

NPK sensorlarini mashinali o'qitish yordamida kalibrovka qilish va IoT asosida ozuqaviy holatni baholash

Xushmanova Hilola Aktam qizi

Stajyor o'qituvchi, Osiyo Texnologiyalar Universiteti, Qarshi sh., O'zbekiston

hilolaxushmanova@gmail.com

Annotatsiya: Azot, fosfor va kaliy o'simlik o'sishi uchun eng zarur ozuqa moddalaridir. Tuproqdagi miqdorini laboratoriyada aniqlash ishonchli natija beradi, ammo bu usul sekin va qimmat. Arzon dala sensorlari javobni darhol beradi, lekin ularning ko'rsatkichlari tuproq namligi, tuzlilik va kislotaligi (pH) ta'sirida laboratoriya qiymatlaridan chetga chiqib ketadi. Mazkur tezisda sensor ko'rsatkichlarini mashinali o'qitish yordamida laboratoriya qiymatlariga moslash (kalibrovka) va narsalar interneti (IoT) tizimlarida ozuqaviy holatni baholashga oid tadqiqotlar tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: NPK sensori, IoT, kalibrovka, XGBoost, Random Forest, CatBoost, ozuqaviy holat.

Asosiy tushunchalar

O'simlikning uch asosiy ozuqasi azot (N), fosfor (P) va kaliy (K) bo'lib, ularni qisqacha NPK deb ataymiz. Tuproqdagi miqdori mg/kg (tuproq massasiga nisbatan) yoki kg/ga (maydonga nisbatan) birliklarida o'lchanadi. Tuproq holatiga esa EC (elektr o'tkazuvchanlik, ya'ni tuzlilik ko'rsatkichi) va pH (kislotalik) ta'sir qiladi.

Arzon sensorlar odatda narsalar interneti (IoT) tizimlarida ishlaydi: sensorlar tarmoqqa ulanib, ma'lumotni masofadan yig'adi va uzatadi. Buning uchun ESP32 mikrokontrolleri, sensor bilan ulanishni ta'minlovchi RS485 interfeysi va ma'lumotni bulutga jo'natuvchi MQTT protokoli kabi texnologiyalar ishlatiladi.

Sensor ko'rsatkichini aniq qiymatga moslash jarayoni kalibrovka deyiladi. Bu ishda aniq qiymat (etalon) sifatida Hindistondagi Soil Health Card (SHC, tuproq salomatligi kartasi) dasturi doirasida bajariladigan standart laboratoriya tahlili olingan.

Kalibrovka mashinali o'qitish (ML) yordamida amalga oshiriladi, ya'ni kompyuter ma'lumotlardagi qonuniyatni o'zi topib, bashorat qiladi. Ishda bir nechta algoritm uchraydi: XGBoost ko'plab oddiy qaror daraxtlarini ketma-ket quradi va har biri oldingisining xatosini tuzatadi; Random Forest ko'p daraxtlarning ovozi bilan natija chiqaradi; CatBoost kategoriyali ma'lumotlar bilan yaxshi ishlaydigan boosting usulidir; SVM va SVR tayanch vektorlar usuliga asoslanadi, RF+SVM esa Random Forest bilan SVM ning birlashmasidir.

Model sifati R^2 bilan baholanadi: u 1 ga qanchalik yaqin bo'lsa, model laboratoriya qiymatlarini shunchalik yaxshi takrorlaydi. RMSE va MAE (o'rtacha kvadratik xato, o'rtacha mutlaq xato) esa bashorat bilan haqiqiy qiymat orasidagi o'rtacha farqni ko'rsatadi, ular qancha kichik bo'lsa, shuncha yaxshi. Modelning barqarorligini kross-validatsiya orqali tekshiriladi: ma'lumotlar bir necha qismga bo'linib, navbatma-navbat bittasi tekshiruv uchun ajratiladi.

1. Muammo

Har bir ozuqaning o'simlikdagi vazifasi alohida. Azot barg va poyaning o'sishini hamda xlorofill hosil bo'lishini ta'minlaydi, fosfor ildiz rivojiga yordam beradi, kaliy esa o'simlikning suv rejimi va fermentlar faolligiga javob beradi [1, 11]. Shu sababli ozuqa yetishmasa, hosil kamayadi. Lekin ko'proq o'g'it solish ham yechim emas: ortiqcha o'g'it xarajatni oshiradi, tuproq unumdorligini pasaytiradi va atrof-muhitga zarar yetkazadi [2].

O'g'it me'yorini to'g'ri belgilash uchun avval tuproqda qancha ozuqa borligini bilish kerak. Buning eng aniq yo'li — laboratoriya tahlili. Biroq namunani yetkazish, tahlil qilish va natijani kutish ko'p vaqt oladi hamda qimmatga tushadi, shuning uchun bu usul dalani muntazam kuzatib borish uchun amalda yaramaydi. Hindistonda bunday tahlil Soil Health Card (SHC) dasturi doirasida standart usullar bilan bajariladi [1].

Muqobil yo'l sifatida arzon elektrokimyoviy NPK sensorlaridan foydalaniladi. ESP32 kabi mikrokontrollerlar bilan birga ular ma'lumotni real vaqtda beradi [6, 8]. Ammo bu yerda katta muammo bor: sensor javobi faqat ozuqa miqdoriga emas, tuproq namligi, tuzliligi (EC), pH, harorati va tarkibiga ham bog'liq. Demak, sensorning xom ko'rsatkichini laboratoriya natijasi deb qabul qilib bo'lmaydi [1, 7, 9]. Bunga yana bir narsa qo'shiladi: hatto bir xil turdagi arzon sensorlar ham bir-biridan sezilarli farq qilishi mumkin [10].

Shu sababli tezisning maqsadi — ML yordamida arzon sensor ko'rsatkichlarini laboratoriya darajasiga yaqinlashtirish usullarini va ularning cheklovlarini tushunarli tarzda ko'rsatib berishdir.

2. Material va usullar

Tezis yangi eksperimentga emas, nashr etilgan ishlar tahliliga asoslangan. Manbalardagi raqamlar o'zgartirilmagan holda keltirilgan.

Asosiy ish [1]. Mualliflar Hindistonning Karnataka shtatidagi Dharwad tumanidan 150 ta tuproq namunasi yig'ishgan. Namunalar uch xil relyefli zonadan, ya'ni yuqori (upland), o'rta (midland) va past (lowland) joylardan 50 tadan, 0–20 sm qatlamdan olingan. Har bir namunani yetti ko'rsatkichli elektrokimyoviy sensor (N, P, K, pH, EC, namlik, harorat) ESP32 va RS485 orqali o'lchagan. Shu namunalarning o'zi vakolatli laboratoriyada SHC standarti bo'yicha ham tahlil qilingan. Sensor natijani mg/kg da, laboratoriya esa kg/ga da beradi, shuning uchun birliklar 2,24 koeffitsiyent yordamida moslashtirilgan.

ML modeli [1]. Kalibrovka uchun MultiOutput XGBoost ishlatilgan. Bunda azot, fosfor va kaliy uchun alohida, lekin bir xil sozlamali uchta XGBoost modeli bir xil kirish ma'lumotlari bilan o'qitilgan. Kirishga pH va EC ning ko'paytmasi ($\text{pH} \times \text{EC}$) ham qo'shilgan, chunki bu ikki omil sensor javobiga birgalikda ta'sir qiladi.

Baholash [1]. Ma'lumotlar 80/20 nisbatda bo'lingan: 120 ta namuna o'qitish uchun, qolgan 30 tasi mustaqil test uchun ajratilgan. O'qitish paytida 5 qatlamli kross-validatsiya qo'llangan, sifat esa R^2 , RMSE va MAE bilan o'lchangan.

IoT tizimi [2]. Boshqa bir ishda NPK (JXBS-3001), tuproq namligi (FC-28) va harorat/havo namligi (DHT11) sensorlari NodeMCU mikrokontrolleri va MQTT protokoli orqali buluttga ulangan. Ekin tavsiyasi uchun CatBoost (22 ekin turi bo'yicha 2299 yozuvli ma'lumotlar bilan), o'g'it tavsiyasi uchun esa GridSearchCV yordamida sozlangan Random Forest (152 yozuv) ishlatilgan.

Suv sifati ishi [3]. Yana bir tadqiqotda IoT sensorlaridan olingan ma'lumotlar asosida 7 ta klassifikator, jumladan RF+SVM ansambli o'zaro solishtirilgan.

Asosiy tushunchalar uchun klassik manbalarga, ya'ni XGBoost [4] va Random Forest [5] ishlariga tayanilgan.

3. Asosiy natijalar

1-jadval. Tadqiqot ishlarining tahliliy natijasi

№	Ko'rsatkich	Natija	Izoh
1	Kalibrovka aniqligi [1], R^2 (mustaqil test)	Azot: 0,916; fosfor: 0,887; kaliy: 0,903	Fosfor uchun R^2 eng past
2	Kalibrovka xatosi [1], RMSE (kg/ga)	Azot: 27,11; fosfor: 4,01; kaliy: 22,84	Fosfordagi xato kichik ko'rinadi, chunki tuproqda fosfor miqdori o'zi kam; bu uning aniqroq baholanganini bildirmaydi
3	Hududlar bo'yicha	Yuqori relyef: 0,921; o'rta:	Natija zonaga kuchli bog'liq

	barqarorlik [1], azot uchun R^2	0,928; past: 0,899	emas
4	pH×EC xususiyatining ta'siri [1], R^2 (ablyatsiya)	Xususiyatsiz: 0,903; xususiyat bilan: 0,916	Qo'shilishi aniqlikni oshirgan
5	Algoritmlar taqqosi [1], o'rtacha R^2	XGBoost: 0,902; Random Forest: 0,881; SVR: 0,877; qaror daraxti: 0,841; chiziqli regressiya: 0,766	Tanlangan XGBoost eng yaxshi chiqqan
6	IoT tavsiya tizimi [2], aniqlik	Ekin tavsiyasi (CatBoost): 97,5%; o'g'it tavsiyasi (Random Forest): 99,56%	Asosan ochiq (Kaggle) ma'lumotlarga tayangan, real dalada qayta tekshirish kerak
7	Ansambl usulining foydasi [3], suv sifati ishida aniqlik	RF+SVM: 90,99%; yakka Random Forest: 90,4%; yakka SVM: 55%	RF+SVM va Random Forest farqi 1 foizdan kam

4. Amaliy ahamiyati va cheklovlar

Kalibrovka sensor birliklarini va xatosini laboratoriya talabiga moslaydi. Natijada takroriy laboratoriya tahlilini kutmasdan, o'g'itlash bo'yicha qarorni tezroq qabul qilish mumkin. Model oldindan o'qitiladi va bitta namuna uchun bashorat millisekundlarda bajariladi, shuning uchun uni IoT tizimlariga qo'shish qiyin emas [1].

Shunga qaramay, natijalarni ehtiyotkorlik bilan baholash lozim. Avvalo, ular bitta hududga va atigi 30 ta test namunasiga tegishli. Bundan tashqari, sensorning vaqt o'tishi bilan siljishi (drift, ya'ni elektrodning eskirishi va atrof-muhit ta'siridan ko'rsatkichning asta-sekin o'zgarishi) o'rganilmagan [1, 10]. Laboratoriya etalonining o'zida ham o'lchov

xatosi bor. Sho'rlangan tuproqlarda esa EC sensor ko'rsatkichiga kuchli ta'sir qilishi mumkin, shuning uchun bunday hududlar uchun mahalliy kalibrovka zarur [7, 9].

5. Xulosa

Oddiy qilib aytganda, arzon sensor «taxminiy o'lchagich», ML esa uni laboratoriya «etaloniga» moslab beradigan tuzatish vositasidir. Tahlil qilingan ishda bu yondashuv sensor ko'rsatkichlarini laboratoriya natijalariga ancha yaqinlashtirgan ($R^2 \approx 0,89-0,92$). Yondashuvni kengroq joriy etish uchun yana bir necha qadam kerak: ko'proq hudud va namunalarda tekshirish, sensor driftini hisobga olish, sho'rlangan tuproqlar uchun alohida kalibrovka qilish va ML natijalarini sodda tushuntirish vositalari bilan birga taqdim etish [10, 11].

Adabiyotlar:

1. Kabbur A.M., Pawar P. Real-time soil nutrient estimation using low-cost NPK sensors and soil-aware machine learning calibration. Smart Agricultural Technology, 15 (2026) 102582.
2. Islam M.R., Oliullah K., Kabir M.M., Alom M., Mridha M.F. Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. Journal of Agriculture and Food Research, 14 (2023) 100880.
3. Mahapatro P.K., Panigrahi R., Padhy N. Integrated Internet of Things and Artificial Intelligence System for Real-Time Multi-Nutrient Water Quality Analysis in Agriculture. Engineering Proceedings, 82, 72 (2024).
4. Chen T., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system. Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016, pp. 785–794. [klassik manba]
5. Breiman L. Random forests. Machine Learning, 45 (2001) 5–32. [klassik manba]

6. Dattatreya S., Khan A.N., Jena K., Chatterjee G. Conventional to modern methods of soil NPK sensing: a review. *IEEE Sensors Journal*, 24 (3), 2024, 2367–2380.
7. Alhadchiti A., Nikolic B., Ioakim P., Powner M.B., Triantis I.F. Identification and analysis of key factors limiting the performance of electrical soil sensors: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237 (2025) 110480.
8. Khaydukova M., Kirsanov D., Sarkar S., Mukherjee S., Ashina J., Bhattacharyya N., Chanda S., Bandyopadhyay R., Legin A. One shot evaluation of NPK in soils by «electronic tongue». *Computers and Electronics in Agriculture*, 186 (2021) 106208.
9. Todd M., Gallant A.J.E., Wang A., Plucinski J., Wong V.N.L. Quantifying inter- and intra-sensor variability in low-cost soil moisture and soil temperature sensors: a comparative study. *Smart Agricultural Technology*, 12 (2025) 101186.
10. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151 (2018) 61–69.