TO‘QIMACHILIK KORXONALARIDA YONG‘IN XAVFINI MONITORING QILISH UCHUN IOT VA MASHINALI O‘QITISHGA ASOSLANGAN TIZIMNI LOYIHALASH VA JORIY ETISH: METODOLOGIYA, ARXITEKTURA VA EKSPERIMENTAL VALIDATSIYA

Haqberdiyeva Gulchexra
Magistrant, Asia International University
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20426423

Annotatsiya: Ushbu maqolada to‘qimachilik korxonalarida yong‘in xavfini monitoring qilish uchun mo‘ljallangan intellektual tizimning metodologiyasi, tizim arxitekturasi va eksperimental validatsiyasi taqdim etilgan. Tizim Internet of Things (IoT) sensorlar tarmoqlarini mashinali o‘qitish (ML) algoritmlari bilan integratsiyalash orqali real vaqtda yong‘in xavfini bashorat qiladi. Tadqiqot “Buxoro Agroklaster” MChJ tarkibidagi ikki to‘qimachilik korxonasida, umumiy maydoni 45 000 m² bo‘lgan 5 ta ishlab chiqarish sexida o‘tkazilgan. Uch qatlamli IoT arxitekturasi (Perception, Network, Application) 76 ta sensor moduli (7 tur: DHT22, DS18B20, MQ-2, MQ-7, MQ-135, IR alanga, GP2Y1010AU), ESP32 mikrokontrollerlar, WiFi/MQTT aloqa, Raspberry Pi edge serverlar va PostgreSQL 15 hamda Grafana bilan jihozlangan markaziy Linux server yordamida ishlab chiqilgan. 8 oy davomida to‘plangan 1,75 million sensor yozuvi asosida beshta ML algoritm (XGBoost, Random Forest, Gradient Boosting, SVM, MLP) o‘qitilgan. Eksperimental validatsiya barcha sensorlarning laboratoriya kalibratsiyasi, 115 ta nazorat qilingan simulyatsiya tajribalari va 5 oylik dala sinovlarini o‘z ichiga olgan bo‘lib, dala sinovlari davomida tizim 4 ta real yong‘in xavfi holatini yong‘in boshlanishidan 3–12 daqiqa oldin aniqlagan, tizim uptime ko‘rsatkichi 99,2–99,4% va noto‘g‘ri ogohlantirish darajasi oyiga 0,8–1,2 tani tashkil etgan. Tizimning umumiy apparat narxi taxminan 175 AQSh dollarini tashkil etadi.
Kalit so‘zlar: IoT, yong‘in xavfini monitoring qilish, mashinali o‘qitish, to‘qimachilik sanoati, XGBoost, Random Forest, sensorlar tarmog‘i, MQTT, ESP32, yong‘in bashorati, aqlli fabrika, chekka hisoblash.

Аннотация: В статье представлены методология, архитектура и экспериментальная валидация интеллектуальной системы мониторинга пожарного риска на текстильных предприятиях. Система интегрирует IoT-сенсорные сети с алгоритмами машинного обучения для прогнозирования пожарной опасности в реальном времени. Исследование проведено на базе двух текстильных предприятий ООО «Бухара Агрокластер», охватывающих 5 производственных цехов общей площадью 45 000 м². 76 сенсорных модулей, 5 алгоритмов ML и 1,75 млн записей данных позволили системе обнаружить 4 реальных пожароопасных ситуации за 3–12 минут до возгорания.
Ключевые слова: IoT, мониторинг пожарного риска, машинное обучение, текстильное производство, XGBoost, Random Forest, сенсорная сеть, MQTT, ESP32.

Abstract: This article presents the methodology, system architecture, and experimental validation of an intelligent fire risk monitoring system designed for textile manufacturing enterprises. The system integrates IoT sensor networks with ML algorithms to enable real-time fire hazard prediction. The research was conducted at two textile enterprises within “Bukhara Agroklaster” LLC, covering five production workshops with a total area of 45,000 m². Five ML algorithms were trained on 1.75 million sensor readings collected over 8

months. The system detected 4 real fire hazard incidents 3–12 minutes before ignition during 5-month field trials.

Keywords: IoT, fire risk monitoring, machine learning, textile manufacturing, XGBoost, Random Forest, sensor network, MQTT, ESP32, fire prediction, smart factory, edge computing.

Zamonaviy sanoat manzarasida to‘qimachilik korxonalarida yong‘in hodisalari inson xavfsizligi, moddiy boyliklar va ishlab chiqarish uzluksizligi uchun jiddiy tahdid hisoblanadi. To‘qimachilik sanoati o‘z tabiati bo‘yicha yuqori yonuvchanlikka ega materiallarni — paxta tolasi, ip, gazlama, kimyoviy bo‘yoqlar va organik erituvchilarni — qayta ishlaydi, bu esa tabiiy ravishda yuqori xavfli muhitni yaratadi. Yevropa Yong‘in Xavfsizligi Alyansi ma‘lumotlariga ko‘ra, Yevropa Ittifoqi davlatlarida yiliga 25 mingdan ortiq sanoat yong‘ini qayd etiladi, Xitoyda bu ko‘rsatkich 30 mingdan, Rossiyada esa 15 mingdan ortiq sanoat va qishloq xo‘jaligi yong‘in holatlarini tashkil etadi [4–6]. O‘zbekiston Favqulodda vaziyatlar vazirligi ma‘lumotlariga ko‘ra, respublikamizda yiliga 3 000 dan ortiq yong‘in holatlari qayd etiladi, ularning sezilarli qismi qishloq xo‘jaligi va sanoat sohalarida yuz beradi.

An‘anaviy yong‘in aniqlash tizimlari — nuqtaviy tutun sensorlari, qo‘lda ishga tushiriladigan signal stansiyalari va sprinkler tizimlar — reaktiv tarzda ishlaydi, ya‘ni faqat yonish jarayoni allaqachon boshlangandan keyin faollashadi. Bu reaktiv paradigma asosiy cheklovga ega: an‘anaviy detektorlar ishga tushgunga qadar sezilarli moddiy zarar va hayot uchun xavfli vaziyatlar allaqachon vujudga kelgan bo‘lishi mumkin. Internet of Things (IoT) sensorlar tarmoqlari va mashinali o‘qitish (ML) algoritmlarining birlashishi orqali reaktiv aniqlashdan bashoratlash va oldini olishga o‘tish tubdan ustun yondashuvni taklif etadi: ko‘p parametrli uzluksiz monitoring va yong‘in boshlanishidan oldin intellektual xavf bashorati [1, 7, 10].

Ushbu maqola to‘qimachilik korxonalari uchun maxsus moslashtirilgan IoT va ML-ga asoslangan yong‘in xavfini monitoring qilish tizimini loyihalash, joriy etish va eksperimental validatsiya qilishning to‘liq metodologiyasini taqdim etadi. Tadqiqot “Buxoro Agroklaster” MChJ ishlab chiqarish korxonalarida o‘tkazilgan bo‘lib, ikki yirik to‘qimachilik korxonasini — “Buxoro New Textile” MChJ va “Buxoro Global Megateks” MChJni — o‘z ichiga oladi. Korxonalar 45 000 m² maydonni egallagan 5 ta ishlab chiqarish sexidan iborat bo‘lib, ularda 1 200 dan ortiq ishchi mehnat qiladi. Metodologiya sensorlarni kalibrlash, ma‘lumotlarni oldindan qayta ishlash, ML modellarini tanlash va giperparametrlarni optimallashtirish, nazorat qilingan simulyatsiya tajribalari va kengaytirilgan dala sinovlarini birlashtiradi hamda cheklangan infratuzilma va byudjetga ega rivojlanayotgan mamlakatlar to‘qimachilik korxonalari uchun qo‘llash mumkin bo‘lgan takrorlanadigan asos yaratadi.

1. Tadqiqot ob‘ektlari va ma‘lumotlar infratuzilmasi

Tadqiqot ob‘ektlarini tanlash to‘rtta asosiy mezon bilan belgilangan: to‘qimachilik sanoatining O‘zbekiston iqtisodiyoti uchun strategik ahamiyati, yonuvchan materiallar tufayli to‘qimachilik qayta ishlashda tabiiy ravishda yuqori yong‘in xavfi, “Buxoro Agroklaster” tizimida IoT ni joriy etish uchun mavjud infratuzilma, hamda klaster rahbariyatidan sensor o‘rnatish va ma‘lumotlar yig‘ish uchun rasmiy ruxsat.

Ikki korxona beshta ishlab chiqarish sexini o‘z ichiga oladi: yigirish sexi — paxta tolasidan ip tayyorlanadigan bo‘lim (ochish, tarash, taroqlash, cho‘zish, oldindan yigirish va yigirish jarayonlari); to‘qish sexi — ipdan gazlama ishlab chiqariladigan bo‘lim (tanda tayyorlash, ohorlash, iplarni tortish va to‘qish); bo‘yash va pardozlash sexi — yong‘in xavfi eng yuqori bo‘lim (ohorni yuvish, tozalash, oqartirish, bo‘yash, pardozlash, 140–180°C da quritish va dazmollash); tikuv sexi — kesish, tikish, dazmollash va qadoqlash; hamda ombor xo‘jaligi — xom paxta taylari, kimyoviy materiallar va tayyor mahsulotlar saqlanadigan bo‘lim. Ushbu sexlarning tashkiliy parametrlari 1-jadvalda jamlangan.

1-jadval. Ishlab chiqarish sexlari bo‘yicha tashkiliy tuzilma va sensorlar taqsimoti.

No	Ko‘rsatkich	Buxoro New Textile	Buxoro Global Megateks	Ombor	Jami
1	Asosiy sexlar	Yigirish, To‘qish	Bo‘yash, Tikuv	Omborlar	**5**
2	Ishlab chiqarish maydoni, m²	20 000	17 000	8 000	**45 000**
3	Ishchilar soni	480	520	200	**1 200**
4	Sensor modullari	32	32	12	**76**

FVV Buxoro viloyat boshqarmasining 2018–2025 yillar tarixiy yong‘in holatlari statistikasi tahlili korxonalar bo‘ylab 127 ta yong‘in xavfi holatini aniqlagan. Bo‘yash va pardozlash sexi barcha holatlarning 33,1% ini (42 ta) tashkil etgan, yigirish sexi esa 22,8% (29 ta) bilan ikkinchi o‘rinda turgan. Bu taqsimot to‘g‘ridan-to‘g‘ri sensorlar zichligini belgilashga ta‘sir ko‘rsatgan: bo‘yash sexi kimyoviy muhit va yuqori haroratli jarayonlar tufayli eng ko‘p sensor (22 modul) bilan ta‘minlangan, yigirish sexi esa paxta tolasi changi portlash xavfi tufayli 18 modul olgan [14].

Ma‘lumotlar infratuzilmasi PostgreSQL 15 asosida qurilgan bo‘lib, u MySQL, MongoDB va InfluxDB bilan o‘nta baholash mezoni bo‘yicha tizimli qiyoslash natijasida tanlangan. Bu mezonlarga TimescaleDB kengaytmasi orqali vaqt qatorlarini qo‘llab-quvvatlash, ACID tranzaksiyalar ishonchliligi, MQTT yuklari uchun JSONB saqlash, so‘rovlarni 3–5 marta tezlashtiradigan deklarativ partitioning, Python ekotizimi integratsiyasi va Grafana bilan native moslik kiradi. 8 oylik monitoring davomida (2025-yil sentyabr – 2026-yil aprel) 76 ta sensor 1,75 million ma‘lumot yozuvini hosil qilgan. Xom ma‘lumotlar to‘rt bosqichli qayta ishlashdan o‘tgan: IQR asosida shovqinlarni filtrlash (2,1% olib tashlangan), yo‘qotilgan qiymatlar uchun chiziqli interpolyatsiya (1,6% to‘ldirilgan), [0,1] oraliqqa Min-Max normalizatsiya va feature engineering — 7 ta asosiy parametrni vaqt oynasi statistikalari, gradient hisoblashlar, sex turining one-hot kodlash, smena ko‘rsatkichlari, mavsumiy o‘zgaruvchilar, sensorlar arasi korrelyatsiya va kompozit indekslar orqali 35 ta xususiyatga kengaytirish. Ma‘lumotlar 80:20 nisbatda o‘quv va sinov to‘plamlariga bo‘lingan, 5-fold stratified cross-validation qo‘llanilgan.

2. IoT sensorlar tizimi arxitekturasi

IoT tizimi IEEE va ITU-T tomonidan tavsiya etilgan uch qatlamli arxitektura asosida loyihalangan: Perception layer (sensorlar qatlami), Network layer (tarmoq qatlami) va Application layer (ilova qatlami). Arxitektura to‘qimachilik ishlab chiqarish muhitining cheklovlariga — changga chidamlilik, yuqori namlik va haroratga bardoshlilik, kimyoviy atmosferaga moslik — hamda “Buxoro Agroklaster” korxonalarining mavjud infratuzilmasiga moslashtirilgan.

Perception layer yetti turdagi sensorlardan iborat bo‘lib, har biri to‘qimachilik jarayonlariga xos aniq yong‘in xavfi omillarini aniqlash uchun tanlangan. DHT22 sensorlari

barcha sexlarda harorat (±0,5°C) va namlikni (±2%) o‘lchaydi. DS18B20 suv o‘tkazmaydigan sensorlar bo‘yash sexida stenter uskunasi yaqinida 125°C gacha yuqori haroratni nazorat qiladi. MQ-2 yarim o‘tkazgichli metal-oksid sensorlari qalay dioksid (SnO_2) sezgir elementdagi qarshilik o‘zgarishlari orqali tutun va yonuvchan gazlarni aniqlaydi. MQ-7 sensorlari selektiv uglerod oksidi aniqlash uchun ikki fazali isitish tsiklini (5V/60s yuqori, 1,4V/90s past) qo‘llaydi — bu juda muhim, chunki CO konsentratsiyasining oshishi tutash yonishning eng erta belgisi bo‘lib, ko‘rinadigan alangadan 5–15 daqiqa oldin paydo bo‘ladi. MQ-135 sensorlari bo‘yash sexida uchuvchan organik birikmalarni (VOC) monitoring qiladi, chunki kimyoviy erituvchilar xavfsizlik chegarasidan (OSHA PEL 200 ppm) oshishi mumkin. GP2Y1010AU optik chang sensorlari yigirish va to‘qish sexlarida havoda suzib yurgan zarrachalar konsentratsiyasini o‘lchaydi — NFPA 652 standartiga ko‘ra paxta tolasi changi 300 μg/m³ da portlash xavfini tug‘diradi. IR alanga sensorlari 760–1100 nm to‘lqin uzunligidagi infraqizil nurlanishni 15 mikrosoniyalik javob vaqti bilan aniqlaydi. Sensorlarning texnik xususiyatlari va joylashtirish taqsimoti 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Sensorlarning texnik xususiyatlari va sexlar bo‘yicha taqsimoti.

No	Sensor	Parametr	Diapazon	Aniqlik	Soni	Sex
1	DHT22	Harorat va namlik	-40..+80°C	±0,5°C	16	Barchasi
2	DS18B20	Yuqori harorat	-55..+125°C	±0,5°C	4	Bo‘yash
3	MQ-2	Tutun va yonuvchan gaz	300–10 000 ppm	±5%	13	Barchasi
4	MQ-7	Uglerod oksidi (CO)	20–2 000 ppm	±3%	11	Barchasi
5	MQ-135	VOC, havo sifati	10–1 000 ppm	±5%	4	Bo‘yash
6	IR alanga	Infraqizil alanga	760–1100 nm	60°	18	Barchasi
7	GP2Y1010AU	Chang zichligi	0–500 μg/m³	±15%	10	Yigirish, To‘qish
				Jami	**76**	

Barcha sensorlar ESP32 ikki yadroli mikrokontrollerlar (Xtensa LX6, 240 MGts) orqali boshqariladi. Har bir ESP32 moduli 3–5 ta sensorni har 5 daqiqada so‘raydi, o‘qishlarni JSON formatiga aylantiradi va MQTT orqali edge serverga uzatadi. Tizimning umumiy apparat narxi taxminan 2 223 000 so‘m (~175 AQSh dollari) ni tashkil etadi, bu rivojlanayotgan mamlakatlar uchun yondashuvning iqtisodiy jihatdan qulay ekanligini ko‘rsatadi.

Tarmoq qatlami korxonalarning mavjud infratuzilmasidan foydalanib WiFi (IEEE 802.11n/ac) ni asosiy aloqa protokoli sifatida qo‘llaydi. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) HTTP/REST, CoAP va WebSocket protokollari bilan qiyosiy baholash natijasida ma‘lumot uzatish protokoli sifatida tanlangan. MQTT ning publish/subscribe arxitekturasi 76 ta bir vaqtda ishlaydigan sensor oqimini samarali boshqaradi; uning minimal header hajmi (2–10 bayt) ESP32 resurslarini tejaydi; QoS 1 darajasi (kamida bir marta yetkazish) 99,85% o‘lchangan yetkazish tezligi bilan ishonchli uzatishni ta‘minlaydi. Eclipse Mosquitto 2.0 MQTT broker sifatida xizmat qiladi. Asosiy internet aloqasi uzilganda

4G/LTE zaxira kanali avtomatik faollashadi. Aloqa protokollarining qiyosiy tahlili 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval. IoT aloqa protokollarining qiyosiy tahlili.

No	Mezon	MQTT	HTTP/REST	CoAP	WebSocket
1	Arxitektura modeli	Pub/Sub	So‘rov/Javob	So‘rov/Javob	To‘liq dupleks
2	Header hajmi	2–10 bayt	~800 bayt	4 bayt	2–14 bayt
3	QoS darajalari	0, 1, 2	Yo‘q	Tasdiqlash	Yo‘q
4	Energiya sarfi	Past	Yuqori	Past	O‘rtacha
5	IoT uchun moslik	Standart	Mos emas	Yaxshi	O‘rtacha

Ilova qatlami ikki qismli hisoblash arxitekturasini amalga oshiradi. Har bir korxonadagi Raspberry Pi 4 Model B edge serverlari (4 GB RAM, to‘rt yadroli Cortex-A72) real vaqtda anomaliyalarni filtrlash, qoidalarga asoslangan tezkor ogohlantirish (chegaralar oshganda markaziy serverni chetlab o‘tib bevosita Telegram orqali xabar yuborish) va mahalliy buferlashtirish (internet uzilganda 72 soatlik SQLite sig‘imi) vazifalarini bajaradi. Markaziy Linux Ubuntu 22.04 server (Intel Xeon E-2236, 32 GB ECC RAM, 1 TB SSD) to‘liq dasturiy ta‘minot stekini ishga tushiradi: PostgreSQL 15 + TimescaleDB, Python 3.10, scikit-learn 1.3, XGBoost 2.0, Flask 2.3, Grafana 10.2, Mosquitto MQTT broker va Telegram Bot API. Sensordan ogohlantirish yetkazilishigacha bo‘lgan end-to-end kechikish normal rejimda 5–7 daqiqa, tezkor rejimda (edge ogohlantirish) 15–30 soniyani tashkil etadi.

3. Mashinali o‘qitish algoritmlarini tanlash va optimallashtirish

ML algoritmlarini tanlash beshta mezon asosida amalga oshirilgan: bashorat aniqligi (F1-score va AUC-ROC), 5 daqiqalik bashorat tsikllari uchun hisoblash tezligi, sex xavfsizligi xodimlari uchun interpretatsiya qilish imkoniyati, ko‘p o‘lchovli to‘qimachilik sensor ma‘lumotlariga moslik va mavjud server uskunalariga muvofiqlik. Ushbu mezonlar va avvalgi tadqiqot natijalari asosida — yong‘in bashorati tadqiqotlarida XGBoost 94%, Random Forest 89–92%, Gradient Boosting 90%, MLP 90% va SVM 86% aniqlik ko‘rsatgan [7] — beshta algoritm tanlangan: XGBoost asosiy model sifatida, Random Forest, Gradient Boosting, SVM va MLP esa qiyoslash uchun.

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) Chen va Guestrin (2016) tomonidan ishlab chiqilgan bo‘lib, asosiy model sifatida tanlangan. Buning sabablari: 35 ta xususiyat orasidagi murakkab nochiziqli o‘zaro bog‘liqliklarni aniqlash qobiliyati, o‘ta o‘rganishni oldini oladigan L1/L2 regularizatsiya, sensor nosozliklaridan kelib chiqadigan yo‘qotilgan qiymatlarni avtomatik boshqarish va serverning 6 yadroli Xeon protsessoridan samarali foydalanadigan parallel hisoblash [11]. Random Forest, Breiman (2001) tomonidan taklif qilingan, bootstrap aggregating va feature randomization bilan bagging ansambli asosida ishlab chiqilgan bo‘lib, xususiyatlar muhimligi tahlili orqali yuqori interpretatsiya imkoniyati bilan mustahkam qiyoslash modeli sifatida xizmat qiladi [12]. Gradient Boosting XGBoost ning regularizatsiya afzalliklarini baholash uchun regularizatsiyasiz bazaviy model hisoblanadi. SVM kernel asosidagi giperyuzasama ajratishni qo‘llaydi, lekin 1,75 million yozuvli ma‘lumotlar bazasida masshtablilik cheklovlariga duch keladi. MLP, ReLU aktivatsiya va Adam optimizator bilan ko‘p qatlamli to‘g‘ri tarqaluvchi neyron tarmoq bo‘lib, chuqur o‘qitish yondashuvini ifodalaydi. Barcha beshta algoritmning to‘liq tavsifi va giperparametrlar qidirish maydoni 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval. ML algoritmlari qiyoslash va giperparametrlar qidirish konfiguratsiyasi.

No	Algoritm	Turi	Interpretatsiya	Yo‘q. ma‘l.	Kombin.	Roli
1	**XGBoost**	Gradient Boosting	O‘rtacha	Ha	150	**Asosiy**
2	Random Forest	Bagging ansambl	Yuqori	Ha	27	Qiyoslash
3	Gradient Boost.	Gradient Boosting	O‘rtacha	Yo‘q	27	Qiyoslash
4	SVM	Kernel metod	Past	Yo‘q	18	Qiyoslash
5	MLP	Neyron tarmoq	Juda past	Yo‘q	24	Qiyoslash
				Jami	**246**	~128 daq.

Giperparametrlarni optimallashtirish uchun scikit-learn kutubxonasining GridSearchCV usuli 5-fold stratified cross-validation bilan qo‘llanilgan. Barcha beshta algoritm bo‘yicha jami 246 ta giperparametr kombinatsiyasi baholangan, natijada Xeon E-2236 serverda taxminan 128 daqiqada 1 230 ta alohida model o‘qitish va baholash jarayoni o‘tkazilgan. Klassifikatsiya masalasi ikkilik bashorat (0 = normal, 1 = xavfli) shaklida qo‘yilgan bo‘lib, xalqaro standartlar (EN 54, NFPA 72, NFPA 652, OSHA PEL) va tarixiy holatlar tahlili asosida yettita xavf ko‘rsatkichi belgilangan: haroratning me‘yordan >15% oshishi, tutun >500 ppm, CO >50 ppm, VOC >200 ppm (bo‘yash sexi), chang >300 µg/m³ (yigirish sexi), alanga sensorining faollashishi va ikkita yoki undan ortiq parametrning bir vaqtda oshishi.

Ma‘lumotlar bazasida sinflar nomutanosibligi kuzatilgan (xavfli holatlar yozuvlarning atigi 10% ini tashkil etgan), bu muammo SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) usuli bilan hal qilingan. SMOTE k-eng yaqin qo‘shnilar o‘rtasida interpolyatsiya orqali kamchilik sinfi uchun sintetik namunalar hosil qilib, sinflar nisbatini 1:9 dan 1:3 ga o‘zgartirgan. SMOTE faqat o‘quv to‘plamiga qo‘llanilgan — sinov to‘plami o‘zgartirilmagan [13]. Baholash metodologiyasida Recall (yong‘in xavfini qo‘ldan chiqarmaslik) eng muhim metrika sifatida belgilangan, chunki False Negative — haqiqiy yong‘in xavfini aniqlay olmaslik — False Positive dan (qisqa vaqtlik keraksiz tekshiruv) taqqoslab bo‘lmaydi darajada og‘ir oqibatlarga (uskunalar buzilishi, ishchilar shikastlanishi, ishlab chiqarishning to‘xtashi) olib keladi. F1-score asosiy tanlash mezoni, teng F1-score da esa Recall yuqorisi tanlanadi.

4. Eksperimental metodologiya va validatsiya

Eksperimental dastur uch ketma-ket bosqichdan iborat: laboratoriya sinovlari, nazorat qilingan simulyatsiyalar va dala sinovlari. Har bir bosqich alohida validatsiya maqsadlariga xizmat qilgan, oldingi bosqichlar natijalari keyingi eksperimental loyihani shakllantirgan.

Laboratoriya sinovlari Buxoro davlat texnika universitetida uch oy davomida (2025-yil sentyabr–noyabr) o‘tkazilgan. Barcha 76 ta sensor sertifikatlangan etalon asboblar bilan kalibrlangan: harorat sensorlari beshta nazorat nuqtasida (+10, +20, +30, +40, +50°C) PTB sertifikatlangan etalon termometrlar bilan; namlik sensorlari to‘yingan tuz eritmalari usulida (LiCl — 11,3%, $MgCl_2$ — 32,8%, NaCl — 75,3%, K_2SO_4 — 97,3%); gaz sensorlari sertifikatlangan gaz aralashmalari bilan (CO — 50–1000 ppm, propan — 1000–5000 ppm, VOC uchun atsetaldegid — 50–500 ppm); chang sensori esa TSI DustTrak DRX etalon asbob bilan (R^2 = 0,94). Aloqa ishonchliligi to‘rtta muhit sharoitida — toza, changli, namli

va elektromagnit shovqinli — sinovdan o‘tkazilgan, barcha ko‘rsatkichlar loyiha maqsadlaridan yaxshiroq natija ko‘rsatgan: paket yo‘qotish 0,05–0,22%, MQTT yetkazish 99,78–99,95%, o‘rtacha kechikish 23–47 ms.

Nazorat qilingan simulyatsiyalar korxonalar ichidagi xavfsiz zonalarda yong‘in xavfsizligi xodimlarining nazoratida, o‘t o‘chirish vositalari tayyorlangan holda o‘tkazilgan. Uchta sex turida jami 115 ta tajriba bajarilgan, ularning tafsiloti 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval. Sex turlari bo‘yicha nazorat qilingan simulyatsiya tajribalari.

No	Sex	Tajr.	Stsenariylar	O‘lchangan natijalar
1	Yigirish	40	Paxta changi tarqatish (100–400 µg/m³); harorat oshirish (+5..+20°C); birgalikda	GP2Y javob vaqti, DHT22+MQ-2 korrelyatsiya, noto‘g‘ri ogohlantirish
2	Bo‘yash	45	VOC simulyatsiya (50–500 ppm); yuqori harorat (+10..+40°C); tutun generatsiya (100–1000 ppm); VOC+harorat birgalikda	MQ-135 javob, DS18B20 aniqlik, ML bashorat tezligi
3	Ombor	30	Materialni sekin qizdirish (+2°C/10daq); past CO oqish (20–80 ppm); birgalikda; IR alanga sinovi	MQ-7 sezuvchanlik, IR masofa/burchak, ogohlantirish tezligi
	Jami	**115**		

Dala sinovlari 5 oy davomida (2025-yil dekabr – 2026-yil aprel) ikkala korxonada real ishlab chiqarish sharoitlarida, qish va bahor mavsumlarini qamrab olgan holda, kunduzi va tungi smenalarda o‘tkazilgan. Tizim uptime ko‘rsatkichi 99,2–99,4% ga yetgan, bu 99% maqsaddan yuqori. Noto‘g‘ri ogohlantirish darajasi oyiga o‘rtacha 0,8–1,2 tani tashkil etgan, bu oyiga 2 ta maqsaddan ancha kam. Eng muhimi, tizim sinov davrida 4 ta real yong‘in xavfi holatini muvaffaqiyatli aniqlagan bo‘lib, ogohlantirish vaqtlari potentsial yong‘indan 3 dan 12 daqiqagacha oldindan berilgan. Bu holatlar 6-jadvalda tavsiflangan.

6-jadval. Dala sinovlarida aniqlangan real yong‘in xavfi holatlari.

No	Korxona	Sex	Holat tavsifi	Ogohl. vaqti	Sensorlar
1	Buxoro New Textile	Yigirish	Carding mashinasi rulmanlari qizishi; tola changi tutashishi boshlanishi	8 daq.	DHT22, GP2Y, MQ-2
2	Buxoro Global Megateks	Bo‘yash	Stenter termoregulyator buzilishi; harorat 185°C ga oshishi	12 daq.	DS18B20, MQ-135, MQ-2
3	Buxoro New Textile	Ombor	Elektr paneldagi kabel qizishi; izolyatsiya tutuni	5 daq.	MQ-2, MQ-7, IR alanga
4	Buxoro Global Megateks	Tikuv	Bug‘li dazmol press termostat nosozligi; yuza 280°C dan oshishi	3 daq.	DHT22, MQ-2, IR alanga

Har bir holatni alohida ko‘rib chiqish lozim. 1-holatda carding mashinasining rulmanlari ishqalanishdan qizigan, DHT22 sensor haroratning me‘yordan 4°C oshganini aniqlagan, GP2Y1010AU sensor chang konsentratsiyasining 250 dan 380 μg/m³ ga ko‘tarilganini qayd etgan va MQ-2 sensor tutunning 150 dan 420 ppm ga oshganini aniqlagan. ML modeli uchta parametrning bir vaqtda oshishini tahlil qilib, yong‘in xavfi ehtimolligini 0,87 (87%) deb bashorat qilgan va potentsial yong‘indan 8 daqiqa oldin ogohlantirish yuborgan. 2-holatda stenter termoregulyatorining buzilishi haroratning 165°C dan 185°C ga ko‘tarilishiga sabab bo‘lgan; DS18B20 oshishni 3 daqiqada aniqlagan, MQ-135 bo‘yoq qoldiqlarining tezlashgan bug‘lanishi tufayli VOC ning 80 dan 240 ppm ga oshganini qayd etgan, ML ehtimolligi 0,93 ni tashkil etgan. 12 daqiqalik oldindan ogohlantirish — erishilgan eng uzun vaqt — stenterning asta-sekin qizish jarayoni bashorat uchun katta vaqt oynasini ta‘minlashi natijasida yuzaga kelgan. Barcha to‘rtta holatda yong‘in sodir bo‘lmasdan hal qilingan, bu tizimning profilaktik aralashuv uchun amaliy qiymatini tasdiqlaydi.

5. Qiyosiy tahlil: taklif etilgan tizim va an‘anaviy yondashuvlar

Taklif etilgan IoT+ML tizim an‘anaviy yong‘in aniqlashdan o‘zining ishlash falsafasi bilan tubdan farq qiladi: aniqlash emas, bashoratlash. An‘anaviy tizimlar — EN 54-7 ga mos nuqtaviy tutun sensorlari, EN 54-5 bo‘yicha o‘zgarmas haroratli detektorlar va EN 54-11 ga mos qo‘lda ishga tushiriladigan stansiyalar — yonish boshlangandan keyin faollashadi, ya‘ni nol daqiqa oldindan ogohlantirish beradi. Taklif etilgan tizim esa yettita atrof-muhit parametrini bir vaqtda monitoring qiladi, yonishdan oldingi anomaliyalarni aniqlash uchun ML naqshlarni tanishni qo‘llaydi va yong‘indan 3–12 daqiqa oldin ogohlantirish yuboradi. Bu bashoratlash qobiliyati yong‘in xavfsizligini reaktiv javobdan proaktiv oldini olishga aylantiradi.

Iqtisodiy tahlil bu qiyoslashni yanada mustahkamlaydi. IoT sensor tizimining umumiy apparat narxi 45 000 m² ni qamrab oluvchi 76 ta sensor moduli va 17 ta ESP32 kontroller uchun taxminan 175 AQSh dollarini tashkil etadi. Teng qamrovga ega an‘anaviy sanoat yong‘in signalizatsiya tizimlari 5 000–15 000 AQSh dollarga tushadi. IoT tizimi qo‘shimcha ravishda an‘anaviy tizimlarda mavjud bo‘lmagan uzluksiz ko‘p parametrli ma‘lumotlarni qayd etish, trend tahlili va masofaviy monitoring imkoniyatlarini ta‘minlaydi. Bundan tashqari, edge computing arxitekturasi internet uzilishlarida operatsion uzluksizlikni ta‘minlaydi — bu ishonchsiz aloqaga ega rivojlanayotgan mamlakatlar korxonalari uchun muhim ahamiyatga ega. 7-jadvalda to‘liq qiyosiy tahlil keltirilgan.

7-jadval. Qiyosiy tahlil: IoT+ML tizim va an‘anaviy yong‘in aniqlash.

No	Mezon	IoT+ML tizim	An‘anaviy tizim
1	Aniqlash falsafasi	Bashoratlash (yong‘indan oldin)	Reaktiv (yong‘indan keyin)
2	Oldindan ogohlantirish	Yong‘indan 3–12 daqiqa oldin	0 daqiqa (yong‘in boshlangandan keyin)
3	Monitoring parametrlari	7 ta (harorat, namlik, tutun, CO, VOC, chang, alanga)	1–2 ta (tutun yoki harorat)
4	Apparat narxi (45 000 m²)	~175 AQSh dollari	5 000–15 000 AQSh dollari
5	Ma‘lumot qayd etish va tahlil	Uzluksiz, ML tahlili bilan	Yo‘q yoki minimal
6	Masofaviy monitoring	Ha (Grafana + Telegram)	Faqat mahalliy panel

7	Oflayn ishlash	72 soatlik edge bufer	Ha (mustaqil)

6. Amaliy qo‘llanilish va joriy etish masalalari

Taklif etilgan tizimning amaliy ahamiyati bevosita tadqiqot kontekstidan tashqariga chiqib, bir nechta real dunyo qo‘llanilish sohalariga tarqaladi. To‘qimachilik ishlab chiqarishida tizim umumiy yong‘in aniqlash tizimlari e‘tibordan chetda qoldiradigan sohaga xos yong‘in xavfi omillarini hal qiladi: yigirish sexlaridagi paxta tolasi changi konsentratsiyasi, pardozlash jarayonlarida kimyoviy bo‘yoqlar va erituvchilardan VOC to‘planishi hamda to‘qimachilik ishlov berishda yong‘indan oldingi sharoitlarni xarakterlaydigon murakkab ko‘p parametrli o‘zaro ta‘sirlar. Standart yong‘in signalizatsiya o‘rnatmalarining tarkibiga kirmaydigan GP2Y1010AU va MQ-135 sensorlari aynan shu to‘qimachilikka xos xavflarni hal qilish uchun maxsus integratsiya qilingan.

Rivojlanayotgan iqtisodiyotlarda sanoat xavfsizligining kengroq kontekstida tizim samarali intellektual monitoringga minimal xarajat bilan erishish mumkinligini ko‘rsatadi. 175 AQSh dollarlik apparat investitsiyasi, ochiq kodli dasturiy ta‘minot (PostgreSQL, Mosquitto, Python, Grafana) va mahalliy mavjud komponentlar (barcha sensorlar Toshkent va Buxoro elektronika do‘konlarida donasi 12 000–25 000 so‘mga sotiladi) bilan birlashtirilgan holda tizim tijorat sanoat yong‘in himoya tizimlarini sotib olish imkoniyatiga ega bo‘lmagan kichik va o‘rta korxonalar uchun qulay bo‘ladi. Modulli uch qatlamli arxitektura bosqichma-bosqich joriy etish imkonini beradi — korxonalar muhim sexlardan boshlashi va byudjet imkon berganida qamrovni kengaytirishi mumkin.

Edge computing komponenti amaliy joriy etish uchun alohida ta‘kidlashga loyiq. Raspberry Pi darajasida qoidalarga asoslangan chegaraviy tekshirishni amalga oshirish orqali tizim internet uzilishlarida ham 15–30 soniya ichida tezkor ogohlantirishlarni yetkazadi. Bu arxitektura qarori dala sinovlari davomida hal qiluvchi ahamiyatga ega bo‘ldi: 72 soatlik SQLite bufer ikkita internet uzilishi davomida (mos ravishda 4 va 7 soat davom etgan) hech qanday ma‘lumot yo‘qotilmasligini ta‘minladi va edge-asosidagi ogohlantirish butun muddatda ishlashda davom etdi. Qishloq xo‘jaligi ilovalari uchun — paxta tozalash zavodlari, don saqlash omborlari, chorvachilik fermalari — ushbu arxitekturaning LoRa protokol varianti (past energiya sarfi bilan 15 km masofa) WiFi infratuzilmasi mavjud bo‘lmagan qishloq joylari uchun mos bo‘ladi.

Xulosa

Ushbu maqolada to‘qimachilik korxonalari uchun IoT va mashinali o‘qitishga asoslangan yong‘in xavfini monitoring qilish tizimini loyihalash, joriy etish va validatsiya qilishning to‘liq metodologiyasi taqdim etilgan. Tadqiqot bir nechta muhim xulosalarni o‘rnatadi. Birinchidan, yetti turdagi 76 ta sensor moduli, ESP32 mikrokontrollerlar, WiFi/MQTT aloqa va ikki bosqichli edge-cloud hisoblashdan foydalangan uch qatlamli IoT arxitektura (Perception, Network, Application) tizim uptime ko‘rsatkichi 99,2% dan yuqori va aloqa ishonchliligi 99,85% bilan ishonchli uzluksiz monitoringni ta‘minlaydi, bunda umumiy apparat narxi taxminan 175 AQSh dollarini tashkil etadi — bu samarali intellektual yong‘in monitoringi rivojlanayotgan mamlakatlar korxonalari uchun iqtisodiy jihatdan qulay ekanligini ko‘rsatadi.

Ikkinchidan, 246 ta giperparametr kombinatsiyasi va 1 230 ta cross-validation ishi orqali baholangan beshta ML algoritm to‘qimachilik muhitlarida yong‘in xavfini bashorat qilish uchun keng qamrovli qiyosiy asos yaratadi. Xalqaro standartlar (EN 54, NFPA 72, NFPA 652, OSHA PEL) va tarixiy holatlar tahlilidan olingan yettita to‘qimachilikka xos xavf ko‘rsatkichlaridan foydalangan klassifikatsiya yondashuvi, sinflar nomutanosibligini tuzatish uchun SMOTE bilan birlashtirilgan holda, shunga o‘xshash sanoat sharoitlarida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan takrorlanadigan metodologiya yaratadi.

Uchinchidan, uch bosqichli eksperimental validatsiya — barcha 76 ta sensorning sertifikatlangan etalon asboblar bilan laboratoriya kalibratsiyasi, yigirish, bo‘yash va ombor

stsenariylarini qamrab olgan 115 ta nazorat qilingan simulyatsiya tajribasi va real ishlab chiqarish sharoitlarida 5 oylik dala sinovlari — tizimning amaliy hayotiyligini tasdiqlaydi. 4 ta real yong‘in xavfi holatining 3–12 daqiqa oldindan ogohlantirish bilan aniqlanishi, ML bashorat ehtimolliklari 0,79–0,93 ga yetishi, bashoratlash asosidagi yong‘in monitoringining to‘qimachilik ishlab chiqarish muhitlari uchun reaktiv yong‘in aniqlashdan ustun ekanligining empirik dalilini beradi.

To‘rtinchidan, taklif etilgan IoT+ML tizim va an‘anaviy yong‘in aniqlash o‘rtasidagi qiyosiy tahlil yong‘indan keyingi reaktsiyadan yong‘indan oldingi oldini olishga tubdan paradigma o‘zgarishini ko‘rsatadi, bunda bir vaqtda parametr qamrovi (7 ga nisbatan 1–2 parametr), narx samaradorligi (175 AQSh dollariga nisbatan 5 000–15 000 AQSh dollari) va operatsion intellekt (uzluksiz tahlil va masofaviy monitoring ga nisbatan mustaqil signal panellari) bo‘yicha ustunliklar mavjud. To‘qimachilik korxonalari uchun amaliy tavsiya — sensorlarni joriy etishda eng yuqori xavfli sexlarga — bo‘yash-pardozlash va yigirish — ustuvorlik berish va operatsion barqarorlik uchun edge computing arxitekturasini qabul qilish, resurslar imkon berganida qamrovni bosqichma-bosqich kengaytirish.

Adabiyotlar:

1. Morchid A. va boshq. (2025). AI and IoT Integration for Fire Risk Management in Agriculture. Internet of Things, 25, 101056. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101056
2. Khan S.N. va boshq. (2024). Machine Learning for Forest Fire Prediction. Fire, 7(2), 43. DOI: 10.3390/fire7020043
3. Zhang X. va boshq. (2024). Deep Learning for Fire Prediction in Smart Cities. Advances in Continuous and Discrete Models, 2024(1), 15.
4. European Fire Safety Alliance. Industrial Fire Statistics in EU Member States, 2024.
5. China Fire and Rescue Department. Annual Fire Statistics Report 2023. Beijing.
6. Rossiya FVV. Yong‘in statistikasi hisoboti 2023. Moskva.
7. Alkhatib A.A.A. va boshq. (2023). A Review of ML Algorithms for Fire Risk Prediction. Applied Sciences, 13(18), 10439.
8. Abdusalomov A.B. va boshq. (2021). An Improved Fire Detection Using YOLOv3. Sensors, 21(19), 6519.
9. Saydirasulov N.S. va boshq. (2023). Improved Wildfire Smoke Detection Using YOLOv8 and UAV Images. Sensors, 23(20), 8374.
10. Carta S. va boshq. (2024). ML and SIoT-Based Framework for Wildfire Risk Assessment. Engineering Proceedings, 68(1), 37.
11. Chen T., Guestrin C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. KDD ’16, 785–794.
12. Breiman L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5–32.
13. Chawla N.V. va boshq. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. JAIR, 16, 321–357.
14. NFPA 652. Standard on the Fundamentals of Combustible Dust. NFPA, 2024.
15. NFPA 72. National Fire Alarm and Signaling Code. NFPA, 2023.
16. OSHA. Permissible Exposure Limits (PEL) for VOC and CO. U.S. Department of Labor, 2023.
17. OASIS. MQTT Version 5.0 Specification. OASIS Standard, 2019.
18. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 4.5, 2024.
19. Sharp Corporation. GP2Y1010AU0F Compact Optical Dust Sensor Datasheet. 2020.
20. Hussain S. va boshq. (2024). A Lightweight YOLOv8n Fire Detection for Smart Factories. Sensors, 24(8), 2585.