2 ma’lumotlari asosida tuproq sho‘rlanishini baholash uchun Metternichtning noravshan baholash tamoyillariga asoslangan, bir nechta spektral indikatorlarni yagona matematik tizimda integratsiyalovchi modelni ishlab chiqishdir. Taklif etilayotgan yondashuv sho‘rlanishning uzluksiz fazoviy o‘zgarishini hisobga olish va turli spektral axborot manbalarini noravshan mantiq asosida birlashtirishga qaratilgan.

Modelning spektral qismi uchta asosiy indikator guruhiga tayantiriladi. Birinchi ko‘rsatkich sifatida vegetatsiya holatini tavsiflovchi NDVI olinadi:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

bunda, B8 - Sentinel-2 ning yaqin infraqizil diapazonidagi kanali, B4esa qizil diapazondagi kanalni bildiradi. NDVI qiymatining pasayishi o‘simlik vegetatsiyasi susaygan hududlarni aniqlash imkonini beradi va bunday susayish

(cc) BY

sho‘rlanish bilan bog‘liq stressning bilvosita belgisi bo‘lishi mumkin.

Ikkinchi indikator sifatida tuproq yuzasidagi sho‘rlanish bilan bog‘liq spektral farqlarni ifodalash uchun salinity indexdan foydalaniladi:

$$SI = \frac{B2 \times B4}{B3}$$

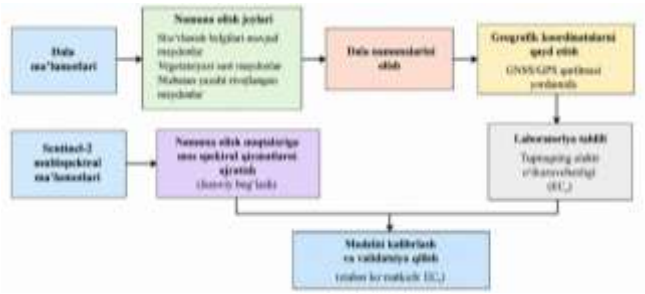
bunda, B2, B3 va B4 mos ravishda Sentinel-2 ning ko‘k, yashil va qizil diapazonlariga mos keladi. Ushbu indeksning aniq informativligi tadqiqot hududining tuproq va vegetatsion sharoitlariga bog‘liq bo‘lishi sababli u yakuniy modelga kiritilishidan oldin EC_e bilan statistik jihatdan tekshiriladi.

Uchinchi indikator sifatida red-edge diapazonining o‘simlik stressiga sezgirligidan foydalanadigan ko‘rsatkich qo‘llanadi:

$$NDVI_{RE1} = \frac{B8A - B5}{B8A + B5}$$

bunda, B8A yaqin infraqizil, B5 esa red-edge diapazonidagi kanal hisoblanadi. Mazkur ko‘rsatkichning kiritilishidan maqsad sho‘rlanishning o‘simlik qoplamida yuzaga keltiradigan o‘zgarishlarini an’anaviy NDVIga qo‘shimcha ravishda ifodalashdir.

Masofadan zondlash ma’lumotlari bilan bir qatorda modelni kalibrlash va validatsiya qilish uchun dala hamda laboratoriya ma’lumotlari zarur bo‘ladi. Bunda asosiy etalon ko‘rsatkich sifatida tuproqning elektr o‘tkazuvchanligi - EC_e - olinadi. Dala namunalarini olishda sho‘rlanish darajasi turlicha bo‘lishi kutiladigan joylar, jumladan, vizual jihatdan sho‘rlanish belgilari mavjud, vegetatsiyasi sust va nisbatan yaxshi rivojlangan maydonlar qamrab olinishi kerak. Namuna olish nuqtalarining geografik koordinatalari GNSS/GPS qurilmasi yordamida qayd etilib, keyinchalik ular Sentinel-2 tasvirlaridan olingan spektral qiymatlar bilan fazoviy jihatdan bog‘lanadi.92-rasm)



2-rasm. Dala va laboratoriya ma’lumotlari asosida modelni kalibrlash va validatsiya qilish jarayoni.

Laboratoriya bosqichida tuproq namunalarining elektr o‘tkazuvchanligi standart metodika asosida aniqlanadi va olingan qiymatlar modelning kalibrlash hamda mustaqil validatsiya to‘plamlariga ajratiladi. Bunda ma’lumotlarni tasodifiy ravishda ajratish bilan bir qatorda, hududiy jihatdan bir-biriga juda yaqin namunalarni bir vaqtning o‘zida o‘qitish va validatsiya to‘plamlariga kiritmaslik maqsadga muvofiqdir. Aks holda fazoviy avtokorrelyatsiya sababli model aniqligi sun’iy ravishda yuqori ko‘rinishi mumkin.

Tadqiqot ishining ma’lumotlar bazasi uchta o‘zaro bog‘langan qatlamdan tashkil topadi: birinchisi - O‘zbekistonning ilgari sho‘rlanish bo‘yicha o‘rganilgan sug‘oriladigan hududlari haqidagi mavjud ilmiy va kartografik ma’lumotlar; ikkinchisi - Sentinel-2 multispektral masofadan zondlash ma’lumotlari; uchinchisi esa - dala va laboratoriya sharoitida aniqlangan EC_e ko‘rsatkichlari. Ushbu ma’lumotlar keyingi bosqichda yagona noravshan matematik modelga birlashtirilib, har bir piksel uchun sho‘rlanishga tegishlilik darajasini aniqlash, integral sho‘rlanish indeksini shakllantirish va uni miqdoriy EC_e ko‘rsatkichi bilan bog‘lash uchun foydalaniladi.

Tadqiqotda Sentinel-2 MSI Level-2A Surface Reflectance ma’lumotlaridan foydalaniladi. Level-2A mahsuloti atmosferik tuzatishdan o‘tkazilgan “Bottom-of-Atmosphere reflectance” ma’lumotlarini hamda “Scene Classification Layer” qatlamini o‘z ichiga oladi.

(cc) BY

ISSN: 3030-3346

1-jadval.

Sentinel-2 MSI kanallarining spektral xususiyatlari va modeldagi vazifalari

Kanal	Markaziy to‘lqin uzunligi	Fazoviy aniqlik	Modeldagi vazifasi
B2	490 nm	10 m	*SI*
B3	560 nm	10 m	*SI*
B4	665 nm	10 m	*NDVI, SI*
B5	705 nm	20 m	$NDVI_{RE1}$
B8	842 nm	10 m	*NDVI*
B8A	865 nm	20 m	$NDVI_{RE1}$

1-jadvalda keltirilgan to‘lqin uzunliklari va fazoviy aniqliklar Sentinel-2 MSI rasmiy texnik spetsifikatsiyasiga mos keladi.

Barcha hisob-kitoblar 20 m ishchi panjarada bajariladi. Buning sababi - modeldagi B5 va B8A kanallarining tabiiy fazoviy aniqligi 20 m ekanligidir. 10 m aniqlikdagi B2, B3, B4 va B8 kanallari 20 m panjaraga qayta namunalanadi. Sentinel-2 Level-2A mahsulotining 20 m qatlamida B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 va B12 kanallari mavjud.

Bulut va bulut soyasi ta’sirini kamaytirish uchun SCL qatlamidan foydalaniladi. SCL maskasi orqali bulut, bulut soyasi, qor/muz va suvga tegishli piksellar chiqarib tashlanadi. Natijada faqat sifat nazoratidan o‘tgan piksellar keyingi hisob-kitoblarga kiritiladi. Level-2A mahsulotida SCL 20 m va 60 m rezolyutsiyalarda taqdim etiladi.

Surface Reflectance qiymatlari ρ_λbilan belgilanadi. Keyingi hisob-kitoblarda barcha spektral indekslar aynan shu atmosferik tuzatilgan reflectance qiymatlari asosida aniqlanadi:

$$\rho_\lambda = BOA\ Reflectance$$

Dastlabki qayta ishlashdan keyin model uchun quyidagi ma’lumotlar to‘plami hosil qilinadi:

$$X = \{\rho_{B2}, \rho_{B3}, \rho_{B4}, \rho_{B5}, \rho_{B8}, \rho_{B8A}\}$$

va har bir piksel uchun keyingi bosqichda uchta asosiy spektral indikator hisoblanadi:

$$NDVI = \frac{\rho_{B8} - \rho_{B4}}{\rho_{B8} + \rho_{B4}}$$

$$SI = \frac{\rho_{B2} \times \rho_{B4}}{\rho_{B3}}$$

Sentinel-2 ma’lumotlari 20 m ishchi panjaraga keltirilgandan so‘ng, sho‘rlanishni baholash uchun uchta spektral indikator hisoblanadi: NDVI, SI va $NDVI_{RE1}$.Ushbu indikatorlar mos ravishda vegetatsiya holati, tuproq yuzasining sho‘rlanish bilan bog‘liq spektral xususiyatlari va red-edge diapazonidagi vegetatsion stressni ifodalash uchun tanlanadi.

Vegetatsiya holatini baholash uchun “Normalized Difference Vegetation Index” qo‘llanadi:

$$NDVI = \frac{\rho_{B8} - \rho_{B4}}{\rho_{B8} + \rho_{B4}}$$

bunda, ρ_{B8} - 842 nm diapazonidagi yaqin infraqizil reflectance, ρ_{B4} - 665 nm diapazonidagi qizil reflectance.

NDVI nazariy jihatdan $[-1; 1]$ oralig‘ida o‘zgaradi. Yashil vegetatsiyada qiymat odatda musbat va yuqori bo‘ladi, vegetatsiya stressi yoki tuproq yuzasi ustun bo‘lgan joylarda esa qiymat pasayadi.

Sho‘rlanishga sezgir spektral ko‘rsatkich sifatida quyidagi indeks hisoblanadi:

$$SI = \frac{\rho_{B2} \times \rho_{B4}}{\rho_{B3}}$$

bunda, ρ_{B2} - ko‘k diapazon, 490 nm, ρ_{B3}- - yashil diapazon, 560 nm, ρ_{B4} - qizil diapazon, 665 nm.

SI qiymatlarining nazariy qat’iy chegarasi NDVI kabi $[-1; 1]$ bilan cheklanmaydi. Shu sababli ushbu indeksning real diapazoni tadqiqot ma’lumotlari asosida aniqlanadi va keyingi fuzzy modelda membership funksiyasini parametrlashtirish uchun foydalaniladi.

(cc) BY dtai.uz

O‘simliklarning sho‘rlanish ta’siridagi holatini qo‘shimcha tavsiflash uchun red-edge asosidagi indeks hisoblanadi:

$$NDVI_{RE1} = \frac{\rho_{B8A} - \rho_{B5}}{\rho_{B8A} + \rho_{B5}}$$

bunda, ρ_{B8A}- 865 nm diapazonidagi NIR reflectance, ρ_{B5}- 705 nm diapazonidagi red-edge reflectance.

Ushbu indeks ham $[-1; 1]$ oralig‘ida aniqlanadi va oddiy NDVIga nisbatan red-edge diapazonidagi vegetatsion o‘zgarishlarni hisobga oladi.

Natijada har bir 20 m piksel uchun boshlang‘ich spektral vektor quyidagicha shakllantiriladi:

$$\boldsymbol{X} = [NDVI,\ SI,\ NDVI_{RE1}]$$

Sentinel-2 ma’lumotlarini dastlabki qayta ishlashdan so‘ng sho‘rlanishni baholash uchun uchta spektral indikator - NDVI, SI va $NDVI_{RE1}$ hisoblanadi. Ushbu indikatorlarning birgalikda qo‘llanishi sho‘rlanishning tuproq yuzasidagi bevosita spektral belgilarini hamda uning o‘simlik qoplamida yuzaga keltiradigan bilvosita o‘zgarishlarini bir vaqtning o‘zida hisobga olish imkonini beradi. NDVI vegetatsiyaning umumiy holatini, SI tuproq yuzasining sho‘rlanish bilan bog‘liq spektral xususiyatlarini, $NDVI_{RE1}$ esa red-edge diapazonida o‘simliklarning fiziologik holatini ifodalaydi.

Birinchi indikator sifatida “Normalized Difference Vegetation Index” qo‘llanadi. B8 kanalining markaziy to‘lqin uzunligi 842 nm, B4 kanalining markaziy to‘lqin uzunligi 665 nm ni tashkil qiladi.

NDVI o‘simliklarning spektral xususiyatiga asoslanadi: sog‘lom yashil o‘simliklar qizil diapazondagi nurlanishni xlorofill hisobiga kuchli yutadi, yaqin infraqizil diapazonda esa barglarning ichki tuzilishi sababli nurlanishni kuchli qaytaradi. Shuning uchun faol vegetatsiyaga ega piksellarda NDVI yuqori qiymatlarga ega bo‘ladi. O‘simlikning sho‘rlanish stressiga uchrashi natijasida vegetatsion faollik va barglarning fiziologik holati o‘zgarishi mumkin, bu esa qizil va NIR diapazonlaridagi reflectance nisbatining o‘zgarishiga olib keladi.

NDVI nazariy jihatdan:

$$-1 \le NDVI \le 1$$

oraliqda joylashadi. Biroq sug‘oriladigan qishloq xo‘jaligi maydonlarida modelga faqat tadqiqot hududidagi real piksel qiymatlari kiritiladi. Shu sababli noravshan model uchun “Past”, “O‘rta” va “Yuqori” chegaralar nazariy $[-1; 1]$ intervaldan tasodifiy olinmaydi, balki dala EC_ema’lumotlari bilan bog‘langan holda kalibrlanadi.

Ikkinchi indikator sifatida salinity index ishlatiladi:

$$SI = \frac{\rho_{B2} \times \rho_{B4}}{\rho_{B3}}$$

bunda, ρ_{B2}, ρ_{B3}va ρ_{B4}mos ravishda Sentinel-2 ning ko‘k 490 nm, yashil 560 nm va qizil 665 nm kanallaridagi reflectance qiymatlarini bildiradi.

SI ning *NDVI* dan asosiy farqi shundaki, u vegetatsiya holatini emas, asosan tuproq yuzasining ko‘rinadigan diapazondagi spektral javobini tavsiflash uchun ishlatiladi. Sho‘rlangan tuproqlarda yuzaga chiqadigan tuzlar va tuz qobig‘i tuproqning ko‘rinadigan diapazondagi qaytaruvchanlik xususiyatlarini o‘zgartirishi mumkin. Shu sababli *SI* sho‘rlanishning tuproq yuzasida bevosita namoyon bo‘ladigan spektral signalini modelga kirituvchi indikator sifatida qaraladi.

SI uchun *NDVI* dagidek oldindan belgilangan universal $[-1; 1]$ diapazon mavjud emas. Shuning uchun uning qiymatlari tadqiqot ma’lumotlaridan olinadi:

$$SI_{min} = min(SI_i),\ SI_{max} = max(SI_i)$$

bunda, SI_i - i-pikselning SI qiymati.

Biroq SI_{min}va SI_{max}ning o‘zi “past” va “yuqori sho‘rlanish” chegaralari hisoblanmaydi. Ushbu chegaralar keyingi bosqichda EC_ebilan bog‘lanib, statistik va fuzzy yondashuv asosida aniqlanadi.

(cc) BY

Uchinchi indikator sifatida red-edge diapazonidan foydalanadigan $NDVI_{RE1}$hisoblanadi:

$$NDVI_{RE1} = \frac{\rho_{B8A} - \rho_{B5}}{\rho_{B8A} + \rho_{B5}}$$

bunda, ρ_{B8A} - 865 nm markaziy to‘lqin uzunligidagi NIR reflectance, ρ_{B5}esa 705 nm markaziy to‘lqin uzunligidagi red-edge reflectance hisoblanadi.

Red-edge diapazoni o‘simliklarning xlorofill miqdori va vegetatsion holatidagi o‘zgarishlarga sezgir hisoblanadi. Shu sababli $NDVI_{RE1}$ oddiy NDVI bilan bir xil axborotni takrorlamasdan, o‘simlik stressining boshqa spektral komponentini modelga kiritadi. Sho‘rlanish natijasida o‘simliklarda suv tanqisligi va fiziologik stress kuchayishi mumkinligi sababli red-edge diapazonidagi reflectance nisbati ham o‘zgaradi.

Ushbu indikator ham nazariy jihatdan:

$$-1 \le NDVI_{RE1} \le 1$$

oraliqda bo‘ladi. Natijada har bir 20m × 20m piksel uchun uch o‘lchamli spektral vektor hosil qilinadi:

$$X_i = [N, D, VI_i\ SI_i\ NDVI_{RE1,i}]$$

bunda, i- alohida piksel indeksidir.

Uchta indikatorni birgalikda qo‘llash modelning asosiy afzalliklaridan birini tashkil qiladi. *NDVI* va $NDVI_{RE1}$sho‘rlanishning vegetatsiyaga ta’sirini, *SI* esa tuproq yuzasining spektral xususiyatlarini ifodalaydi. Model faqat bitta spektral belgiga emas, balki sho‘rlanishning turli ko‘rinishlarini ifodalovchi bir nechta axborot manbalariga tayanadi.

Tuproq sho‘rlanishini baholashda spektral indikatorlarning qiymatlarini qat’iy chegaralar asosida “past”, “o‘rta” yoki “yuqori” guruhlarga ajratish sho‘rlanishning uzluksiz tabiatini to‘liq ifodalamaydi. Shu sababli har bir indikatorning tegishlilik darajasini 0dan 1 gacha uzluksiz qiymatda ifodalovchi noravshan membership funksiyalaridan foydalaniladi. Bunda 0 - tegishlilikning mavjud emasligini, 1 esa tegishlilikning maksimal darajasini bildiradi.

Har bir spektral indikator uchun uchta lingvistik o‘zgaruvchi qabul qilinadi:

$$L = \{\text{Past}, \text{O‘rta}, \text{Yuqori}\}$$

va har bir $x$qiymat uchun:

$$\mu_L(x) \in [0, 1]$$

ko‘rinishidagi membership qiymati aniqlanadi. Natijada bitta piksel bir vaqtning o‘zida, masalan, “O‘rta” va “Yuqori” sho‘rlanish holatlariga turli darajada tegishli bo‘lishi mumkin. Bu xususiyat sho‘rlanish sinflari orasidagi tabiiy o‘tishlarni ifodalash imkonini beradi.

Tadqiqot davomida membership funksiyasining shakli sifatida “Dombi tipidagi funksiya” qabul qilinadi. Ushbu funksiya uzluksiz va silliq o‘tishni ta’minlashi hamda chegaraviy qiymatlarning keskin o‘zgarishini kamaytirishi bilan fuzzy model uchun qulay hisoblanadi. Umumiy ko‘rinishda Dombi funksiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^{-\lambda}}$$

bunda, $c > 0$ - funksiyaning markaziy parametri, $\lambda > 0$ - egri chiziqning keskinligini boshqaruvchi parametr, x - tegishli spektral indikator qiymati.

Ushbu tadqiqotda indikatorlarning sho‘rlanish bilan bog‘liqlik yo‘nalishi ham hisobga olinadi. Masalan, sho‘rlanish kuchayishi bilan *NDVI* kamayadigan holatda yuqori sho‘rlanishga tegishlilik funksiyasi kamayuvchi shaklda, *SI* sho‘rlanish bilan bir yo‘nalishda o‘zgaradigan holatda esa ortuvchi shaklda quriladi. Shu sababli membership funksiyasining yo‘nalishi faqat matematik shaklga emas, balki indikatorning EC_ebilan empirik munosabatiga asoslanadi.

Har bir indikator uchun funksiyaning parametrlarini aniqlashda uchta asosiy nuqta belgilanadi:

$$x_L,\ x_M,\ x_H$$

bunda, x_L, x_M va x_H mos ravishda past, o‘rta va yuqori sho‘rlanish holatlarining xarakterli chegaralarini bildiradi. Ushbu qiymatlar oldindan subyektiv ravishda berilmaydi; ular mavjud EC_e o‘lchovlari va tegishli spektral indikatorlarning empirik taqsimoti asosida aniqlanadi.

(cc) BY

Har bir piksel uchun dastlabki uchta indikator qo‘llaniladi:

$$X_i = \{N, D, VI_i SI_i NDVI_{RE1,i}\}$$

noravshanlashtirish bosqichidan so‘ng:

$$\mu(X_i) = \{\mu_{NDVI,i}, \mu_{SI,i}, \mu_{RE1,i}\}$$

ko‘rinishidagi [0;1] oralig‘idagi qiymatlarga aylantiriladi. Keyingi bosqichda aynan ushbu membership qiymatlari noravshan qoidalar bazasiga uzatiladi va indikatorlar o‘rtasidagi mantiqiy munosabatlar asosida integral sho‘rlanish bahosi shakllantiriladi.

Bu yondashuvning asosiy afzalligi shundaki, sho‘rlanish “past” yoki “yuqori” degan qat’iy ikkilik qarorga keltirilmaydi, balki har bir pikselning tegishli holatga bo‘lgan darajasi matematik ravishda ifodalanadi. Shu bilan birga, keyingi bosqichda membership funksiyalarining $c$va λ parametrlarini haqiqiy EC_ema’lumotlari asosida kalibrlash modelning subyektivligini kamaytiradi.

Noravshan qoidalar bazasi $NDVI$, SIva $NDVI_{RE1}$indikatorlarining o‘zaro kombinatsiyasi asosida yakuniy sho‘rlanish holatini aniqlash uchun shakllantiriladi. Har bir kirish o‘zgaruvchisi uchta lingvistik qiymatga ega:

$$L = \{L, M, H\}$$

bunda, L - past, M- o‘rta, H - yuqori darajani bildiradi. Modelning chiqish o‘zgaruvchisi S - integral sho‘rlanish darajasi bo‘lib, u ham uchta lingvistik holat bilan ifodalanadi:

$$S = \{S_L, S_M, S_H\}$$

bunda, S_L, $S_M$va $S_H$mos ravishda past, o‘rta va yuqori sho‘rlanishni bildiradi. Qoidalar Mamdani tipidagi IF–THEN ko‘rinishida yoziladi:

$$R_k : \text{IF } NDVI = A_k \text{ AND } SIB_k \text{ AND } NDVI_{RE1} = C_k \text{ THEN } S = D_k$$

bunda, A_k, B_k, C_k, D_k- tegishli lingvistik qiymatlar.

Indikatorlarning fizik mazmunidan kelib chiqib, sho‘rlanish yuqori bo‘lgan holatda odatda $NDVI$ va $NDVI_{RE1}$ ning pasayishi, SI ning esa sho‘rlangan tuproq yuzasiga xos qiymatlarga siljishi kutiladi. Shu sababli qoidalar bazasida vegetatsiya indikatorlarining past qiymatlari va SI ning yuqori sho‘rlanishga mos qiymatlari yuqori sho‘rlanish chiqishi bilan bog‘lanadi.

Masalan, asosiy qoidalar quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$R_1\text{:IF } NDVI = L \text{ AND } SI = H \text{ AND } NDVI_{RE1} = L \text{ THEN } S = S_H$$

$$R_2\text{:IF } NDVI = M \text{ AND } SI = H \text{ AND } NDVI_{RE1} = M \text{ THEN } S = S_M$$

$$R_3\text{:IF } NDVI = H \text{ AND } SI = L \text{ AND } NDVI_{RE1} = H \text{ THEN } S = S_L$$

$$R_4\text{:IF } NDVI = L \text{ AND } SI = M \text{ AND } NDVI_{RE1} = M \text{ THEN } S = S_M$$

Biroq barcha qoidalarda indikatorlarning qiymatlarini qat’iy ravishda bir xil yo‘nalishda talqin qilish maqsadga muvofiq emas. Chunki vegetatsiya holatiga sho‘rlanishdan tashqari sug‘orish, ekin turi, o‘sish fazasi, tuproq namligi va agrotexnik tadbirlar ham ta’sir qiladi. Shu sababli qoidalar bazasi faqat nazariy taxminlarga emas, balki mavjud EC_eo‘lchovlari bilan bog‘langan empirik munosabatlarga asoslanib yakuniy shakllantiriladi.

Uchta indikatorning har biri uchta lingvistik qiymatga ega bo‘lgani uchun nazariy maksimal kombinatsiyalar soni:

$$N = 3^3 = 27$$

ni tashkil qiladi. Demak, to‘liq qoidalar bazasi 27 ta kombinatsiyani qamrab olishi mumkin. Biroq qarama-qarshi yoki fizik mazmuni yetarli bo‘lmagan kombinatsiyalar avtomatik ravishda foydali qoida hisoblanmaydi. Shu sababli yakuniy qoidalar bazasi EC_ebilan kalibrlash va model validatsiyasi natijalariga ko‘ra optimallashtiriladi.

Qoidalar bazasining matematik vazifasi uchta mustaqil membership qiymatini yagona chiqish o‘zgaruvchisiga aylantirishdan iborat:

$$(\mu_{NDVI}, \mu_{SI}, \mu_{RE1}) \rightarrow \mu_S$$

Natijada har bir piksel uchun integral sho‘rlanishning noravshan chiqish to‘plami hosil qilinadi.

Shakllantirilgan qoidalar bazasi asosida $NDVI$, SIva $NDVI_{RE1}$indikatorlarining membership qiymatlari yagona sho‘rlanish bahosiga birlashtiriladi. Buning uchun Mamdani tipidagi noravshan inferensiya tizimidan foydalaniladi.

Har bir k-qoidaning faollashuv darajasi kirish o‘zgaruvchilarining tegishlilik qiymatlari orasidagi minimum operatori orqali aniqlanadi:

$$\alpha_k = \min\left[\mu_{NDVI}^{(k)}, \mu_{SI}^{(k)}, \mu_{RE1}^{(k)}\right]$$

bunda, $\alpha_k \in [0, 1]$ - k-qoidaning faollashuv darajasi.

Masalan,

$$R_k\text{:IF } NDVI = L \text{ AND } SI = H \text{ AND } NDVI_{RE1} = L \text{ THEN } S = H$$

qoidasi uchun:

$$\alpha_k = \min\left[\mu_{NDVI,L}, \mu_{SI,H}, \mu_{RE1,L}\right]$$

Shundan so‘ng qoidaning faollashuv darajasi uning chiqish membership funksiyasiga uzatiladi. Mamdani implicatsiyasida chiqish funksiyasi quyidagicha kesiladi:

$$\mu_{S_k}(s) = \min\left[\alpha_k, \mu_{D_k}(s)\right]$$

bunda, $\mu_{D_k}(s)$ - k-qoidaga tegishli chiqish lingvistik o‘zgaruvchisining membership funksiyasi.

Bir nechta qoidalar bir vaqtning o‘zida faollashishi mumkin. Ularning natijalari maksimum operatori orqali birlashtiriladi:

$$\mu_S(s) = \max_{k=1,\dots,N} \mu_{S_k}(s)$$

bunda, $N \leq 27$ - ishlatilayotgan qoidalar soni.

Mamdani inferensiya jarayoni matematik jihatdan quyidagi ketma-ketlikda amalga oshiriladi:

$(N, D, VISINDVI_{RE1})$ → membership → α_k → rule implication → aggregation → $\mu_S(s)$

Natijada har bir 20 m piksel uchun [0;1] oralig‘ida ifodalangan yakuniy noravshan sho‘rlanish to‘plami $\mu_S(s)$hosil bo‘ladi. Ushbu to‘plam hali yakuniy bitta son emas; u turli sho‘rlanish darajalariga tegishlilikni ifodalovchi uzluksiz funksiya hisoblanadi.

Mamdani inferensiyasi natijasida har bir piksel uchun hosil bo‘lgan $\mu_S(s)$noravshan chiqish funksiyasini amaliy xaritalash va statistik tahlil uchun yagona sonli qiymatga aylantirish talab etiladi. Buning uchun centroid (markaz) defuzzifikatsiya usuli qo‘llanadi.

Integral sho‘rlanish indeksi quyidagicha hisoblanadi:

Integral sho‘rlanish indeksi quyidagicha hisoblanadi:

$$S = \frac{\int_{s_{\min}}^{s_{\max}} s\ \mu_S(s)\, ds}{\int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \mu_S(s)\, ds}$$

bunda, S - pikselning integral sho‘rlanish indeksi, s - chiqish universumi bo‘yicha sho‘rlanish qiymati, $\mu_S(s)$ - Mamdani inferensiyasi natijasida hosil bo‘lgan agregatsiyalangan membership funksiyasi, $s_{\min}$va $s_{\max}$ - chiqish o‘zgaruvchisining chegaralari.

Modelning chiqish shkalasi:

$$0 \leq S \leq 1$$

ko‘rinishida normallashtiriladi. Bunda Sning kichik qiymatlari sho‘rlanishga tegishlilikning pastligini, katta qiymatlari esa yuqori sho‘rlanishga tegishlilikni bildiradi.

Agar hisoblash diskret piksel qiymatlari orqali amalga oshirilsa, integral quyidagi yig‘indi bilan almashtiriladi:

$$S = \frac{\sum_{j=1}^{m} s_j\, \mu_S(s_j)}{\sum_{j=1}^{m} \mu_S(s_j)}$$

bunda, s_j - chiqish universumining diskret nuqtalari, m - diskret nuqtalar soni.

Har bir 20m × 20m piksel uchun bitta Sqiymati olinadi va barcha piksellar bo‘yicha:

$$S(x, y)$$

ko‘rinishidagi integral sho‘rlanish rasteri shakllantiriladi.

Ushbu indeks hali EC_ening bevosita o‘lchov birligidagi qiymati emas. S - Sentinel-2 spektral indikatorlari va fuzzy qoidalar tizimi asosida olingan nisbiy sho‘rlanish ko‘rsatkichi hisoblanadi. Shu sababli keyingi bosqichda Sqiymatlari dala va laboratoriyada aniqlangan EC_ema’lumotlari bilan bog‘lanadi.

Fuzzy model orqali hisoblangan Sintegral sho‘rlanish indeksi nisbiy ko‘rsatkich bo‘lgani sababli uni fizik mazmunga ega bo‘lgan tuproq elektr o‘tkazuvchanligi - EC_e bilan bog‘lash talab etiladi. EC_etuproq sho‘rlanishini miqdoriy tavsiflashda keng qo‘llanadigan ko‘rsatkich bo‘lib, modelni kalibrlash uchun etalon o‘zgaruvchi sifatida qabul qilinadi.

Kalibrlash uchun bir xil geografik koordinataga ega bo‘lgan kuzatuvlar to‘plami shakllantiriladi:

$$D = \left\{\left(S_i, EC_{e,i}\right)\right\}_{i=1}^{n}$$

(cc) BY

bunda, S_i - i-namuna joylashgan pikselning integral sho‘rlanish indeksi, $EC_{e,i}$ - shu nuqtada laboratoriya yoki dala usulida aniqlangan elektr o‘tkazuvchanlik qiymati, n - kuzatuvlar soni. Boshlang‘ich kalibrlash modeli sifatida chiziqli regressiya qo‘llanadi:

$$\widehat{EC_e} = a + bS$$

bunda, a- intercept, b- regressiya koeffitsiyenti.

a va b eng kichik kvadratlar usuli orqali aniqlanadi:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})\left(EC_{e,i} - \bar{EC_e}\right)}{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}$$

$$a = \overline{EC_e} - b\bar{S}$$

bunda, $\bar{S}$va $\overline{EC_e}$mos ravishda Sva EC_ening o‘rtacha qiymatlaridir. Modelning bog‘lanish kuchi determinatsiya koeffitsiyenti orqali baholanadi:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(EC_{e,i} - \bar{EC_e})^2}$$

Bundan tashqari, prognoz xatosini baholash uchun RMSE ishlatiladi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i})^2}$$

va o‘rtacha absolyut xato:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |\, EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i} \,|.$$

Kalibrlash jarayonida ma’lumotlarning bir qismi model parametrlarini aniqlash uchun, qolgan qismi esa mustaqil tekshirish uchun ajratiladi. Shu orqali Sva EC_eo‘rtasidagi bog‘lanishning faqat o‘qitish ma’lumotlarida emas, balki yangi kuzatuvlarda ham saqlanishi tekshiriladi.

Agar Sva EC_eo‘rtasidagi bog‘lanish chiziqli model bilan yetarlicha ifodalanmasa, keyingi tahlilda polinomial yoki boshqa moslashtirish funksiyasi sinovdan o‘tkazilishi mumkin. Biroq yakuniy model eng yuqori R^2ga emas, balki validatsiya to‘plamidagi R^2, RMSE va MAE ko‘rsatkichlarining birgalikdagi natijasiga ko‘ra tanlanadi.

Natijada fuzzy modelning nisbiy ko‘rsatkichi Sdan miqdoriy $\widehat{EC_e}$qiymatiga o‘tish imkoniyati hosil qilinadi:

$$S \rightarrow \widehat{EC_e}$$

bu esa model natijasini faqat “past–o‘rta–yuqori” sho‘rlanish xaritasi sifatida emas, balki tuproq elektr o‘tkazuvchanligining prognoz xaritasi sifatida ham ifodalash imkonini beradi.

Taklif etilgan fuzzy modelning ishonchliligi integral sho‘rlanish indeksi Sasosida hisoblangan $\widehat{EC_e}$qiymatlarini mustaqil dala-laboratoriya o‘lchovlari bilan taqqoslash orqali baholanadi. Bunda kalibrlashda foydalanilmagan kuzatuvlar validatsiya to‘plamini tashkil etadi:

$$D_{val} = \left\{\left(S_{i'}, EC_{e,i}\right)\right\}_{i=1}^{n_v}$$

Model aniqligini baholash uchun uchta asosiy statistik mezon qo‘llanadi.

1. Determinatsiya koeffitsiyenti

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_v}(EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^{n_v}(EC_{e,i} - \bar{EC_e})^2}$$

R^2qiymatining 1 ga yaqinlashishi model prognozlari va kuzatilgan EC_eqiymatlari o‘rtasidagi moslikning yuqoriligini bildiradi.

2. Ildiz o‘rtacha kvadratik xato

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_v}\sum_{i=1}^{n_v}(EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i})^2}$$

RMSE qiymatining kichik bo‘lishi modelning prognoz xatosi pastligini ko‘rsatadi.

3. O‘rtacha absolyut xato

$$MAE = \frac{1}{n_v}\sum_{i=1}^{n_v} |\, EC_{e,i} - \widehat{EC}_{e,i} \,|$$

MAE prognoz va real qiymatlar o‘rtasidagi o‘rtacha absolyut farqni ifodalaydi va alohida katta xatolarga RMSE ga nisbatan kamroq sezgir.

Modelning sistematik xatosini aniqlash uchun qo‘shimcha ravishda o‘rtacha xatolik:

$$ME = \frac{1}{n_v}\sum_{i=1}^{n_v}\left(\widehat{EC}_{e,i} - EC_{e,i}\right)$$

hisoblanadi. $ME > 0$modelning ortiqcha baholash, $ME < 0$esa kam baholash tendensiyasini bildiradi.

(cc) BY

Validatsiya natijalarini grafik jihatdan baholash uchun kuzatilgan va prognoz qilingan EC_eqiymatlari o‘rtasidagi tarqalish diagrammasi tuziladi. Diagrammada ideal moslik chizig‘i:

$$\widehat{EC_e} = EC_e$$

ko‘rinishida beriladi. Nuqtalarning ushbu chiziqqa yaqin joylashishi modelning miqdoriy aniqligi yuqoriligini ko‘rsatadi.

Validatsiyada muhim metodik talab - kalibrlash va tekshirish ma’lumotlarining mustaqilligidir. Shu sababli EC_enamunalarining kalibrlash va validatsiya to‘plamlariga ajratilishida fazoviy yaqin namunalarni turli to‘plamlarga tasodifiy ajratishdan ehtiyot bo‘linadi. Aks holda fazoviy avtokorrelyatsiya model aniqligini sun’iy ravishda yuqori ko‘rsatishi mumkin.

Yakuniy baholash quyidagi mantiqiy zanjir asosida amalga oshiriladi:

$$\textit{Sentinel-2} \rightarrow \{N, D, VISINDVI_{RE1}\} \rightarrow \textit{Fuzzy model} \rightarrow S \rightarrow \widehat{EC_e} \rightarrow \{R^2, R, M, SEMAEME\}.$$

taklif etilayotgan modelning asosiy ilmiy yangiligi tuproq sho‘rlanishini baholashda Sentinel-2 multispektral ma’lumotlari, spektral indikatorlar va noravshan mantiqni yagona matematik tizimga integratsiyalash bilan belgilanadi. Modelda sho‘rlanish holati bitta spektral indeks orqali emas, balki $NDVI$, SIva $NDVI_{RE1}$indikatorlarining birgalikdagi axboroti asosida baholanadi.

Modelning konseptual tuzilishi quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\{N, D, VISINDVI_{RE1}\} \rightarrow \{\mu_{NDVI}, \mu_{SI}, \mu_{RE1}\} \rightarrow \text{Fuzzy Rules} \rightarrow \mu_S \rightarrow S \rightarrow \widehat{EC_e}$$

Bu yondashuvda har bir spektral indikator dastlab [0;1] oralig‘idagi membership qiymatiga aylantiriladi. Natijada turli o‘lchov diapazonlariga ega indikatorlarni yagona matematik muhitda birlashtirish imkoniyati hosil bo‘ladi.

Modelning ikkinchi muhim jihati sho‘rlanish chegaralarini qat’iy sinflar sifatida emas, balki uzluksiz tegishlilik funksiyalari orqali ifodalashdir. Bunda bir piksel bir vaqtning o‘zida bir nechta sho‘rlanish holatiga turli darajada tegishli bo‘lishi mumkin:

$$0 \leq \mu_{S_L}, \mu_{S_M}, \mu_{S_H} \leq 1.$$

Bu xususiyat tabiiy sharoitda sho‘rlanish darajasining keskin emas, balki fazoviy jihatdan uzluksiz o‘zgarishini matematik ifodalash imkonini beradi.

Uchinchi yangilik - uchta spektral indikatorni Mamdani inferensiya tizimi orqali integratsiyalash. Bunda har bir qoida:

$$R_k\text{:IF } NDVI = A_k \wedge SI = B_k \wedge NDVI_{RE1} = C_k \text{ THEN } S = D_k$$

ko‘rinishida shakllantiriladi va qoidalarning faollashuv darajasi:

$$\alpha_k = \min\left(\mu_{NDVI}^{(k)}, \mu_{SI}^{(k)}, \mu_{RE1}^{(k)}\right)$$

orqali aniqlanadi. Shu tariqa indikatorlarning o‘zaro bog‘liq axboroti oddiy arifmetik yig‘indi yoki o‘rtacha qiymat bilan emas, balki noravshan mantiqiy munosabatlar orqali birlashtiriladi.

To‘rtinchi muhim jihat - modelning yakuniy natijasini EC_ebilan bog‘lash imkoniyatidir. Fuzzy tizim tomonidan hosil qilinadigan Sindeksi:

$$S \in [0, 1]$$

oraliqdagi nisbiy sho‘rlanish ko‘rsatkichi bo‘lib, nazariy kalibrlash bosqichida:

$$\widehat{EC_e} = f(S)$$

ko‘rinishida fizik mazmunga ega bo‘lgan elektr o‘tkazuvchanlik ko‘rsatkichiga transformatsiya qilinadi. Shu sababli taklif etilayotgan tizim faqat klassifikatsiya modeligina emas, balki spektral ma’lumot → noravshan indeks → miqdoriy sho‘rlanish bahosi zanjirini shakllantiruvchi metodologik model sifatida qaraladi.

Modelning yana bir jihati - Metternichtning fuzzy classification va fuzzy overlay konsepsiyalarini Sentinel-2 spektral indikatorlari va Mamdani inferensiyasi bilan birlashtirishdir. Bunda mavjud fuzzy yondashuvning asosiy tamoyillari saqlangan holda, zamonaviy multispektral ma’lumotlardan foydalanish va indikatorlar o‘rtasidagi mantiqiy munosabatlarni formal qoidalar orqali ifodalash nazarda tutiladi.

Taklif etilayotgan modelning ilmiy yangiligi quyidagi uchta asosiy komponentning yagona tizimga birlashtirilishida mujassam:

(cc) BY

Sentinel-2 + Spektral indikatorlar + Fuzzy-Mamdani modeli

Natijada tuproq sho‘rlanishini qat’iy chegaralangan sinflarga ajratish o‘rniga, uning uzluksiz va noaniq tabiatini matematik jihatdan ifodalovchi integrallashgan baholash konsepsiyasi taklif etiladi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda tuproq sho‘rlanishini masofadan zondlash ma’lumotlari asosida baholash uchun Sentinel-2 MSI va noravshan mantiqqa asoslangan matematik model taklif etildi. Modelda $NDVI$, SIva $NDVI_{RE1}$spektral indikatorlari sho‘rlanishning vegetatsiyaga hamda tuproq yuzasining spektral xususiyatlariga ta’sirini kompleks ifodalash uchun tanlandi.

Indikatorlarni membership funksiyalari orqali [0;1] oralig‘iga o‘tkazish, Mamdani tipidagi inferensiya yordamida ularni birlashtirish va centroid defuzzifikatsiyasi orqali integral sho‘rlanish indeksini shakllantirish modelning asosiy matematik ketma-ketligini tashkil etdi:

$$\{N, D, VISINDVI_{RE1}\} \rightarrow \text{Fuzzy Membership} \rightarrow \text{Mamdani Inference} \rightarrow S \rightarrow \widehat{EC_e}.$$

Taklif etilayotgan yondashuvning asosiy ilmiy jihati sho‘rlanishni qat’iy chegaralangan sinflar orqali emas, balki har bir pikselning turli sho‘rlanish holatlariga tegishlilik darajasini hisobga oluvchi uzluksiz noravshan model orqali ifodalashdan iborat. Metternichtning fuzzy yondashuvi Sentinel-2 multispektral indikatorlari bilan integratsiyalangan holda yagona matematik tizimga keltirildi.

Tadqiqot nazariy-metodologik xarakterga ega bo‘lib, modelning amaliy aniqligi va EC_ebilan empirik bog‘liqligi alohida dala kuzatuvlari asosida tekshirilishi mumkin. Shunga qaramay, ishlab chiqilgan konsepsiya tuproq sho‘rlanishini masofadan zondlash ma’lumotlari asosida uzluksiz baholash uchun matematik jihatdan izchil asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Xalmuxamedov B. T. Raqamli tibbiyotning tibbiy ta ‘limdagi o ‘rni. – 2024.
2. Bo‘riyev S. D. et al. O ‘zbekiston Tibbiy Ta’limida Raqamli Texnologiyalar Va Sun’iy Intellektni Joriy Etish Tendensiyalari //E-Conference platform. – 2026. – T. 1. – №. 15-aprel. – C. 120-124.
3. Xiong Y. et al. Intelligent wearable-enhanced WeChat platform with multidisciplinary tele-rehabilitation reduces caregiver burden and psychological distress in congenital pseudarthrosis of the tibia: a randomized controlled trial //Mhealth. – 2026. – T. 12. – C. 7.
4. Khalid U. B. et al. Impact of AI-powered solutions in rehabilitation process: Recent improvements and future trends //International Journal of General Medicine. – 2024. – C. 943-969.
5. Filogna S. et al. Pathways to family-centered healthcare: co-designing AI solutions with families in pediatric rehabilitation //Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – T. 12. – C. 1594529.
6. Wagino W. et al. Android application for smart diagnosis of children with disabilities and its correlation to neuroscience: Definition, literature review with bibliometric analysis, and experiments //Indonesian Journal of Science and Technology. – 2024. – T. 9. – №. 2. – C. 497-526.
7. Alghadier M., Altheyab A. S. The Digital Pediatric Physiotherapy Framework (DPPF): A Systematic Review of Digital Health Integration in Pediatric Physiotherapy //Children. – 2026. – T. 13. – №. 4. – C. 541.

(cc) BY