

SUG'ORILADIGAN MAYDONLARDA TUPROQ NAMLIGINING FAZOVIIY O'ZGARUVCHANLIGINI HISOBGA OLUVCHI ROBOTOTEXNIK VA MEXATRONIK VOSITALAR ASOSIDAGI AVTOMATLASHTIRILGAN INTELLEKTUAL SUG'ORISH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH

Assistent: Xoliqov Shavkat Avazovich

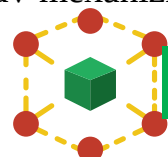
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti

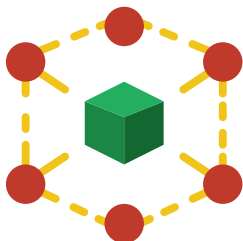
Annotatsiya. Ushbu maqolada sug'oriladigan maydonlarda tuproq namligining fazoviy o'zgaruvchanligini hisobga oluvchi robototexnik va mexatronik vositalar asosidagi avtomatlashtirilgan intellektual sug'orish tizimini ishlab chiqish masalasi tadqiq etiladi. Sug'oriladigan maydonlarda tuproq namligi, tuproqning fizik xususiyatlari, relyef, meteorologik sharoit va ekinning rivojlanish bosqichlari hudud bo'yicha bir xil bo'lmaganligi sababli butun maydonni yagona sug'orish rejimi asosida boshqarish suv resurslaridan foydalanish samaradorligini pasaytirishi mumkin. Shu sababli tadqiqotda maydonni tuproq namligi va boshqa agroekologik ko'rsatkichlarning fazoviy o'zgaruvchanligi asosida boshqaruv zonalariga ajratish masalasi ko'rib chiqiladi.

Taklif etilayotgan tizim tuproq namligi sensorlari, T-Weather agrometeorologik monitoring vositalari, GIS va masofadan zondlash ma'lumotlari, ET₀ hisoblash moduli, Arduino yoki PLC kontrolleri, suv nasosi, elektromagnit klapanlar, oqim sensorlari hamda raqamli monitoring platformasini yagona boshqaruv tizimiga birlashtiradi. Tizim tomonidan yig'ilgan ma'lumotlar asosida har bir boshqaruv zonasining joriy namlik holati va ekinning suvga bo'lgan ehtiyoji baholanadi hamda sug'orishning optimal vaqti, davomiyligi va suv miqdorini aniqlash algoritmi shakllantiriladi va hosildorlik ko'rsatkichlari, suv sarfi bo'yicha taqqoslanadi.

Tadqiqot metodikasida dastlabki zich namuna olish, GIS asosida fazoviy xaritalash, statistik va geostatistik tahlil, boshqaruv zonalarini shakllantirish hamda sensorlarni reprezentativ nuqtalarga joylashtirish bosqichlari nazarda tutiladi. Sug'orish qarorini shakllantirishda tuproq namligi, ET₀, Kc, harorat, nisbiy namlik, shamol, yog'ingarchilik va ekinning rivojlanish bosqichi kabi parametrlarni birgalikda hisobga olish taklif etiladi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi maydonning fazoviy heterojenligini sug'orish boshqaruvining asosiy parametrlaridan biri sifatida qo'llash, turli manbalardan olinadigan ma'lumotlarni yagona boshqaruv algoritmiga integratsiya qilish va shakllangan sug'orish qarorini robototexnik-mexatronik ijro qurilmalari orqali avtomatik amalga oshirishdan iborat. Sug'orishdan keyingi qayta monitoring asosida boshqaruv parametrlarini korreksiya qiluvchi yopiq konturli adaptiv boshqaruv mexanizmi





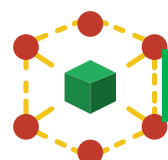
ham taklif etiladi. Mazkur yondashuv suv va energiya resurslaridan samarali foydalanish, tuproq namligini optimal diapazonda ushlab turish hamda sug'orish jarayonining avtomatlashtirish darajasini oshirish uchun istiqbolli texnologik yechim sifatida baholanadi va sug'orish samaradorligini oshirish imkoniyatini ko'rsatishini kutiladi.

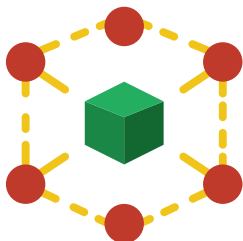
Kalit so'zlar: intellektual sug'orish, robototexnika, mexatronika, tuproq namligi, fazoviy o'zgaruvchanlik, T-Weather, ETo, GIS, IoT, avtomatik boshqaruv, aqlli sensor, suv tejamkorligi, aniq dehqonchilik.

Аннотация. В статье исследуется вопрос разработки автоматизированной интеллектуальной системы орошения на основе робототехнических и мехатронных средств с учетом пространственной изменчивости влажности почвы на орошаемых землях. Поскольку влажность почвы, ее физические свойства, рельеф, метеорологические условия и стадии развития сельскохозяйственных культур пространственно неоднородны, управление всей площадью по единому режиму орошения может снижать эффективность использования водных ресурсов. В связи с этим в исследовании рассматривается задача разделения орошаемой площади на зоны управления на основе пространственной изменчивости влажности почвы и других агроэкологических показателей.

Предлагаемая система объединяет в единую систему управления датчики влажности почвы, средства агрометеорологического мониторинга T-Weather, данные ГИС и дистанционного зондирования, модуль расчета эталонной эвапотранспирации (ETo), контроллер Arduino или PLC, водяной насос, электромагнитные клапаны, датчики расхода воды и цифровую платформу мониторинга. На основе получаемых данных оцениваются текущее состояние влажности каждой зоны управления и водопотребность сельскохозяйственной культуры, после чего формируется алгоритм определения оптимального времени, продолжительности и объема орошения. Эффективность предложенного подхода предполагается оценивать путем сравнительного анализа показателей урожайности и расхода воды.

Методика исследования предусматривает проведение предварительного плотного опробования, пространственного картирования на основе ГИС, статистического и геостатистического анализа, формирования зон управления, а также размещения датчиков в репрезентативных точках. При формировании решения об орошении предлагается комплексно учитывать такие параметры, как влажность почвы, ETo, коэффициент культуры (Kc), температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, количество осадков и стадия развития сельскохозяйственной культуры.



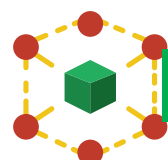


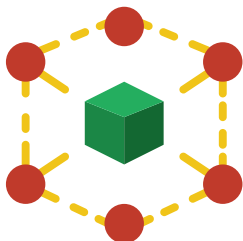
Научная новизна исследования заключается в использовании пространственной неоднородности орошаемой площади в качестве одного из основных параметров управления орошением, интеграции данных, получаемых из различных источников, в единый алгоритм управления, а также автоматической реализации сформированного решения об орошении посредством робототехнических и мехатронных исполнительных устройств. Кроме того, предлагается механизм адаптивного управления с замкнутым контуром, обеспечивающий корректировку параметров управления на основе повторного мониторинга состояния почвы после орошения. Данный подход рассматривается как перспективное технологическое решение для эффективного использования водных и энергетических ресурсов, поддержания влажности почвы в оптимальном диапазоне и повышения уровня автоматизации процесса орошения, а также предполагается, что он позволит повысить эффективность орошения.

Abstract. This article investigates the development of an automated intelligent irrigation system based on robotic and mechatronic technologies, taking into account the spatial variability of soil moisture in irrigated agricultural fields. Since soil moisture, soil physical properties, terrain characteristics, meteorological conditions, and crop growth stages are spatially heterogeneous, managing an entire field according to a uniform irrigation regime may reduce the efficiency of water resource utilization. Therefore, this study addresses the problem of dividing an irrigated field into management zones based on the spatial variability of soil moisture and other agroecological parameters.

The proposed system integrates soil moisture sensors, T-Weather agrometeorological monitoring devices, GIS and remote sensing data, an reference evapotranspiration (ET_0) calculation module, an Arduino or PLC controller, a water pump, solenoid valves, flow sensors, and a digital monitoring platform into a unified control system. Based on the collected data, the current soil moisture status and crop water requirements of each management zone are evaluated. Subsequently, an algorithm is developed to determine the optimal irrigation timing, duration, and water volume. The effectiveness of the proposed approach is expected to be evaluated through a comparative analysis of crop yield and water consumption indicators.

The research methodology includes preliminary intensive soil sampling, GIS-based spatial mapping, statistical and geostatistical analysis, delineation of management zones, and placement of sensors at representative locations. In making irrigation decisions, the proposed approach considers soil moisture, ET_0 , crop coefficient (K_c), air temperature, relative humidity, wind speed, precipitation, and crop growth stage as integrated parameters.





The scientific novelty of the study lies in considering field-scale spatial heterogeneity as one of the key parameters for irrigation management, integrating data from multiple sources into a unified decision-making algorithm, and automatically implementing irrigation decisions through robotic and mechatronic actuators. In addition, an adaptive closed-loop control mechanism is proposed to correct irrigation management parameters based on post-irrigation monitoring. This approach is considered a promising technological solution for efficient utilization of water and energy resources, maintaining soil moisture within an optimal range, and increasing the level of irrigation process automation. The proposed system is expected to improve irrigation efficiency while providing more precise and adaptive management of water resources in spatially heterogeneous agricultural fields.

Kirish Iqlim o'zgarishi, havo haroratining ortishi, qurg'oqchilik hodisalarining kuchayishi va qishloq xo'jaligida suvga bo'lgan talabning ortib borishi sug'orish suvlaridan samarali foydalanishni zamonaviy qishloq xo'jaligining muhim vazifalaridan biriga aylantirmoqda. Ayniqsa, issiq va qurg'oqchil hududlarda ekinlarning vegetatsiya davrida suvga bo'lgan ehtiyojining ortishi sug'orish jarayonini aniq monitoring qilish va ilmiy asoslangan boshqaruv qarorlarini qabul qilishni talab etadi.

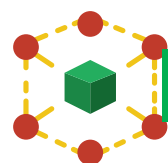
An'anaviy sug'orish tizimlarida suv berish vaqti ko'pincha oldindan belgilangan grafik, operator tajribasi yoki umumiy agrotexnik tavsiyalar asosida aniqlanadi. Bunday yondashuvda maydonning turli qismlaridagi tuproq namligi, tuproqning suv ushlab turish xususiyati, relyef, bug'lanish intensivligi va ekinning rivojlanish holatidagi farqlar to'liq hisobga olinmasligi mumkin. Sug'oriladigan maydonlarda tuproq namligining fazoviy o'zgaruvchanligi sug'orish qarorlarini individuallashtirish uchun muhim ko'rsatkich hisoblanadi. So'nggi xalqaro tadqiqotlarda tuproq namligi sensorlarini joylashtirish masalasining fazoviy o'zgaruvchanlik bilan bevosita bog'liqligi ko'rsatilgan. 2025-yilda chop etilgan tadqiqotlarda sensorlarning reprezentativ joylashuvini aniqlash uchun fazoviy tahlil va optimallashtirish usullaridan foydalanilgan.

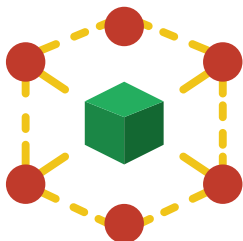
2026-yilgi tadqiqotlarda esa tuproq xususiyatlari, relyef va gidroiqlim ma'lumotlarini masofadan zondlash hamda mashinali o'qitish usullari bilan birlashtirish orqali boshqaruv zonalarini aniqlash va sensorlarning nomzod joylarini belgilash yondashuvi taklif qilingan.

Shu bilan birga, IoT texnologiyalari, tuproq namligi sensorlari va avtomatik klapanlarning rivojlanishi sug'orish jarayonini real vaqt rejimida boshqarish imkoniyatini kengaytirmoqda. Robototexnik va mexatronik vositalarning ushbu jarayonga integratsiya qilinishi esa ma'lumotlarni faqat monitoring qilish bilan cheklanmasdan, qabul qilingan qarorni fizik ijro mexanizmlari orqali avtomatik amalga oshirish imkonini beradi.

Shundan kelib chiqib, mazkur tadqiqotda **“o'lchash → tahlil qilish → qaror qabul qilish → avtomatik ijro → qayta o'lchash”** tamoyiliga asoslangan intellektual sug'orish tizimini ishlab chiqish taklif etiladi.

Tadqiqot maqsadi





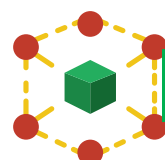
Tadqiqotning asosiy maqsadi sugʻoriladigan maydonlarda tuproq namligining fazoviy oʻzgaruvchanligini aniqlash va uning asosida boshqaruv zonalarini shakllantiruvchi, meteorologik va agroekologik maʼlumotlarni qayta ishlovchi hamda sugʻorish jarayonini robototexnik va mexatronik vositalar yordamida avtomatik boshqaruvchi intellektual tizimni ishlab chiqishdan iborat. Shu sababli issiq va qurgʻoqchil sharoitga moslashtirilgan, tuproq va meteorologik maʼlumotlarni uzluksiz tahlil qiluvchi hamda sugʻorish parametrlarini avtomatik optimallashtiruvchi intellektual tizimni ishlab chiqish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb hisoblanadi.

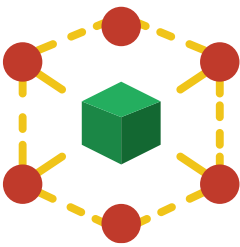
Tadqiqotning maqsadi va vazifalari. Ushbu maqsadga erishish uchun sugʻoriladigan maydonda tuproq namligining fazoviy oʻzgaruvchanligini aniqlash, tuproq namligi va boshqa agroekologik koʻrsatkichlar asosida boshqaruv zonalarini shakllantirish, tuproq namligi sensorlarining reprezentativ joylashuvini belgilash, T-Weather agrometeorologik monitoring maʼlumotlarini sugʻorish tizimiga integratsiya qilish, ET_0 va K_c koʻrsatkichlari asosida ekinning suvga boʻlgan ehtiyojini baholash, sugʻorish qarorini shakllantiruvchi koʻp parametrlı algoritmi ishlab chiqish, Arduino yoki PLC kontrolleri, suv nasosi, elektromagnit klapanlar va oqim sensorlarini yagona mexatronik boshqaruv moduliga birlashtirish, sugʻorishdan keyingi qayta monitoring natijalari asosida boshqaruv parametrlarini korreksiya qiluvchi yopiq konturli adaptiv boshqaruv mexanizmini ishlab chiqish hamda taklif etilayotgan tizimning samaradorligini suv sarfi, energiya isteʼmoli, tuproq namligi barqarorligi va hosildorlik koʻrsatkichlari asosida baholash vazifalari belgilandi.

Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi:

1. Sugʻoriladigan maydonda tuproq namligining fazoviy oʻzgaruvchanligini aniqlash.
2. Tuproq namligi va boshqa agroekologik koʻrsatkichlar asosida boshqaruv zonalarini shakllantirish.
3. Tuproq namligi sensorlarining reprezentativ joylashuvini aniqlash.
4. T-Weather agrometeorologik maʼlumotlarini sugʻorish tizimiga integratsiya qilish.
5. ET_0 va K_c asosida ekinning suvga boʻlgan ehtiyojini baholash.
6. Sugʻorish qarorini shakllantiruvchi koʻp parametrlı algoritmi ishlab chiqish.
7. Arduino/PLC, nasos, elektromagnit klapan va oqim sensorlarini yagona mexatronik boshqaruv moduliga birlashtirish.
8. Sugʻorishdan keyingi qayta monitoring asosida boshqaruv parametrlarini korreksiya qiluvchi yopiq konturli boshqaruvni ishlab chiqish.
9. Taklif etilayotgan tizimni suv sarfi, energiya isteʼmoli, tuproq namligi barqarorligi va hosildorlik koʻrsatkichlari boʻyicha baholash.

Tadqiqot metodologiyasi





Tadqiqotning metodologik asosi tuproq namligi, meteorologik ma'lumotlar, GIS, masofadan zondlash, evapotranspiratsiya hisoblari va avtomatik boshqaruv texnologiyalarini yagona tizimga integratsiya qilishga asoslanadi.

Tadqiqot quyidagi ketma-ketlikda amalga oshiriladi:

.maydon bo'yicha dastlabki tuproq namligi o'lchovlarini amalga oshirish.

Tuproqning mexanik tarkibi, relyefi va boshqa fizik xususiyatlarini aniqlash.

.GIS va masofadan zondlash ma'lumotlari asosida fazoviy xaritalarni shakllantirish.

.statistik va geostatistik tahlil yordamida tuproq namligining fazoviy o'zgaruvchanligini baholash.

. maydonni boshqaruv zonalariga ajratish.

. har bir zona uchun reprezentativ monitoring nuqtalarini aniqlash.

. doimiy tuproq namligi sensorlarini o'rnatish.

. T-Weather va boshqa meteorologik ma'lumotlarni tizimga uzatish.

. ET_0 va K_c asosida suv talabini hisoblash.

. sug'orish qarorini avtomatik shakllantirish.

. mexatronik ijro mexanizmlari orqali suv berishni boshqarish.

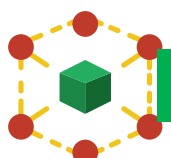
.sug'orishdan keyingi tuproq namligini qayta o'lchash va keyingi qarorni korreksiya qilish.

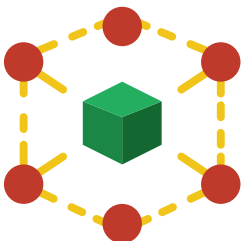
Taklif etilayotgan intellektual sug'orish tizimining umumiy strukturaviy tuzilishi 1-rasmda keltirilgan. Tizim tuproq namligi sensorlari, agrometeorologik monitoring vositalari, GIS va masofadan zondlash ma'lumotlari, ET_0 hisoblash moduli, Arduino/PLC kontrolleri hamda mexatronik ijro qurilmalarini yagona boshqaruv konturiga birlashtiradi.

1-rasm. Intellektual sug'orish tizimining umumiy strukturaviy sxemasi



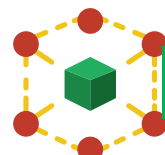
Tadqiqot metodologiyasi → umumiy izoh → 1-rasm → metodologik bosqichlar → 1-jadvalda

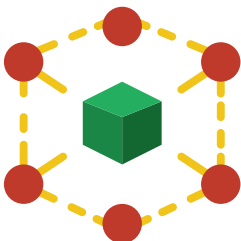




Intellectual sug'orish tizimining asosiy funksional elementlari

No	Tizim elementi	O'lchanadigan/boshqariladigan parametr	Asosiy vazifasi
1	Tuproq namligi sensori	Tuproq namligi, θ	Ildiz zonasidagi haqiqiy namlikni aniqlash
2	T-Weather	T, RH, P, W, yog'ingarchilik	Agrometeorologik holatni monitoring qilish
3	Sentinel-2/dron	NDVI va boshqa vegetatsion ko'rsatkichlar	Maydonning fazoviy holatini aniqlash
4	GIS moduli	Koordinata, relyef, zonalar	Boshqaruv zonalarini shakllantirish
5	ET _o hisoblash moduli	ET _o	Atmosferaning suvga bo'lgan talabini baholash
6	Arduino/PLC	Sensor va boshqaruv signallari	Ma'lumotlarni qayta ishlash va ijro
7	Elektromagnit klapan	Suv oqimi	Har bir zonani mustaqil boshqarish
8	Nasos agregati	Suv berish	Sug'orish suvini uzatish
9	Oqim sensori	Suv sarfi	Amaldagi suv miqdorini nazorat qilish





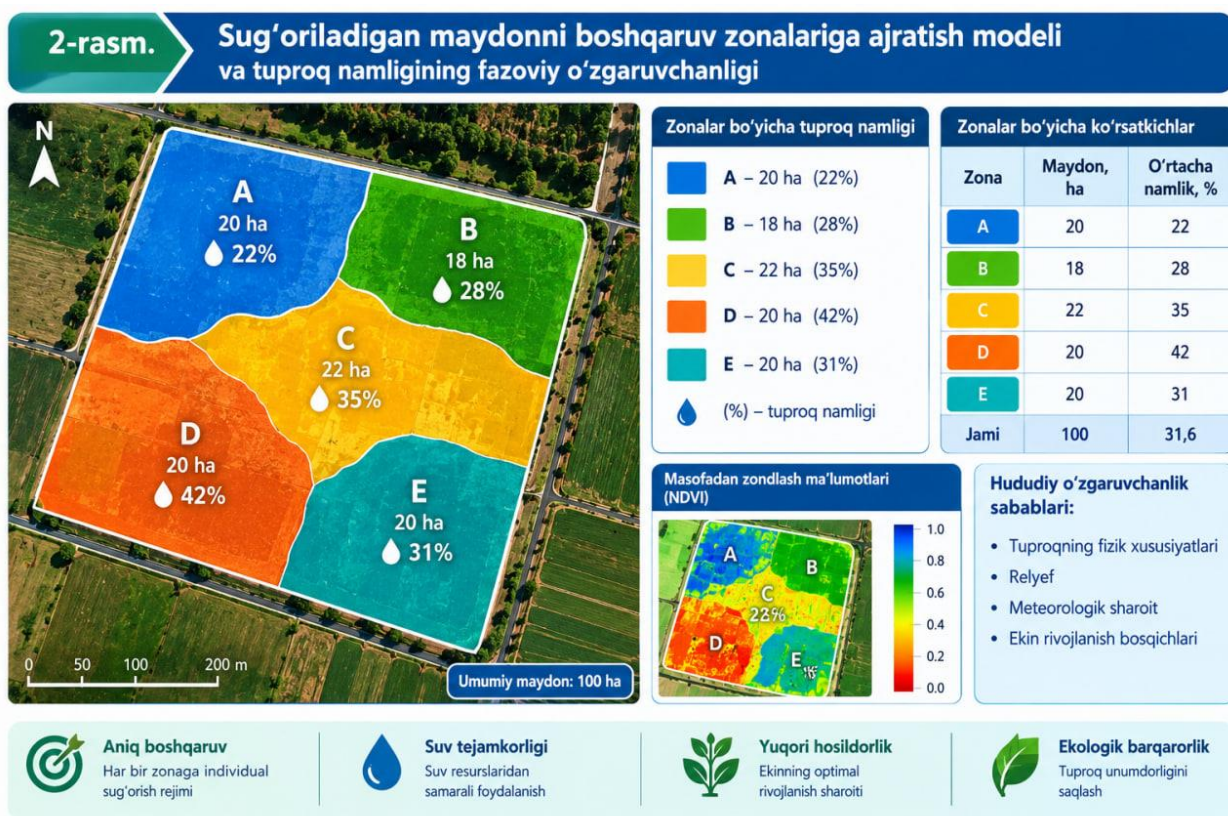
10	Raqamli platforma	Barcha ma'lumotlar	Monitoring, saqlash va masofadan boshqarish
----	-------------------	--------------------	---

Maydonni boshqaruv zonalariga ajratish

Tizimning muhim ilmiy komponenti maydonni bir xil boshqaruv obyekti sifatida emas, balki tuproq namligi va agroekologik xususiyatlariga ko'ra farqlanuvchi boshqaruv zonalar majmuasi sifatida qarashdan iborat.

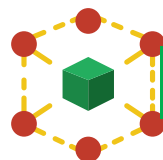
Boshqaruv zonalarini shakllantirishda tuproq namligi, tuproq mexanik tarkibi, relyef, NDVI, ekin rivojlanishi va meteorologik ko'rsatkichlardan foydalanish mumkin.

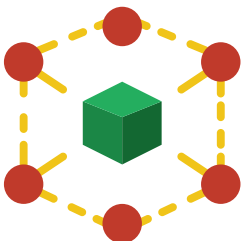
Tuproq namligi, meteorologik, masofadan zondlash va hisoblash ma'lumotlarining boshqaruv qaroriga aylanishi hamda mexatronik ijro qurilmalari orqali amalga oshirilishi 2-rasmda bosqichma-bosqich ko'rsatilgan.



2-jadval.

100 gektarlik maydon uchun namunaviy boshqaruv zonalar





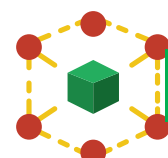
Zona	Maydon, ga	Tuproq namligi holati	ET ₀ holati	Namunaviy boshqaruv qarori
A	20	Past	Yuqori	Ustuvor sugʻorish
B	25	Chegaraviy	Oʻrtacha	Qisqa muddatli monitoring
C	15	Optimal	Oʻrtacha	Sugʻorishni kechiktirish
D	20	Past	Yuqori	Sugʻorish
E	20	Optimal	Past/oʻrtacha	Sugʻorishni amalga oshirmaslik
Jami	100	—	—	Zonal boshqaruv

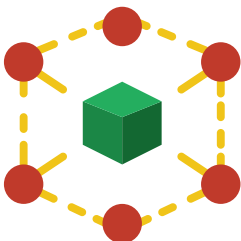
Sensornlarni joylashtirish metodikasi

Sensornlarni faqat maydon yuzasiga teng masofada joylashtirish tuproq namligining haqiqiy fazoviy oʻzgaruvchanligini yetarli darajada ifodalamasligi mumkin. Shu sababli sensornlarni joylashtirishdan oldin dastlabki zich namuna olish va fazoviy tahlilni amalga oshirish taklif etiladi.

2025-yilgi xalqaro tadqiqotlarda uchta mevali bogʻdagi 100 ta namuna nuqtasi asosida sensornlarning reprezentativ joylashuvi baholangan. Ayrim tadqiqot sharoitlarida beshta nuqta dala oʻrtacha namligini taxminan 2% RMSE bilan, oʻnta nuqta esa taxminan 1% RMSE bilan ifodalagan. Shu bilan birga, maydonning heterojenligi yuqori boʻlgan sharoitlarda sensornlar zichligini oshirish zarurligi qayd etilgan.

Boshqa tadqiqotlarda makkajoʻxori maydonlarida sensor joylashuvi fazoviy assotsiatsiya asosida optimallashtirilgan.





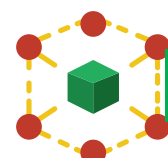
3-rasm. Sensorlar va mexatronika qurilmalarining dalada joylashish sxemasi

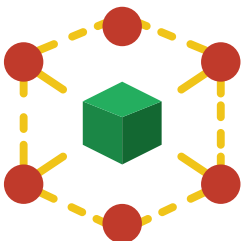


3-jadval.

Sensorlarni joylashtirishning taklif etilayotgan bosqichlari

Bosqich	Amal	Maqsad
1	Dastlabki zich namuna olish	Tuproq namligining fazoviy xaritasini tuzish
2	Tuproq va relyef ma'lumotlarini yig'ish	Fazoviy farqlarni aniqlash
3	GIS asosida xaritalash	Bir xil xususiyatli hududlarni ajratish
4	Statistik/geostatistik tahlil	Reprezentativ nuqtalarni aniqlash
5	Boshqaruv zonalarini shakllantirish	Zonal sug'orishni tashkil qilish
6	Doimiy sensorlarni o'rnatish	Real vaqt monitoringini yo'lga qo'yish





7	Qayta tekshirish	Sensornlarning representativligini baholash
---	------------------	---

Tadqiqotning dastlabki metodik bosqichida 100 gektarlik namunaviy maydon uchun 5 ta boshqaruv zonasi va har bir zonada kamida 2 ta monitoring nuqtasidan boshlash mumkin. Biroq yakuniy sensorlar soni dastlabki dala o'lchovlari va fazoviy statistik tahlil natijalariga ko'ra aniqlanadi.

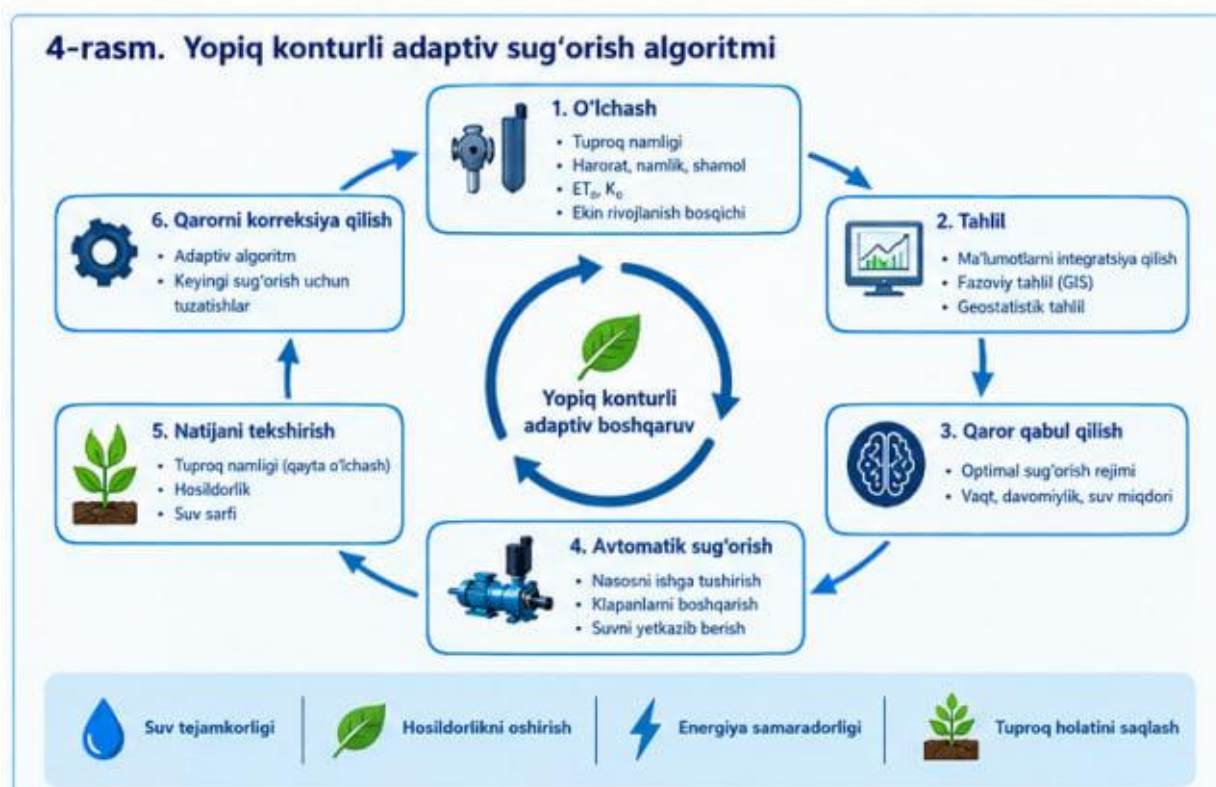
Robototexnik va mexatronik boshqaruv

Tizimning mexatronik qismi sensorlardan olingan ma'lumotlarni fizik harakatga aylantiradi. Bunda kontroller tomonidan ishlab chiqilgan boshqaruv signali rele yoki aktuator orqali elektromagnit klapaniga, zarur hollarda esa nasos agregatiga uzatiladi.

Tizimning umumiy texnologik ketma-ketligi quyidagicha:

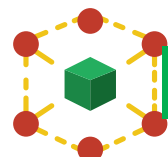
Tuproq sensori → Arduino/PLC → boshqaruv algoritmi → rele/aktuator → elektromagnit klapan → nasos → suv berish → oqim sensori → qayta monitoring

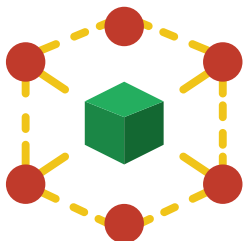
Robototexnik xususiyat esa ma'lumotlarni avtomatik tahlil qilish, qaror shakllantirish va fizik ijroni insonning doimiy aralashuvisiz amalga oshirish imkoniyati bilan ifodalanadi.



4-jadval.

Robototexnik-mexatronik modulning boshqaruv ketma-ketligi





Bosqich	Kiruvchi ma'lumot	Qabul qilinadigan qaror	Ijro mexanizmi
1	Tuproq namligi	Namlik yetarlimi?	Sensor
2	T-Weather	Atmosfera suv talabi qanday?	Meteorologik modul
3	ET ₀ va K _c	Ekinning suv talabi qancha?	Hisoblash algoritmi
4	Zona xaritasi	Qaysi zona sug'oriladi?	GIS/raqamli modul
5	Suv me'yori	Qancha suv beriladi?	Boshqaruv algoritmi
6	Sug'orish buyrug'i	Klapanni ochish/yopish	Elektromagnit aktuator
7	Oqim nazorati	Haqiqiy suv miqdori qancha?	Flow sensor
8	Qayta o'lchash	Keyingi qarorni tuzatish	Feedback

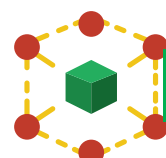
Sug'orish qarorini shakllantirish modeli

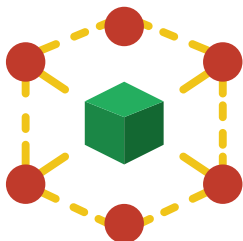
Sug'orish qarorini faqat bitta tuproq namligi chegarasiga bog'lash o'rniga ko'p parametrlı modeldan foydalanish taklif qilinadi:

$$I_i = f(\theta_i, ET_0, K_c, P, T, RH, W, S, Z_i)$$

Bu yerda:

- I_i — i-zonaga sug'orish qarori;
- θ_i — i-zonadagi tuproq namligi;
- ET_0 — referens evapotranspiratsiya;
- K_c — ekin koeffitsiyenti;
- P — yog'ingarchilik;
- T — havo harorati;
- RH — nisbiy namlik;





- **W** — shamol tezligi;
- **S** — o‘simlikning rivojlanish bosqichi;
- **Z_i** — i-zonaning fazoviy xususiyatlari.

Ekinning suvga bo‘lgan talabini baholashda FAO-56 metodikasi nazariy asos sifatida qabul qilinadi.

Umumiy holda ekin evapotranspiratsiyasi:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

munosabat orqali aniqlanishi mumkin.

Bunda sug‘orish qarori faqat ET_0 yoki faqat tuproq namligiga emas, balki ularning o‘zaro bog‘liqligiga asoslanadi.

9. Tajriba metodikasi

Taklif etilayotgan tizimning samaradorligini aniqlash uchun nazorat va tajriba variantlaridan foydalanish rejalashtiriladi.

Tajriba variantlari

V0 — an’anaviy boshqaruv: sug‘orish oldindan belgilangan agrotexnik grafik asosida amalga oshiriladi.

V1 — sensorli boshqaruv: sug‘orish asosan tuproq namligi sensorlari ma’lumotlari asosida boshqariladi.

V2 — ko‘p parametrlı boshqaruv: tuproq namligi + T-Weather + ET_0 ma’lumotlari birgalikda ishlatiladi.

V3 — taklif etilayotgan intellektual tizim: tuproq namligi + T-Weather + ET_0 + GIS/zonalash + robototexnik-mexatronik avtomatik boshqaruv.

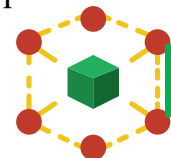
Tajriba davomida quyidagi ko‘rsatkichlar qayd etiladi:

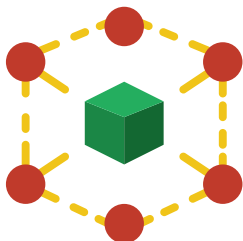
- umumiy sug‘orish suvi sarfi;
- sug‘orishlar soni;
- har bir zonadagi tuproq namligi;
- tuproq namligining variatsiya koeffitsiyenti;
- nasosning ishlash vaqti;
- elektr energiyasi sarfi;
- sug‘orish davomiyligi;
- ekinning hosildorligi;
- suvdan foydalanish samaradorligi;
- bir tonna hosil uchun sarflangan suv miqdori;
- tizimning avtomatik ishlash ulushi.

Kutilayotgan natijalar

Tadqiqotning tajriba bosqichida quyidagi ilmiy-amaliy natijalarga erishish kutiladi:

1. Sug‘oriladigan maydonning tuproq namligi bo‘yicha fazoviy xaritasi ishlab chiqiladi.





2. Tuproq namligi va agroekologik ko'rsatkichlarga asoslangan boshqaruv zonalarini aniqlanadi.
3. Har bir zona uchun reprezentativ sensor joylashuvi belgilanadi.
4. T-Weather va tuproq namligi ma'lumotlarini yagona boshqaruv algoritmidagi integratsiya qilish imkoniyati yaratiladi.
5. ET_0 va K_c asosida ekinning suvga bo'lgan ehtiyojini baholash mexanizmi ishlab chiqiladi.
6. Zonal sug'orish uchun robototexnik-mexatronika ijro moduli yaratiladi.
7. Sug'orishdan keyingi qayta monitoring asosida keyingi sug'orish qarorlarini avtomatik korreksiya qilish imkoniyati ta'minlanadi.
8. Suv va energiya sarfining an'anaviy boshqaruvga nisbatan o'zgarishi tajriba asosida aniqlanadi.
9. Tuproq namligini optimal diapazonda ushlab turish samaradorligi baholanadi.
10. Taklif etilayotgan tizimning iqtisodiy va texnologik samaradorligi aniqlanadi.

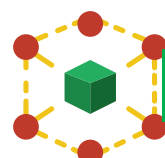
Ilmiy yangilik

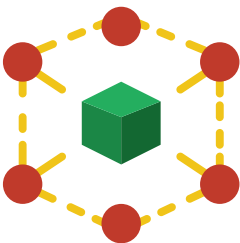
Tadqiqotning asosiy ilmiy yangiliklari quyidagilardan iborat:

1. Sug'oriladigan maydonning fazoviy heterojenligini sug'orish qarorini shakllantirishning asosiy parametrlaridan biri sifatida hisobga olish usuli taklif etiladi.
2. Tuproq namligi, T-Weather meteorologik ma'lumotlari, ET_0 , K_c , GIS va masofadan zondlash ma'lumotlarini yagona intellektual boshqaruv algoritmidagi integratsiya qilish yondashuvi ishlab chiqiladi.
3. Boshqaruv zonalarining haqiqiy namlik holatiga qarab sug'orish vaqtini va suv berish miqdorini individual belgilovchi adaptiv boshqaruv algoritmi taklif etiladi.
4. Shakllangan sug'orish qarorlarini elektromagnit klapan, nasos, aktuator va kontrollerlardan tashkil topgan mexatronika ijro moduli orqali avtomatik amalga oshirish mexanizmi ishlab chiqiladi.
5. Sug'orishdan keyingi tuproq namligi va suv sarfini qayta o'lchash asosida keyingi boshqaruv qarorlarini korreksiya qiluvchi yopiq konturli boshqaruv tamoyili taklif etiladi.
6. Sensorlar sonini faqat maydon yuzasiga nisbatan emas, balki tuproq namligining fazoviy o'zgaruvchanligi va boshqaruv zonalarining statistik xususiyatlari asosida aniqlash metodikasi shakllantiriladi.

Tizimning amaliy afzalliklari quyidagilardan iborat:

- sug'orish suvini zarur zonaga yo'naltirish;
- ortiqcha sug'orishning oldini olish;
- tuproq namligini monitoring qilish;
- sug'orish vaqtini avtomatik belgilash;
- suv sarfini real vaqt rejimida nazorat qilish;
- nasoslarning ortiqcha ishlash vaqtini kamaytirish;





- inson omiliga bog‘liq xatolarni kamaytirish;
- masofadan monitoring va boshqarishni ta‘minlash;
- suv va energiya resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish.

Xulosa

Sug‘oriladigan maydonlarda tuproq namligining fazoviy o‘zgaruvchanligini hisobga olish suv resurslaridan samarali foydalanish va ekinlarning suv bilan ta‘minlanishini optimallashtirish uchun muhim ilmiy-amaliy yo‘nalish hisoblanadi. Tadqiqotda maydonni yagona sug‘orish obyekti sifatida emas, balki tuproq namligi, tuproq xususiyatlari, relyef va agroiklim sharoitlariga ko‘ra farqlanuvchi boshqaruv zonalari majmuasi sifatida qarash taklif qilindi.

Taklif etilayotgan intellektual sug‘orish tizimi tuproq namligi sensorlari, T-Weather, GIS, masofadan zondlash, ETo hisoblash moduli, Arduino/PLC, nasos, elektromagnit klapanlar va oqim sensorlarini yagona boshqaruv tizimiga birlashtiradi.

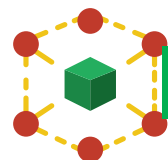
Tizimning asosiy ilmiy jihati — sug‘orish qarorini faqat oldindan belgilangan vaqt yoki bitta sensor qiymatiga emas, balki tuproq–o‘simlik–atmosfera tizimining real holatiga asoslangan holda shakllantirishdir. Bunda maydonning fazoviy o‘zgaruvchanligi boshqaruv qarorining muhim parametri sifatida qabul qilinadi.

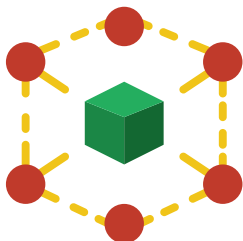
Robototexnik va mexatronik vositalarning integratsiyasi esa shakllangan qarorni avtomatik ravishda fizik ijroga aylantirish, ya‘ni zarur zonadagi klapan va nasoslarni boshqarish imkonini beradi. Sug‘orishdan keyingi qayta monitoring esa tizimga adaptiv xususiyat berib, keyingi qarorlarni real natijalarga ko‘ra korreksiya qilish imkonini yaratadi.

Kelgusidagi dala tajribalarida taklif etilayotgan tizimning suv sarfi, energiya iste‘moli, tuproq namligi barqarorligi, hosildorlik va suvdan foydalanish samaradorligiga ta‘siri statistik jihatdan baholanadi. Shu asosda issiq va qurg‘oqchil sharoitlarda qo‘llash uchun tizimning optimal boshqaruv parametrlari aniqlanadi.

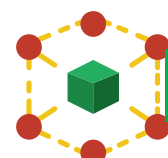
Foydalanilgan adabiyotlar

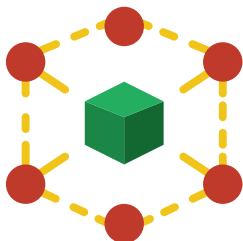
1. Abdullayev S.A., Namozov X.Q. **Tuproq melioratsiyasi va gidrologiyasi.** — Toshkent: Fan va texnologiya, 2018. — 376 b.
2. Xamidov M.X., Suvanov B., Isabayev K. **Sug‘orish melioratsiyasi.** — Toshkent, 2020. — 266 b.
3. Xamidov M.X., Begmatov I.A., Isayev S.X., Mamatov S.A. **Suv tejamkor sug‘orish texnologiyalari.** — Toshkent: TIQXMMI, 2015. — 232 b.
4. Xamidov M.X., Shukurlayev X.I., Mamataliyev A.B. **Qishloq xo‘jaligi gidrotexnika melioratsiyasi.** — Toshkent: Sharq, 2009. — 379 b.
5. Noraliyev N.X. **Qishloq xo‘jaligida raqamli texnologiyalar.** — Toshkent: Fan zargari, 2025. — 140 b.





6. Tangriyev A.T. O'zbekiston qishloq xo'jaligida raqamli texnologiyalar: qishloq xo'jaligini raqamlashtirishning xorijiy tajribalarini O'zbekistonda joriy qilish. — *Tadqiqotlar*, 2025.
7. **Optimizing soil-moisture sensor placement according to seasonal and site conditions for smart irrigation using satellite data and machine learning.** — *Smart Agricultural Technology*, 2026, Vol. 14, 102113. DOI: 10.1016/j.atech.2026.102113.
8. **Optimizing soil moisture sensor placement through spatial variability analysis in Orchards.** — *Smart Agricultural Technology*, 2025, Vol. 12, 101273. DOI: 10.1016/j.atech.2025.101273.
9. **Soil moisture sensor location-allocation using spatial association of surface moisture data.** — *Smart Agricultural Technology*, 2025, Vol. 11, 100929. DOI: 10.1016/j.atech.2025.100929.
10. **Optimizing soil water sensor placement and irrigation thresholds for winter wheat: A data-driven approach to efficient water management.** — *Agricultural Water Management*, 2025, Vol. 320, 109861.
11. **IoT-enabled solar-powered smart irrigation for precision agriculture.** — *Smart Agricultural Technology*, 2025, Vol. 10, 100773. DOI: 10.1016/j.atech.2025.100773.
12. **Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency.** — *Smart Agricultural Technology*, 2025, Vol. 12, 101081.
13. **IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events.** — *Scientific African*, 2025, Vol. 27, e02527.
14. **Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard.** — *Agricultural Water Management*, 2024, Vol. 305, 109138. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109138.
15. **A heterogeneous sensing system for soil moisture mapping in agricultural environments.** — *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, Vol. 239, 110932. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110932.
16. **Variogram Assessment of Sub-Field Scale Soil Water Variability for Irrigation Management.** — *Water*, 2026, Vol. 18, No. 16, 1942. DOI: 10.3390/w18161942.
17. **AI-Augmented Smart Irrigation System Using IoT and Solar Power for Sustainable Water and Energy Management.** — *Energy Engineering*, 2025, Vol. 122, Issue 10, pp. 4261–4296. DOI: 10.32604/ee.2025.068422.
18. **Internet of Things-enabled smart irrigation systems for precision water management: A systematic review.** — *Agricultural Water Management*, 2026.





19. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper 56. — Rome: FAO, 1998.
20. Ayaz M., Ammad-Uddin M., Sharif Z., Mansour A., Aggoune E.H.M. **Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk.** — *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 129551–129583.
21. Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N.S. **Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges.** — *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, Vol. 118, pp. 66–84.
22. Kim Y., Evans R.G., Iversen W.M. **Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network.** — *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57, No. 7, pp. 1379–1387.
23. Liakos K.G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. **Machine learning in agriculture: A review.** — *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 8, 2674.
24. Kamienski C., Soininen J., Taumberger M., et al. **Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture.** — *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 2, 276.
25. Fereres E., Soriano M.A. **Deficit irrigation for reducing agricultural water use.** — *Journal of Experimental Botany*, 2007, Vol. 58, No. 2, pp. 147–159.
26. Zhang C., Kovacs J.M. **The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review.** — *Precision Agriculture*, 2012, Vol. 13, pp. 693–712.

