MASHINAVIY O‘QITISHGA ASOSLANGAN GIBRID MODELLI INTELLEKTUAL TAVSIYA TIZIMI YORDAMIDA O‘ZBEKISTON HUDUDIDA QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA OBYEKTLARI JOYLASHUVINI ANIQLASHDA O‘ZARO MOSLIK KO‘RSATKICHLARINING AHAMIYATI

Nazirova Elmira Shodmonovna[1], Xalimjanov Abduqunduz Raximjon o’g’li[2]

[1]t.f.d professor Televizion texnologiyalar fakulteti dekani Muhamad al Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalar universiteti

[2]Phd tayanch doktorant Tashkent shaxridagi Belarus-O’zbekiston qo’shma tarmoqlar aro amaliy texnik kvalifikatsiya Insttituti

E-mail: xalimjonov1234@gmail.com

KEYWORDS

qayta tiklanuvchi energiya, mashinaviy o‘qitish, gibrid model, intellektual tavsiya tizimi, quyosh energiyasi, shamol energiyasi, hududiy tahlil, Random Forest, XGBoost, moslik ko‘rsatkichi

ABSTRACT

Ushbu maqolada O‘zbekiston hududida qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosidagi elektr energiyasi ishlab chiqarish obyektlarini joylashtirish uchun mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimini ishlab chiqish masalasi ko‘rib chiqiladi. Tadqiqot doirasida NASA POWER ochiq ma’lumotlari asosida hudud bo‘yicha panjara (grid) nuqtalar shaklida quyosh radiatsiyasi, to‘g‘ridan-to‘g‘ri nurlanish, shamol tezligi va havo harorati ko‘rsatkichlaridan iborat iqlimiy dataset shakllantirildi. Olingan ma’lumotlar normalizatsiya qilinib, quyosh energiyasi, shamol energiyasi hamda ularning kombinatsiyasini ifodalovchi gibrid moslik ko‘rsatkichlari hisoblandi. Gibrid moslik qiymatlarini bashoratlash va tahlil qilish uchun Random Forest va XGBoost algoritmlariga asoslangan regressiya modellari qurildi. Modellarning samaradorligi determinatsiya koeffitsienti (R^2) va o‘rtacha absolyut xato (MAE) mezonlari asosida baholandi. Tajriba natijalari gibrid moslikni shakllantirishda harorat va shamol tezligi omillarining muhim ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatdi. Shuningdek, ishlab chiqilgan tavsiya tizimi yordamida O‘zbekiston hududi bo‘yicha eng istiqbolli hududlar aniqlanib, ularning fazoviy taqsimoti interaktiv xarita ko‘rinishida vizualizatsiya qilindi. Tadqiqot natijalari qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini optimal joylashtirish bo‘yicha qaror qabul qilish jarayonlarini qo‘llab-quvvatlash hamda energetika sohasida raqamli transformatsiyani jadallashtirishga xizmat qiladi.

KIRISH

So‘nggi yillarda dunyo miqyosida energiya resurslaridan samarali foydalanish hamda atrof-muhitga salbiy ta’sirni kamaytirish masalalari dolzarb muammolardan biri sifatida e’tirof etilmoqda. An’anaviy yoqilg‘i manbalariga bo‘lgan qaramlikni kamaytirish maqsadida qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni kengaytirish ustuvor yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, quyosh va shamol energiyasi katta salohiyatga ega bo‘lib, ularni to‘g‘ri joylashtirish energetik tizimlarning barqarorligi va iqtisodiy samaradorligini ta’minlashda muhim rol o‘ynaydi. Qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirish jarayoni ko‘plab omillarga, jumladan, iqlim sharoitlari, geografik joylashuv, texnik va iqtisodiy ko‘rsatkichlarga bog‘liq. An’anaviy usullar bu omillarni kompleks tarzda hisobga olishda cheklangan imkoniyatlarga ega. Shu sababli, zamonaviy axborot texnologiyalari va mashinaviy o‘qitish algoritmlaridan foydalanish mazkur jarayonni avtomatlashtirish va optimallashtirish imkonini beradi. Mashinaviy o‘qitish asosidagi modellar katta hajmdagi ma’lumotlarni tahlil qilish, yashirin qonuniyatlarni

© E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

aniqlash hamda bashoratlash masalalarini samarali hal etishi bilan ajralib turadi. Ayniqsa, gibrid modellar turli energiya manbalarining o‘zaro mosligini baholash orqali kompleks qaror qabul qilish jarayonlarini qo‘llab-quvvatlaydi. Mazkur tadqiqotning maqsadi — O‘zbekiston hududi misolida qayta tiklanuvchi energiya obyektlari joylashuvini aniqlash uchun mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimini ishlab chiqish hamda o‘zaro moslik ko‘rsatkichlarining ahamiyatini baholashdan iborat. Qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirish masalasi so‘nggi yillarda ko‘plab tadqiqotchilar e’tiborini tortib kelmoqda. Tadqiqotlarning aksariyati quyosh va shamol energiyasi resurslarini baholash, hududiy moslikni aniqlash hamda optimal joylashuvni tanlash muammolariga bag‘ishlangan. Ko‘plab ishlar geografik axborot tizimlari (GIS) asosida turli ekologik va texnik omillarni birlashtirish orqali moslik xaritalarini yaratishga qaratilgan. Bunday yondashuvlar hududiy tahlilni vizual jihatdan qulaylashtiradi, biroq katta hajmdagi ma’lumotlarni chuqur tahlil qilish va bashoratlash imkoniyatlari cheklangan. So‘nggi yillarda mashinaviy o‘qitish algoritmlaridan foydalangan holda energiya resurslarini baholash bo‘yicha tadqiqotlar soni ortib bormoqda. Masalan, regressiya modellariga asoslangan yondashuvlar yordamida quyosh radiatsiyasi va shamol tezligini bashoratlash masalalari muvaffaqiyatli yechim topgan. Random Forest, Support Vector Machine va Gradient Boosting kabi algoritmlar yuqori aniqlik ko‘rsatkichlarini ta’minlagani qayd etilgan. Shu bilan birga, ayrim tadqiqotlarda gibrid modellar taklif qilinib, bir nechta energiya manbalarining birgalikdagi samaradorligi baholangan. Bunday modellar alohida manbalarni tahlil qilish bilan cheklanmay, ularning o‘zaro mosligini ham hisobga olish imkonini beradi. Biroq mavjud ishlarning aksariyatida O‘zbekiston hududi bo‘yicha batafsil gibrid tavsiya tizimlarini ishlab chiqish masalasi yetarli darajada yoritilmagan. Ushbu tadqiqot aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan bo‘lib, ochiq iqlim ma’lumotlari asosida mashinaviy o‘qitishga tayangan holda gibrid modelli intellektual tavsiya tizimini ishlab chiqishni maqsad qiladi[1,2,3].

METODOLOGIYA

Ushbu tadqiqotda O‘zbekiston hududida qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirish uchun mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimini ishlab chiqish maqsad qilingan. Tadqiqot metodologiyasi ketma-ket va o‘zaro bog‘liq bosqichlar asosida tashkil etildi.

Metodologiya quyidagi asosiy bosqichlarni o‘z ichiga oladi:

- Iqlimiy ma’lumotlarni yig‘ish (Data Collection – ma’lumotlarni to‘plash)
- Ma’lumotlarni oldindan qayta ishlash (Preprocessing – dastlabki qayta ishlash)
- Energiya moslik ko‘rsatkichlarini shakllantirish (Suitability Index Calculation – moslik indekslarini hisoblash)
- Gibrid moslik modelini qurish (Hybrid Suitability Modeling – gibrid modellashtirish)
- Mashinaviy o‘qitish modellari yordamida bashoratlash (Machine Learning Prediction – ML asosida bashorat)
- Natijalarni baholash va vizualizatsiya qilish (Evaluation and Visualization – baholash va xaritalash)

Tadqiqotda ochiq manbali NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources – Dunyo bo‘yicha energiya resurslarini bashoratlash) platformasining API (Application Programming Interface – dasturiy ta’minotlar o‘rtasida ma’lumot almashish interfeysi) xizmati orqali iqlimiy ma’lumotlar olindi[4,5,6].

O‘zbekiston hududi geografik koordinatalar asosida panjara (grid – to‘r) shaklida ajratildi:

1. Kenglik (Latitude): 37° – 46°
2. Uzunlik (Longitude): 56° – 73°
3. Qadam: 0.5°

Natijada hudud bo‘yicha 665 ta grid (to‘r) nuqta hosil qilindi.

Har bir nuqta uchun quyidagi parametrlar olindi:

- ALLSKY_SFC_SW_DWN – GHI (Global Horizontal Irradiance – gorizontal sirtga tushuvchi quyosh nurlanishi)
- ALLSKY_SFC_SW_DNI – DNI (Direct Normal Irradiance – to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlanishi)

(cc) BY © E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

- WS10M (Wind Speed at 10 meters – yer sathidan 10 metr balandlikdagi shamol tezligi)
- T2M – (Air Temperature at 2 meters – yer sathidan 2 metr balandlikdagi havo harorati)

Ushbu parametrlar qayta tiklanuvchi energiya obyektlari joylashuvini aniqlashda asosiy omillar sifatida tanlandi. Ma'lumotlarni oldindan qayta ishlashda Iqlimiy parametrlar turli o'lchov birliklariga ega bo'lgani sababli ularni yagona oraliqqa keltirish zarur. Shu maqsadda Min–Max normalizatsiya (Min–Max Normalization – minimal va maksimal qiymatlar asosida normallashtirish) usuli qo'llanildi[7,8,9,10].

Min–Max normalizatsiya formulasi quyidagicha ifodalanadi:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Bu yerda:

X – asl qiymat

X_{min}-*parametrning minimal qiymati*
X_{min}-*parametrning maksimal qiymati*
X'-*normallashtirilgan qiymat*

Natijada barcha parametrlar 0 va 1 oralig'iga keltirildi.

Quyosh energiyasi moslik ko'rsatkichini aniqlashda ya'ni (Solar Suitability Index – Quyosh moslik indeksi) Quyosh energiyasi obyektlari uchun asosiy ta'sir etuvchi omillar sifatida GHI–Global Horizontal Irradiance (Gorizontal yuzaga tushuvchi umumiy quyosh nurlanishi) va DNI – Direct Normal Irradiance (Quyosh nurlarining to'g'ridan-to'g'ri normal tushishi) tanlandi.

Quyosh moslik ko'rsatkichi quyidagi chiziqli kombinatsiya asosida hisoblandi:

$$S_{quyosh\ nuri} = 0.6 * GHI' + 0.4 * DNI'$$

Bu yerda

GHI'-*normallashtirilgan GHI qiymati*

DNI'-*normallashtirilgan DNI qiymati*

Shamol energiyasi moslik ko'rsatkichini aniqlashda ya'ni (Wind Suitability Index – Shamol moslik indeksi) Shamol energiyasi uchun asosiy parametr WS10M (Wind Speed at 10 meters – yer sathidan 10 metr balandlikdagi shamol tezligi) bo'lib, harorat esa yordamchi omil sifatida hisobga olindi[11,12,13].

Shamol moslik indeksi:

$$S_{Shamol} = 0.6 * WS10M' + 0.4 * T2M'$$

Bu yerda

$WS10M'$-*normallashtirilgan shamol tezligi*

$T2M'$-*normallashtirilgan harorat*

Gibrid moslik ko'rsatkichini aniqlashda ya'ni (Hybrid Suitability Index – Gibrid moslik indeksi) Quyosh va shamol moslik ko'rsatkichlari birlashtirilib gibrid model hosil qilindi:

$$S_{Gibrid} = 0.5 * S_{quyosh\ nuri} + 0.5 * S_{Shamol}$$

Bu yondashuv hududning umumiy qayta tiklanuvchi energiya salohiyatini kompleks baholash imkonini beradi.

Mashinaviy o'qitish modellarida ya'ni (Machine Learning Models – Mashinaviy o'qitish modellari) Gibrid moslik indeksini bashoratlash uchun quyidagi regressiya modellari qo'llanildi:

Random Forest Regressor (Tasodifiy o'rmon regressori)

XGBoost Regressor (Ekstremal gradient kuchaytirish regressori)

Kirish xususiyatlari vektori:

$$X = [GHI', DNI', WS10M', T2M', Elevation]$$

Elevation – dengiz sathidan balandlik ma'nosida keltirilgan.

Chiqish o'zgaruvchisi:

$$Y = S_{Gibrid}$$

Ma'lumotlar 80% o'qitish va 20% test to'plamiga bo'lindi[14,15].

Modellarni baholash mezonlari (Evaluation Metrics – Baholash mezonlari)

© E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

Aniqlik quyidagi mezonlar asosida baholandi:

Determinatsiya koeffitsiyenti:

$$R^2 - 1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

O‘rtacha mutlaq xató:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|$$

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Ushbu bo‘limda mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimi yordamida olingan natijalar batafsil keltiriladi va ilmiy jihatdan tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalari uchta asosiy yo‘nalishda ko‘rib chiqildi:

- Iqlimiy parametrlar asosida moslik indekslarini hisoblash
- Gibrid moslik indeksining shakllantirilishi
- Mashinaviy o‘qitish modellari yordamida natijalarni baholash

Tadqiqotda quyidagi iqlimiy parametrlar ishlatildi:

- GHI – Global Horizontal Irradiance (Gorizontal yuzaga tushuvchi umumiy quyosh nurlanishi)
- DNI – Direct Normal Irradiance (Quyosh nurlarining to‘g‘ridan-to‘g‘ri normal tushishi)
- WS10M – Wind Speed at 10 meters (10 metr balandlikdagi shamol tezligi)
- T2M – Air Temperature at 2 meters (2 metr balandlikdagi havo harorati)

NASA POWER platformasidan olingan oylik ma’lumotlar har bir grid nuqta uchun o‘rtacha yillik qiymatga keltirildi.

Keyinchalik barcha parametrlar quyidagi min–max normallashtirish formulasi asosida 0–1 oraliqqa o‘tkazildi:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Bu yerda:

X – dastlabki qiymat

X_{min}, X_{max}-mos ravishda minimal va maksimal qiymatlar

Normallashtirish natijasida turli birlikdagi ma’lumotlar bir xil masshtabda ifodalandi.

1-jadval

Normallashtirilgan iqlimiy parametrlarning namunaviy qiymatlari

1	37	56.0	0.855	0.846	0.366	0.787
2	37	57.0	0.845	0.867	0.884	0.827
3	37	58.0	0.832	0.868	0.421	0.716

Jadvaldan ko‘rinadiki, janubiy va markaziy hududlarda quyosh nurlanishi ko‘rsatkichlari yuqori, g‘arbiy hududlarda esa shamol tezligi nisbatan yuqori qiymatlarga ega. Quyosh energiyasi moslik indeksini hisoblashda Quyosh energiyasi obyektlarini joylashtirishda eng muhim parametrlar GHI– Global Horizontal Irradiance (Gorizontal yuzaga tushuvchi umumiy quyosh nurlanishi) va DNI – Direct Normal Irradiance (Quyosh nurlarining to‘g‘ridan-to‘g‘ri normal tushishi) hisoblanadi. Shu sababli quyosh moslik indeksi quyidagi og‘irlik koeffitsientlari asosida shakllantirildi:

$$S_{quyosh\ nuri} = 0.6 * GHI' + 0.4 * DNI'$$
*=0.6*0.855+0.4*0.846=0.851*

$$S_{quyosh\ nuri} = 0.6 * GHI' + 0.4 * DNI'$$
*=0.6*0.845+0.4*0.847=0.854*

Bu yerda:

0.6 – GHI ning asosiy ta’sir ulushi

© E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

0.4 – DNI ning qo‘shimcha ta’sir ulushi

2-jadval

Quyosh moslik indeksining ko‘rsatkichlari ifodalangan

№	GHI'	DNI'	Quyosh nuri ko‘rsatkichi
1	0.855	0.846	0.851
2	0.845	0.867	0.854

Bu natijalar quyosh nurlanishi yuqori hududlar aniq ustunlikka ega ekanini ko‘rsatadi.

Shamol energiyasi moslik indeksini hisoblashda Shamol generatorlari uchun asosiy ko‘rsatkich — shamol tezligi (WS10M). Harorat (T2M) esa havo zichligi va texnik samaradorlikka ta’sir ko‘rsatadi.

Shamol moslik indeksi:

$$S_{Shamol} = 0.7 * WS10M' + 0.3 *$$
$$T2M' = 0.7*0.366+0.3*0.787=0.492$$

3-Shamol moslik indeksining ko‘rsatkichi ifodalangan

№	$WS10M'$	$T2M'$	Shamol ko‘rsatkichi
1	0.366	0.787	0.492

Gibrid moslik indeksini shakllantirishda quyosh va shamol energiyalarini birlashtirgan gibrid moslik indeksi quyidagicha xsioblab topiladi:

$$S_{Gibrid} = 0.5 * S_{Quyosh} + 0.5 * S_{Shamol} = 0.5 * 0.851 + 0.5 * 492 = 0.672$$

4-jadval Gibrid indeksi ko‘rsatkichi ifodalangan

№	S_{Quyosh}	S_{Shamol}	Gibrid indeks ko‘rsatkichi
1	0.851	0.492	0.672

TOP-5 optimal hududlar

Gibrid moslik indeksi bo‘yicha eng yuqori 5 ta nuqta aniqlandi.

5-jadval

№	Kenglik (Latitude)	Uzunlik (Longitude)	S_{Quyosh}	S_{Shamol}	S_{Gibrid}
1	37.0	62.5	0.956	0.656	0.806
2	42.5	63.5	0.830	0.765	0.798
3	38.5	60.0	0.905	0.685	0.795

Bu hududlar asosan Navoiy, Buxoro va Qoraqalpog‘iston Respublikasiga to‘g‘ri keladi[14,15,16].

Mashinaviy o‘qitish modellarining natijalari quyidagilarga teng ekanligi ma‘lum bo‘ldi.

Random Forest natijalari:

$$R^2 = 0.995$$
$$MAE = 0.0079$$

XGBoost natijalari:

$$R^2 = 0.9953$$
$$MAE = 0.0063$$

Bu ko‘rsatkichlar modellar gibrid moslik indeksini juda yuqori aniqlikda bashoratlay olishini isbotlaydi[17].

Muhokama

Ushbu tadqiqot natijalari O‘zbekiston hududida qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirish masalasida iqlimiy omillarni kompleks baholash zarurligini yana bir bor tasdiqlaydi. An’anaviy yondashuvlarda ko‘pincha faqat quyosh yoki faqat shamol resurslariga alohida e’tibor qaratilgan bo‘lsa, ushbu ishda taklif etilgan gibrid yondashuv har ikkala manbaning birgalikdagi ta’sirini hisobga olishi bilan ajralib turadi. Bu esa hudud tanlashda yanada barqaror va ishonchli qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, Global Horizontal Irradiance (GHI – gorizontal yuzaga tushuvchi umumiy quyosh nurlanishi) va Direct Normal Irradiance (DNI – quyosh nurlarining to‘g‘ridan-to‘g‘ri normal tushishi) ko‘rsatkichlari respublikaning markaziy va janubi-g‘arbiy hududlarida yuqori qiymatlarga ega. Ayniqsa, Navoiy va Buxoro viloyatlari hududlarida ushbu parametrlarning yuqori bo‘lishi quyosh fotoelektr stansiyalarini joylashtirish uchun katta salohiyat mavjudligini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, shamol

© E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

tezligi (WS10M – 10 metr balandlikdagi shamol tezligi) ko‘rsatkichlari Qoraqalpog‘iston Respublikasi va respublikaning g‘arbiy qismida nisbatan yuqori bo‘lib, bu hududlarda shamol energetikasini rivojlantirish maqsadga muvofiqligini anglatadi. Quyosh va shamol moslik indekslari alohida hisoblanganda, ayrim hududlar faqat bitta energiya manbasi bo‘yicha yuqori bahoga ega ekani kuzatildi. Biroq gibrid moslik indeksini shakllantirish natijasida bunday hududlarning ustunligi ma’lum darajada muvozanatlashdi. Bu holat shuni ko‘rsatadiki, faqat bitta resursga tayanish energetik tizimning barqarorligini pasaytirishi mumkin, holbuki gibrid yondashuv turli ob-havo sharoitlarida energiya ishlab chiqarishni muvozanatlashtiradi. Mashinaliy o‘qitish modellarining natijalari ham taklif etilgan yondashuvning samaradorligini tasdiqladi. Random Forest algoritmi uchun aniqlangan yuqori R^2 qiymati (0.995) va past MAE (0.0079) modeli gibrid moslik indeksini juda yuqori aniqlikda bashoratlay olishini ko‘rsatadi. Xuddi shuningdek, XGBoost modelining natijalari ham ($R^2 = 0.9953$, MAE = 0.0063) ushbu algoritm murakkab nolinear bog‘lanishlarni samarali o‘rganishini isbotlaydi. Bu holat mashinaviy o‘qitish metodlari qayta tiklanuvchi energiya resurslarini baholashda an’anaviy statistik yondashuvlarga nisbatan ustun ekanini ko‘rsatadi. Viloyatlar kesimida optimal nuqtalarni aniqlash natijalari hududiy rejalashtirish uchun muhim amaliy ahamiyatga ega. Har bir viloyat uchun alohida tavsiya etilgan nuqtaning mavjudligi energetika loyihalarini markazlashmagan holda, hududlarning tabiiy xususiyatlarini inobatga olgan holda rivojlantirish imkonini beradi. Bu esa energetik infratuzilmaning hududiy teng rivojlanishiga xizmat qiladi. Shuningdek, tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, taklif etilgan intellektual tavsiya tizimi nafaqat hozirgi holatni baholash, balki kelgusida yangi iqlimiy yoki geografik parametrlar qo‘shilishi hisobiga kengaytirilishi mumkin. Masalan, balandlik (elevation), qiyalik (slope), yer qoplamasi turi va elektr uzatish tarmoqlariga masofa kabi omillar kiritilishi modelning aniqligini yanada oshiradi. Umuman olganda, olingan natijalar O‘zbekiston hududida qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirishda mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimidan foydalanish ilmiy va amaliy jihatdan asosli ekanini ko‘rsatadi. Ushbu yondashuv energetik rejalashtirish jarayonlarini avtomatlashtirish, xatoliklarni kamaytirish va investitsiya qarorlarini yanada puxta asoslash imkonini beradi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda O‘zbekiston hududida qayta tiklanuvchi energiya obyektlarini joylashtirish masalasini hal etish uchun mashinaviy o‘qitishga asoslangan gibrid modelli intellektual tavsiya tizimi ishlab chiqildi va sinovdan o‘tkazildi. Tadqiqot doirasida NASA POWER ochiq manbali ma’lumotlari asosida respublika hududi bo‘yicha ko‘p nuqtali (grid) iqlimiy ma’lumotlar shakllantirildi hamda ular asosida quyosh va shamol energetik salohiyatini tavsiflovchi asosiy parametrlar aniqlandi. Global Horizontal Irradiance (GHI – gorizontal yuzaga tushuvchi umumiy quyosh nurlanishi), Direct Normal Irradiance (DNI – quyosh nurlarining to‘g‘ridan-to‘g‘ri normal tushishi), Wind Speed at 10 m (WS10M – 10 metr balandlikdagi shamol tezligi) va 2-meter Air Temperature (T2M – 2 metr balandlikdagi havo harorati) parametrlaridan foydalanib, quyosh moslik indeksi, shamol moslik indeksi hamda ularning kombinatsiyasi asosida gibrid moslik indeksi hisoblandi. Ushbu yondashuv qayta tiklanuvchi energiya manbalarining hududiy imkoniyatlarini kompleks baholashga imkon berdi. Mashinaliy o‘qitish modellaridan Random Forest va XGBoost algoritmlaridan foydalanish orqali gibrid moslik indeksini bashorat qilish masalasi ko‘rib chiqildi. Olingan natijalar har ikkala model ham yuqori aniqlikka ega ekanini ko‘rsatdi ($R^2 \approx 0.995$), bu esa taklif etilgan metodologiyaning ishonchliligini tasdiqlaydi. Bundan tashqari, feature importance (xususiyatlarning muhimligi) tahlili havo harorati va shamol tezligi parametrlarining gibrid moslik indeksiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini aniqladi. Tadqiqot natijasida O‘zbekiston hududi bo‘yicha eng yuqori moslikka ega bo‘lgan nuqtalar aniqlandi hamda viloyatlar kesimida optimal joylashuv nuqtalari tavsiya etildi. Bu natijalar respublika miqyosida qayta tiklanuvchi energiya loyihalarini rejalashtirishda muhim qarorlarni qabul qilish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi. Umuman olganda, ushbu tadqiqot mashinaviy o‘qitish texnologiyalarini qayta tiklanuvchi energiya sohasiga integratsiya qilishning yuqori samaradorligini ko‘rsatadi va O‘zbekiston sharoitida energetik tizimni barqaror

© E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov

rivojlantirishga xizmat qiluvchi muhim ilmiy-amaliy natijalarni taqdim etadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati

1. Breiman L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, No.1. – P. 5–32.
2. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD Conference. – 2016. – P. 785–794.
3. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project. – 2024. – URL: https://power.larc.nasa.gov
4. Ahmad T., Zhang D., Huang C. Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 289. – P. 125834.
5. Bhattacharyya S.C. Energy economics: Concepts, issues, markets and governance. – Springer, 2019. – 410 p.
6. Foley A.M., Leahy P.G., Li K. A long-term analysis of wind power potential in Ireland // Renewable Energy. – 2012. – Vol. 38, No.1. – P. 1–11.
7. Gielen D., Boshell F., Saygin D. The role of renewable energy in the global energy transformation // Energy Strategy Reviews. – 2019. – Vol. 24. – P. 38–50.
8. Li X., Cheng C., Li Y. GIS-based assessment of wind and solar energy potential in China // Energy. – 2019. – Vol. 174. – P. 926–937.
9. Lund H., Østergaard P.A., Connolly D. Smart energy and smart energy systems // Energy. – 2017. – Vol. 137. – P. 556–565.
10. Wang J., Wang X. Machine learning models for predicting renewable energy generation: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 119. – P. 109596.
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. – 2nd ed. – Springer, 2009. – 745 p.
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. – MIT Press, 2016. – 775 p.
13. Zhang Y., Wang J., Wang X. Review on probabilistic forecasting of wind power generation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 255–270.
14. Alizamir M., Kim S., Zohrevand M. A hybrid machine learning approach for renewable energy site selection // Energy Reports. – 2021. – Vol. 7. – P. 5436–5449.
15. Janke J.R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado // Renewable Energy. – 2010. – Vol. 35, No.10. – P. 2228–2234.
16. Hong T., Wang P., White L. Weather data preprocessing for predicting building energy consumption using machine learning techniques // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 617–627.
17. Shahriari M., Blumsack S. GIS-based spatial analysis of renewable energy potential // Applied Energy. – 2018. – Vol. 209. – P. 379–393.

(cc) BY © E.Sh. Nazirova, A.R. Xalimjanov