

EARLY FIRE DETECTION AND INTELLIGENT EVACUATION IN HIGH-RISE BUILDINGS

Eshbayev Jovli Rustamovich

Raimov Sanjar G'ayrat o'g'li

Jumayev Ibodulla Tulkinovich

Surkhandarya Region Department of Emergency Situations

Abstract

The construction of high-rise buildings in Uzbekistan, particularly in Tashkent, is proceeding at a rapid pace. However, fire detection and evacuation management in such buildings still rely on point-type sensors and static exit signs. Based on an analysis of existing scientific literature, this article examines four research areas aimed at making evacuation adaptive to the situation: multi-sensor and video-based early detection, computer modeling of smoke propagation, evacuation modeling and dynamic route selection, and system integration using digital twins. Key methods, published results, and their limitations are summarized for each area. Multi-sensor systems combined with machine learning reduce false alarms; however, a model trained in one environment loses accuracy when applied to another. While deep learning-based video detectors are evolving, literature reviews highlight issues such as dataset bias and false alarms in real-world conditions. Tools like the FDS software—which simulates fire and smoke propagation—and evacuation models that track individual movements allow for a comparison between the Available Safe Egress Time (ASET) and the Required Safe Egress Time (RSET). Meanwhile, pathfinding algorithms such as A* and Dijkstra can reroute people as conditions change. However, most research on dynamic routing is two-dimensional and fails to account for stairwells, where smoke spreads most rapidly due to the chimney effect. Full-scale tests have demonstrated that dynamic exit signs are more noticeable than static ones. This article proposes a four-layer system adapted to conditions in Uzbekistan—comprising sensing, AI analysis, a simulation-based digital twin, and human routing—and outlines a verification plan that does not rely on predetermined outcomes. Key research gaps identified include the logic of vertical evacuation, the lack of local training data, and the absence of testing in actual buildings in Uzbekistan.

Keywords: High-rise buildings; early fire detection; intelligent evacuation; dynamic signs; digital twin.

Introduction

BALAND QAVATLI BINOLARDA YONG‘INNI ERTA ANIQLASH VA INTELLEKTUAL EVAKUATSIYA

Eshbayev Jovli Rustamovich,
Raimov Sanjar G‘ayrat o‘g‘li,
Jumayev Ibodulla Tulkinovich

Surxondaryo viloyati Favqulodda vaziyatlar boshqarmasi

Annotatsiya

O‘zbekistonda baland qavatli binolar qurilishi, asosan Toshkent shahrida, jadal sur‘atlarda o‘smoqda. Biroq bunday binolarda yong‘inni aniqlash va evakuatsiyani boshqarish hanuz nuqtaviy datchiklar va statik chiqish belgilariga tayanadi. Ushbu maqolada mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili asosida evakuatsiyani vaziyatga moslashuvchan qilishga xizmat qiladigan to‘rtta ilmiy yo‘nalish o‘rganiladi: ko‘p datchikli va videoga asoslangan erta aniqlash, tutun tarqalishini kompyuterda modellashtirish, evakuatsiyani modellashtirish va dinamik marshrut tanlash hamda raqamli egizak yordamida tizimlarni birlashtirish. Har bir yo‘nalish bo‘yicha asosiy usullar, mualliflar e‘lon qilgan natijalar va ularning cheklovlari umumlashtirildi. Mashinaviy o‘qitish bilan birlashtirilgan ko‘p datchikli tizimlar yolg‘on signallarni kamaytiradi, ammo bir muhitda o‘qitilgan model boshqa muhitda aniqligini yo‘qotadi. Chuqur o‘qitishga asoslangan video detektorlar rivojlanmoqda, biroq adabiyotlar tahliliga bag‘ishlangan ishlarda ma‘lumotlar to‘plamlarining bir tomonlamaligi va real sharoitdagi yolg‘on signallar muammo sifatida qayd etilgan. Yong‘in va tutun tarqalishini kompyuterda hisoblaydigan FDS dasturi hamda har bir odamning harakatini alohida modellashtiruvchi evakuatsiya modellari odamlarning xavfsiz chiqib ketishi uchun mavjud vaqt (ASET) va zarur vaqtni (RSET) taqqoslash imkonini beradi. Yo‘llar tarmog‘ida eng qisqa va eng xavfsiz yo‘lni topadigan A* va Dijkstra (Deykstra) algoritmlari esa sharoit o‘zgarishi bilan odamlarni boshqa yo‘lga yo‘naltira oladi. Ammo dinamik yo‘naltirish bo‘yicha tadqiqotlarning aksariyati ikki o‘lchamli bo‘lib, tutun mo‘ri effekti tufayli eng tez tarqaladigan zinapoya kataklarini hisobga olmaydi. To‘liq miqyosli sinovlar dinamik chiqish belgilari oddiy belgilarga qaraganda yaxshiroq sezilishini ko‘rsatgan. Maqolada O‘zbekiston sharoitiga moslashtirilgan to‘rt qatlamli tizim (sezish, sun‘iy

intellekt tahlili, simulyatsiyaga tayangan raqamli egizak va odamlarni yo‘naltirish) taklif etiladi hamda natijani oldindan taxmin qilmaydigan tekshirish rejasi bayon qilinadi. Asosiy ilmiy bo‘shliqlar sifatida vertikal evakuatsiya mantig‘i, mahalliy o‘qitish ma‘lumotlarining yo‘qligi va O‘zbekistondagi real binolarda sinov o‘tkazilmagani ko‘rsatib o‘tilgan.

Kalit so‘zlar: Baland qavatli binolar; yong‘inni erta aniqlash; intellektual evakuatsiya; dinamik belgilar; raqamli egizak.

1. Kirish

Baland binolar O‘zbekiston uchun nisbatan yangi bino turi bo‘lib, ularning yong‘in xavfsizligini ta‘minlash amaliyoti qurilish sur‘atlaridan ortda qolmoqda. Tarixan O‘zbekiston shaharlarida baland binolar kam qurilgan: yirik ko‘lamdagi qurilish so‘nggi yillarda boshlangan va asosan Toshkentda jamlangan, viloyat shaharlari esa hanuz past va o‘rta qavatli bo‘lib qolmoqda [1]. Mamlakatdagi eng baland bino – “Tashkent City” xalqaro biznes markazidagi Nest One binosining balandligi 266,5 metrni tashkil etadi [2]. Shahar bosh rejasida 5–9 qavatgacha ruxsat etilgan hududlarda ham 30 qavatli turar joy loyihalari taklif qilinmoqda [3].

Balandlik yong‘in xavfini uch jihatdan o‘zgartiradi. Birinchidan, vertikal shaxtalar tutunni mo‘ri effekti (ingl. stack effect) orqali yuqori qavatlariga olib chiqadi. 2010-yilda Shanxay shahridagi turar joy binosida yong‘in mo‘ri effekti ta‘sirida to‘rt daqiqadan kam vaqt ichida 28-qavatga yetib borgan va 58 kishi halok bo‘lgan [4]. Xuddi shu tadqiqot ma‘lumotlariga ko‘ra, baland binolardagi yong‘in qurbonlarining taxminan 40–70 foizi tutundan zaharlanish oqibatida halok bo‘ladi [4]. Ikkinchidan, yong‘in paytida liftlardan foydalanish to‘xtatiladi va odamlar tutun bilan to‘lishi mumkin bo‘lgan zinapoyalarga tayanib qoladi. Uchinchidan, “joyida qolish” yoki to‘liq evakuatsiya qilish o‘rtasidagi tanlov hal qiluvchi ahamiyatga ega bo‘ladi. Londondagi Grenfell Tower turar joy binosida sodir bo‘lgan yong‘in bo‘yicha rasmiy tergov yong‘inga qarshi bo‘linmalar (kompartimentlar) ishdan chiqqanidan keyin ham aholiga uzoq vaqt “joyingizda qoling” deb ko‘rsatma berilganini va 72 kishining o‘limining oldini olish mumkin bo‘lganini aniqlagan [5].

An'anaviy aniqlash va yo'naltirish tizimlari bunday jarayonlarga mo'ljallanmagan. Nuqtaviy tutun datchigi yong'in qayerda ekanini yoki qaysi tomonga tarqalayotganini emas, balki faqat tutun unga yetib kelganini xabar qiladi. Statik chiqish belgisi esa o'sha yo'l tutunga to'layotgan bo'lsa ham eng yaqin chiqishni ko'rsataveradi. Tadqiqotlar evakuatsiya paytida odamlarning atigi 38 foizga yaqini oddiy chiqish belgilarini payqashini ko'rsatgan [6].

O'zbekistonda binolarni yong'in xavfsizligi talablari bo'yicha loyihalash ShNQ 2.01.02-04 "Binolar va inshootlarning yong'in xavfsizligi" shaharsozlik normalari va qoidalari bilan tartibga solinadi [7]. Jamoat, turar joy va ta'lim binolarini loyihalashga oid amaldagi normalar ham ushbu hujjatga havola qiladi. Bu normalar talablarni oldindan belgilab beruvchi (preskriptiv) xususiyatga ega: ular chiqishlar soni, zinapoya turlari va signalizatsiya talablarini belgilaydi, biroq datchiklardan real vaqtda olinadigan ma'lumotlarga asoslangan moslashuvchan yo'naltirishni nazarda tutmaydi.

Ushbu maqola quyidagi amaliy savolga javob izlaydi: baland binolarda yong'inni ertaroq aniqlash va odamlarni xavfsizroq yo'naltirish uchun zamonaviy fan qanday yechimlarni taklif etadi va ularni O'zbekistonda joriy etish uchun nimalar talab qilinadi? Maqolaning ilmiy hissasi quyidagilardan iborat: (1) odatda alohida o'rganiladigan to'rtta ilmiy yo'nalishning yaxlit tahlili; (2) mahalliy sharoitga mos to'rt qatlamli integratsiyalashgan tizim; (3) ilmiy bo'shliqlar ro'yxati va kelgusi tadqiqotlar uchun tekshirish rejasini.

2. Tadqiqot metodi

Ushbu maqola adabiyotlar tahliliga asoslangan bo'lib, u PRISMA xalqaro qoidalari bo'yicha bajariladigan tizimli tahlil emas, balki tavsifiy (narrativ) tahlil hisoblanadi. Manbalar ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, PubMed Central va AQSh Milliy standartlar va texnologiyalar instituti (NIST) ma'lumotlar bazalarida qidirildi. Qidiruv ingliz tilida quyidagi tushunchalar birikmalari bo'yicha olib borildi: yong'inni erta aniqlash, ko'p datchikli tizimlar, yolg'on signallar, tutunni video orqali aniqlash, chuqur o'qitish, mo'ri effekti, zinapoya katagidagi tutun, ASET va RSET, evakuatsiya modellari, dinamik evakuatsiya marshruti, A* algoritmi, Dijkstra algoritmi, dinamik chiqish belgilari va yong'inda evakuatsiya uchun raqamli egizak.

Tahlilga quyidagi talablarga javob beradigan taqrizdan o'tgan maqolalar, adabiyotlar tahliliga bag'ishlangan ishlar va milliy institutlarning texnik hisobotlari kiritildi: (a) o'rmon yong'inlariga emas, bino yong'inlariga bag'ishlangan; (b) taklif etilgan usul va uni baholash natijalari keltirilgan; (c) to'liq matni yoki batafsil annotatsiyasi mavjud. Keyingi tadqiqotlar hanuz tayanadigan asosiy ishlar nashr etilgan yilidan qat'i nazar tahlilga kiritildi. O'zbekistonga oid ma'lumotlar milliy qurilish normalari va qurilish sohasidagi ochiq manbalardan olindi.

Bu yondashuvning ikki cheklovi mavjud. Birinchidan, manbalar tanlovi to'liq emas, balki namunaviy xususiyatga ega. Ikkinchidan, samaradorlik ko'rsatkichlari mualliflar o'z sinov sharoitlarida o'lgan holda keltirilgan, shu sababli turli tadqiqotlar natijalarini bevosita taqqoslab bo'lmaydi.

3. Yong'inni erta aniqlash

Yong'inni erta aniqlash bo'yicha tadqiqotlar yagona chegaraviy qiymatdan bir nechta signallarni birgalikda tahlil qilishga, faqat issiqlik yoki tutun datchiklaridan esa videokameralardan foydalanishga o'tdi. Har ikki yo'nalish bir maqsadni ko'zlaydi: signalni ertaroq berish va yolg'on signallarni kamaytirish.

3.1. Ko'p datchikli tizimlar va yolg'on signallarni ajratish

Bir nechta yong'in belgisini birgalikda tahlil qilish yondashuvi bugungi kunda yaxshi asoslangan. D. Gottuk va hammualliflari is gazi – uglerod monoksidi (CO) konsentratsiyasi va tutun zichligini bitta signal algoritmda birlashtirib, ionizatsion va fotoelektrik datchiklarga nisbatan yolg'on signallar kamayganini hamda javob tezlashganini qayd etgan [8]. J. Milke va hammualliflari bu yondashuvni rivojlantirib, harorat, tutun zichligi, karbonat angidrid (CO₂) va boshqa gazlar asosida alangali yonish, tutab yonish va yolg'on signal manbalarini farqlovchi algoritmlarni ishlab chiqqan [9]. J. Fonollosa va hammualliflarining adabiyotlar tahliliga bag'ishlangan ishida bunday tizimlarda qo'llaniladigan kimyoviy datchiklar va tasniflash algoritmlari tizimlashtirilgan [10].

So'nggi tadqiqotlar bu yo'nalishning ham imkoniyatlarini, ham asosiy zaif tomonini ko'rsatadi. P. Vorwerk va hammualliflari kichik laboratoriya kamerasida yig'ilgan ma'lumotlar (CO, vodorod – H₂, uchuvchan organik birikmalar va qattiq zarrachalar) asosida tasniflagichni o'qitib, uni yong'in

signalizatsiyasiga oid Yevropa standarti EN 54 ga muvofiq to'liq o'lchamli sinov xonasida tekshirgan [11]. Qo'shimcha moslashtirilmagan model to'qqizta datchik joylashuvi bo'yicha o'rtacha 62 foiz holatda to'g'ri tasniflagan, eng past natijalar esa devor yonidagi datchiklarda qayd etilgan. Modelni sinov xonasi ma'lumotlarining taxminan 5 foizi bilan qayta o'qitish o'rtacha ko'rsatkichni 87 foizgacha oshirgan, biroq ma'lumot hajmi bundan ortganda model bitta joylashuvga haddan tashqari moslashib qolgan [11]. Baland binolar uchun bundan quyidagi xulosa kelib chiqadi: bir xonada o'qitilgan detektor mahalliy kalibrlash ma'lumotlarisiz boshqa xonada ham xuddi shunday ishlaydi deb hisoblab bo'lmaydi.

3.2. Yong'in va tutunni video orqali aniqlash

Video orqali aniqlash usuli binolarda ko'pincha allaqachon o'rnatilgan kameralardan foydalanadi. C. Jin va hammualliflari chuqur o'qitishga asoslangan video usullarni tahlil qilib, ularni uch vazifaga ajratgan: yong'inni tanib olish (kadrda yong'in bor-yo'qligi), obyektni aniqlash (yong'in kadrning qayerida) va segmentatsiya (qaysi piksellar yong'inga tegishli) [12]. Ularning tahliliy ishida asosiy hal etilmagan muammolar sifatida ma'lumotlar to'plamlarining cheklangan va notekis taqsimlangani, olov yoki tutunga o'xshash obyektlar keltirib chiqaradigan yolg'on signallar hamda modellarni real vaqtda ishlatish uchun zarur hisoblash quvvati ko'rsatilgan.

Videoning ikki xususiyati baland binolarda erta ogohlantirish uchun ayniqsa foydali. Birinchidan, u atrium va vestibul kabi katta hajmli xonalarda tutunni shipdagi datchikka yetib kelmasidan oldin aniqlay oladi. Ikkinchidan, u yong'in joyini aniqroq ko'rsatadi, an'anaviy signalizatsiya shleyfi esa faqat taxminiy zonani bildiradi. Shu bilan birga, zaif tomonlari ham bor: yoritilganlikning o'zgarishi, bug', chang va yuzalardagi yorug'lik aksi yolg'on signalga sabab bo'lishi mumkin, kamera esa devor ortini ko'rmaydi. Shu sababli videoni mustaqil signal manbai emas, balki birgalikdagi qaror qabul qilishdagi ma'lumot manbalaridan biri sifatida ko'rib chiqish maqsadga muvofiq.

3.3. Tizim uchun xulosalar

Keltirilgan dalillar nuqtaviy datchiklarni (tutun, issiqlik, CO) video bilan birlashtirish va signalni faqat mustaqil manbalar bir-birini tasdiqlagandagina

berishni qo'llab-quvvatlaydi. Shuningdek, boshqa mamlakatlarda yozilgan ochiq ma'lumotlar to'plamlari bilan cheklanmasdan, modellarni moslashtirish uchun O'zbekiston binolarida mahalliy ma'lumotlar yig'ish zarurligi ham ko'rinib turibdi.

4. Yong'in va tutun tarqalishini modellashtirish

Kompyuterda modellashtirish loyihachilarga, kelajakda esa real vaqtda ishlaydigan tizimlarga evakuatsiya yo'li xavfli holatga kelgunga qadar odamlarda qancha vaqt borligini aniqlash imkonini beradi. Bu borada standart vosita sifatida NIST tomonidan ishlab chiqilgan Fire Dynamics Simulator (FDS) dasturi qo'llaniladi. U yong'in ta'sirida yuzaga keladigan gaz oqimlarini hisoblash gidrodinamikasi (ingl. Computational Fluid Dynamics – CFD) usullari bilan modellashtiradi va odatda katta uyurmalar usuli (ingl. Large Eddy Simulation – LES) asosida ishlaydi [13]. FDS uchun boshlang'ich ma'lumotlarni tayyorlashda PyroSim grafik dasturi keng qo'llaniladi.

4.1. Zinapoya kataklarida mo'ri effekti

Zinapoya kataklari baland binodan chiqishning asosiy yo'li bo'lish bilan birga tutun tarqaladigan asosiy yo'l hamdir. J. Zhang va hammualliflari FDS yordamida yong'in chiqqan xonaga tutashgan 21 qavatli, balandligi 89,8 metr bo'lgan zinapoya katagini modellashtirgan [4]. Tutun asosan yong'in qavatidan yuqoriga harakatlangan, uning tezligi yong'inning issiqlik ajratish quvvati ortishi bilan oshgan, vertikal harorat esa balandlik ortishi bilan eksponensial qonuniyat bo'yicha kamaygan. Quvvati 1,5 MVt (megavatt) bo'lgan yong'in o'rganilgan qavatlarining aksariyatida zinapoya katagidagi eng yuqori haroratga taxminan 53–64 soniyada erishilgan [4]. Bu natijalar baland binolarda yong'inni aniqlash va evakuatsiya yo'lini tanlash bo'yicha qarorlar dastlabki bir-ikki daqiqada qabul qilinishi zarurligini ko'rsatadi.

Evakuatsiya uchun amaliy xulosa aniq: yong'in qavatidan yuqoridagi zinapoya foydalanish uchun yaroqsiz holga kelishi mumkin, undan uzoqroqdagi zinapoyalar esa xavfsiz qolishi mumkin. Qaysi zinapoyaga tutun kirganini biladigan yo'naltirish tizimi odamlarni boshqa yo'lga yo'naltira oladi, statik belgi esa bunga qodir emas.

4.2. ASET va RSET mezonlari

Natijaga asoslangan loyihalash usuli ikki vaqt ko'rsatkichini taqqoslaydi. Xavfsiz evakuatsiya uchun mavjud vaqt (ingl. Available Safe Egress Time – ASET) yong'in boshlanganidan evakuatsiya yo'lidagi sharoit inson uchun xavfli holga kelgunga qadar davom etadi. Xavfsiz evakuatsiya uchun zarur vaqt (ingl. Required Safe Egress Time – RSET) esa yong'in boshlanganidan odamlar xavfsiz joyga yetib borgunga qadar davom etadi. Agar ASET yetarli zaxira bilan RSET dan katta bo'lsa, loyiha maqbul hisoblanadi. ASET tushunchasini L. Cooper ikki zonali yong'in modeli asosida taklif etgan [14]. Sharoitning xavfli holga kelgani odatda harorat, ko'rinish masofasi va zaharli gazlar ta'siri bo'yicha ISO 13571 kabi xalqaro standartlarga muvofiq baholanadi [15].

RSET yong'inni aniqlash vaqti, harakat boshlangunga qadar o'tadigan vaqt va harakat vaqtining yig'indisidan iborat. Erta aniqlash birinchi qo'shiluvchini, samarali yo'naltirish esa qolgan ikkitasini qisqartiradi. Shu sababli ASET/RSET mezoni 6-bo'limda taklif etilgan tizim uchun tabiiy baholash ko'rsatkichi hisoblanadi: har bir qatlam ushbu ikki vaqt o'rtasidagi zaxirani qanchalik oshirishi bilan baholanishi kerak.

4.3. Modellashtirishning cheklovlari

CFD natijalari hisoblash to'ringing o'lchami, yong'in quvvati bo'yicha qabul qilingan farazlar va chegaraviy shartlarga bog'liq. Butun bino uchun FDS hisob-kitobi esa real vaqtda foydalanish uchun juda ko'p vaqt talab qiladi. Shu sababli real vaqtda ishlaydigan tizimlarda odatda oldindan hisoblangan ssenariylar kutubxonasi yoki soddalashtirilgan modellar qo'llaniladi va ular hodisa paytida datchik ko'rsatkichlariga moslashtiriladi. Aniqlik va tezlik o'rtasidagi bu murosa har qanday raqamli egizakni loyihalashda asosiy masalalardan biridir.

5. Evakuatsiyani modellashtirish va dinamik yo'naltirish

Evakuatsiya bo'yicha tadqiqotlar taklif etilayotgan tizim uchun zarur bo'lgan uchta yechimni beradi: RSET ni baholaydigan modellar, sharoit o'zgarishiga qarab marshrut tanlaydigan algoritmlar hamda odamlar dinamik belgilarga amal qiladimi degan savolga javob beruvchi dalillar.

5.1. Evakuatsiya modellari

E. Kuligowski va hammualliflari 25 dan ortiq kompyuter evakuatsiya modelini tahlil qilib, ularni qarama-qarshi oqim, chiqishning to'silishi, yong'inning odamlar xatti-harakatiga ta'siri, zaharlanish, guruh bo'lib harakatlanish, sekin harakatlanuvchi odamlar, evakuatsiya boshlanishidagi kechikish, liftidan foydalanish va marshrut tanlash kabi xususiyatlar bo'yicha tasniflagan [16]. Amaliyotda Pathfinder kabi agentga asoslangan modellashtirish dasturlari keng qo'llaniladi. Olomon harakati darajasida D. Helbing va hammualliflarining "ijtimoiy kuchlar" modeli vahima chiqish joylarida tiqilinch hosil qilishini va harakatni tezlashtirishga urinish evakuatsiyani nima uchun sekinlashtirishi mumkinligini ko'rsatgan [17]. Baland binolar uchun eng muhim jihatlar – zinapoyalardagi tiqilinch, zinapoya maydonchalarida oqimlarning qo'shilishi va tutun sharoitida marshrut tanlash.

5.2. Dinamik marshrutni rejalashtirish

Dinamik yo'naltirishda bino graf ko'rinishida ifodalanadi, uning qirralari (yo'l qismlari) narxi esa yong'in sharoitiga qarab o'zgarib boradi. Bunday tarmoqda eng maqbul yo'l odatda ikki algoritm bilan topiladi. Dijkstra (Deykstra) algoritmi – niderlandiyalik olim E. Deykstra 1959-yilda taklif etgan usul bo'lib, boshlang'ich nuqtadan barcha yo'nalishlar bo'yicha bosqichma-bosqich hisoblab, eng kam "narx"ga ega yo'lni topadi. A* ("A-yulduz") algoritmi esa Dijkstra usulining takomillashtirilgan shakli bo'lib, qidiruvni chiqish tomon yo'naltiradi va natijani tezroq beradi. Yong'in sharoitida yo'l qismining "narxi" uning uzunligi bilan birga undagi tutun, harorat va zaharli gazlar darajasini ham hisobga oladi. 1-jadvalda ikkita namunaviy yondashuv taqqoslangan.

1-jadval. Dinamik marshrut rejalashtirish usullarining taqqoslanishi

Tadqiqot	Algoritm	Xavf omillari	Sinov doirasi	E'lon qilingan natija
Guan va boshq., 2023 [18]	Takomillashtirilgan Dijkstra algoritmi, ikki mezonli (xavf + yo'l uzunligi)	CO, HCN, harorat, ko'rinish masofasi, tiqilinch	Ko'p chiqishli bino yong'ini, kompyuter modeli	Yuqori xavfli hududlarni chetlab o'tib, yo'l uzunligini cheklagan; an'anaviy Dijkstra algoritmidan tezroq ishlagan
Bai va boshq., 2025 [19]	Xavf va yo'nalish koeffitsiyentlari qo'shilgan A* algoritmi	PyroSim dasturida hisoblangan harorat, CO, kislorod, ko'rinish masofasi	Metro bekati platformasi, ikki o'lchamli to'r	Har bir odam yo'lidagi xavf taxminan 70 foizga kamaygan, yo'llar esa uzaygan

Har ikki yondashuvda ikki umumiy xususiyat bor. Birinchidan, xavf ASET ni hisoblashda foydalaniladigan parametrlar orqali miqdoriy baholanadi, yuqori xavfli kataklar esa o'tib bo'lmaydigan deb hisoblanadi. Ikkinchidan, W. Guan va hammualliflari ham, J. Bai va hammualliflari ham o'z usullarini faqat kompyuter modelida sinab ko'rgan. J. Bai va hammualliflari o'z modellari ikki o'lchamli ekanini hamda zinapoya kataklari, liftlar va olomon harakatini hisobga olmasligini ta'kidlaydi [19]. Holbuki aynan shu elementlar baland binolarda evakuatsiya muvaffaqiyatini belgilaydi.

5.3. Dinamik chiqish belgilari

Marshrut odamlar unga amal qilgandagina foyda beradi. E. Galea va hammualliflari ishlab chiqqan faol dinamik belgilar tizimi (ingl. Active Dynamic Signage System – ADSS) standart chiqish belgisiga miltillovchi yashil strelka hamda yaroqsiz bo'lib qolgan yo'llar uchun qizil "chiqish yo'q" holatini qo'shadi. To'liq miqyosli sinovda bu tizim belgilarni payqagan va ulardan foydalangan odamlar ulushini sezilarli darajada oshirgan, oddiy belgilarni esa odamlarning atigi 38 foizga yaqini payqagan [6]. Keyingi sinovda tizimning takomillashtirilgan varianti baholangan [20].

L. Filippidis va hammualliflari xuddi shu g'oyani murakkab tuzilishli binoda building EXODUS dasturi yordamida modellashtirgan. Model farazlari doirasida oddiy belgilarni dinamik belgilar bilan almashtirish umumiy evakuatsiya vaqtini 18 foizga, tiqilinchni 36 foizga va bosib o'tiladigan masofani 12 foizga qisqartirgan [21]. Bu raqamlar bitta bino uchun olingan model natijalari bo'lib, ularni umumlashtirib bo'lmaydi, biroq ular amaliy sinovdan o'tkazishga arziydigan samara ko'lamini ko'rsatadi.

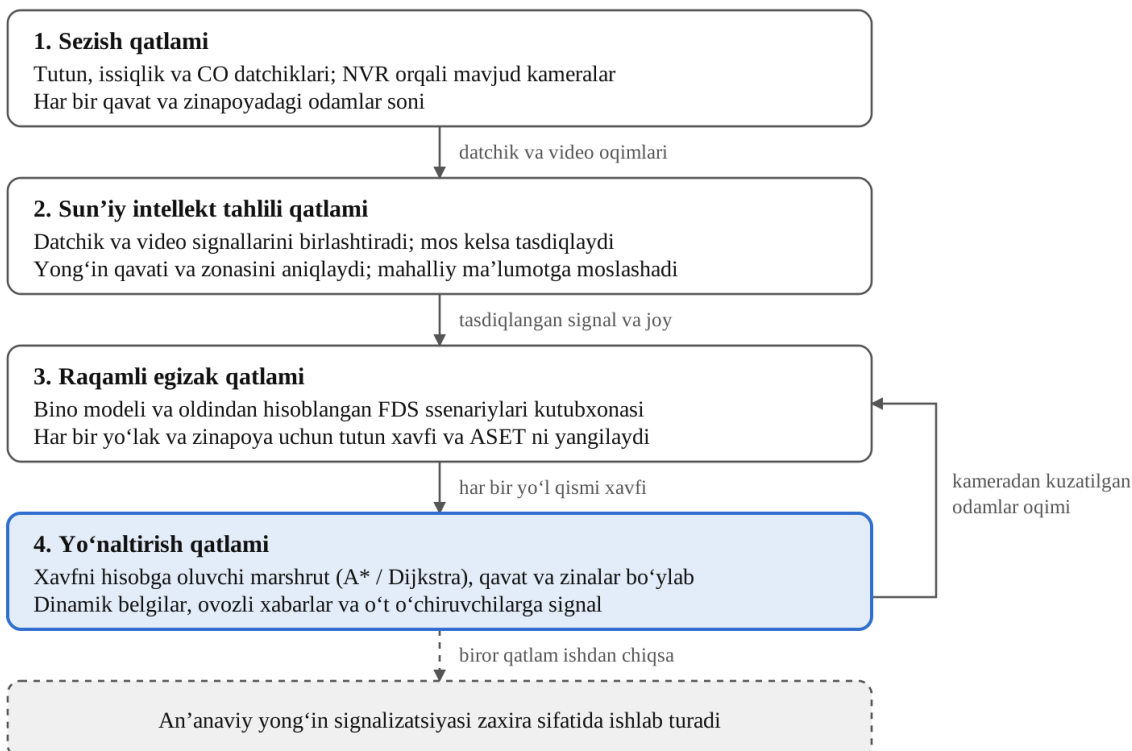
Umuman olganda, dalillar marshrut algoritmi va chiqish belgilarini yagona tizim sifatida ishlab chiqish zarurligini ko'rsatadi: agar marshrutni ko'rsatuvchi belgi payqalmasa, to'g'ri tanlangan marshrut ham foyda bermaydi.

6. Taklif etilayotgan integratsiyalashgan tizim

Maqolada to'rt qatlamli arxitektura taklif etiladi: unda har bir qatlam keyingi qatlamni ma'lumot bilan ta'minlaydi, yo'naltirish qatlamida kuzatilgan ma'lumotlar esa raqamli egizakka qaytariladi (1-rasm). Tizim ko'rib chiqilgan dalillarga asoslanadi: birlashtirilgan aniqlash (3-bo'lim), modellashtirishga

tayangan xavf bahosi (4-bo'lim) va dinamik belgilar bilan birga ishlaydigan marshrutlash (5-bo'lim).

To'rt qatlam datchik ma'lumotlarini jonli evakuatsiya yo'llariga aylantiradi



1-rasm. Taklif etilayotgan tizimning tuzilishi.

Ma'lumotlar datchiklardan chiqish belgilari tomon pastga uzatiladi, kuzatilgan odamlar harakati esa raqamli egizakni aniqlashtirish uchun yuqoriga qaytariladi. Mavjud yong'in signalizatsiyasi butun jarayon davomida ishlashda davom etadi.

1-qatlam – Sezish. Tutun, issiqlik va CO ni aniqlovchi nuqtaviy datchiklar videokameralar bilan birgalikda ishlaydi. O'zbekistondagi ko'plab jamoat va tijorat binolarida videokuzatuv yozuvlari allaqachon tarmoq videoregistratorlarida (ingl. Network Video Recorder – NVR) saqlanadi, shu sababli video ma'lumotlarni yangi uskuna o'rnatmasdan mavjud infratuzilmadan olish mumkin. Kamera yordamida odamlarni sanash har bir qavat va zinapoyadagi odamlar sonini baholash imkonini beradi.

2-qatlam – Sun’iy intellekt tahlili. Bu qatlam datchik va video signallarini birlashtiradi hamda mustaqil manbalar bir-birini tasdiqlagandagina signal beradi. Bu yondashuv bir nechta yong’in belgisini birgalikda tahlil qilish bo’yicha tadqiqotlar bilan asoslangan [8, 9]. Natijada yong’in chiqqan qavat va zona aniqlanadi. Modellar avval ochiq ma’lumotlar to’plamlarida o’qitiladi, so’ngra P. Vorwerk va hammualliflari taklif etgan bilimni ko’chirish yondashuviga muvofiq oz miqdordagi mahalliy ma’lumotlar bilan moslashtiriladi [11].

3-qatlam – Raqamli egizak. Binoning raqamli modeli uning geometriyasini va oldindan hisoblangan FDS ssenariylari kutubxonasini saqlaydi [13]. Hodisa paytida real vaqtdagi ko’rsatkichlar asosida eng yaqin ssenariy tanlanadi va moslashtiriladi, natijada har bir yo’lak va zinapoya qismi uchun yangilangan xavf darajasi va ASET qiymati olinadi. Y. Ding va hammualliflari videotasvirda odamlarni real vaqtda aniqlovchi YOLOv4 neyron tarmog’i va har bir odamni kadrda kadrda kuzatib boruvchi DeepSORT algoritmi yordamida videokameralar orqali evakuatsiya qilinayotgan odamlarni kuzatib boruvchi shunga o’xshash raqamli egizakni yaratgan [22]. X. Liu va hammualliflari o’ta baland binolarda vertikal evakuatsiya uchun raqamli egizak konsepsiyasini taklif etgan [23], J. Tan va hammualliflari esa bino ichidagi yong’inlar uchun raqamli egizakni marshrut topish algoritmi bilan bog’lagan [24].

4-qatlam – Yo’naltirish. Zinapoya kataklarini ham hisobga oladigan, xavf darajasini inobatga oluvchi A* yoki Dijkstra turidagi marshrut algoritmi [18, 19] odamlarni evakuatsiya yo’llari bo’yicha taqsimlaydi va zinapoyalar o’rtasidagi yuklamani muvozanatlaydi. Uning natijalari “chiqish” va “chiqish yo’q” holatlariga ega dinamik belgilarni [6, 20], ovozli xabarlarni boshqarish hamda yetib kelayotgan o’t o’chiruvchilarga vaziyat haqida qisqacha ma’lumot berish uchun ishlatiladi.

Zaxira tizim. An’anaviy yong’in signalizatsiyasi va statik belgilar to’liq ishlashda davom etadi. Agar biror qatlam ishdan chiqsa yoki uning natijalari ishonchsiz bo’lsa, yo’naltirish ShNQ 2.01.02-04 talablariga [7] mos standart holatga qaytadi. Bu tamoyil tizimning normativ jihatdan tan olinishi uchun muhim ahamiyatga ega.

7. Muhokama: ilmiy bo'shliqlar va tekshirish rejasi

Ko'rib chiqilgan ishlar intellektual evakuatsiya tizimining har bir tarkibiy qismi u yoki bu shaklda mavjudligini ko'rsatadi. Biroq bu qismlarning baland binolarda birgalikda samarali ishlashi hali isbotlanmagan. Bu borada beshta asosiy ilmiy bo'shliq ajralib turadi.

- 1. Vertikal evakuatsiya.** Dinamik yo'naltirish bo'yicha tadqiqotlarning ko'pchiligi ikki o'lchamli [19], raqamli egizakka asoslangan yo'naltirish tadqiqotlari esa asosan gorizontaal harakat ustun bo'lgan past binolarga qaratilgan [23]. Zinapoya tanlash, zinapoya maydonchalarida oqimlarning qo'shilishi va shaxtalarda mo'ri effekti ta'sirida harakatlanuvchi tutun yetarlicha modellashtirilmagan.
- 2. Aniqlash modellarini boshqa muhitga ko'chirish.** Ko'p datchikli tasniflagichlar yangi xonaga ko'chirilganda, ayniqsa devor yonida, aniqligini yo'qotadi [11], video ma'lumotlar to'plamlari esa asosan Markaziy Osiyodan tashqarida yozilgan [12]. Shu sababli mahalliy ma'lumotlar yig'ish bunday tizimlarni O'zbekistonda joriy etishning dastlabki sharti hisoblanadi.
- 3. Hisoblash tezligi.** To'liq CFD hisob-kitobi hodisa paytida foydalanish uchun juda sekin. Shuning uchun real vaqtda ishlaydigan tizimlarga oldindan hisoblangan ssenariylar kutubxonasi yoki soddalashtirilgan modellar kerak, ularning aniqligi esa miqdoriy baholanishi lozim.
- 4. Odamlarning ko'rsatmalarga amal qilishi.** Dinamik belgilar sinovlarda chiqishni payqash darajasini oshiradi [6, 20], biroq turar joy binolarida, jumladan kekxa va nogironligi bo'lgan aholi orasida real tutun va ruhiy zo'riqish sharoitidagi xatti-harakatlar kam o'rganilgan. Grenfell Tower yong'ini bo'yicha tergov materiallarida harakatlanish imkoniyati cheklangan aholi uchun shaxsiy evakuatsiya rejalariga alohida e'tibor qaratilgani ham buni tasdiqlaydi [5].
- 5. Ishonchlilik va normativ baza.** Noto'g'ri ko'rsatma beradigan moslashuvchan tizim statik belgidan ham xavfliroq. Shu sababli har qanday amaliy joriy etishdan oldin xavfsiz holatga qaytish tamoyili, elektr ta'minoti va aloqa tarmog'ining zaxirasi hamda tizimni ShNQ 2.01.02-04 [7] doirasida tan olish tartibi ishlab chiqilishi zarur.

7.1. Taklif etilayotgan tekshirish rejasi

Taklif etilayotgan reja bosqichma-bosqich amalga oshiriladi: har bir bosqich keyingisi boshlanishidan oldin o'lchangan dalillar bilan yakunlanadi. Hech bir natija oldindan taxmin qilinmaydi.

1. **Aniqlash bo'yicha qiyosiy sinov.** O'zbekistondagi namunaviy binolarda nazorat ostida o'tkaziladigan sinov yong'inlari va yolg'on signal manbalari (ovqat pishirish, bug', chang) uchun tutun, issiqlik, CO va video ma'lumotlarini qayd etish. An'anaviy datchikka nisbatan aniqlash vaqti, yolg'on signallar va o'tkazib yuborilgan signallar ulushini aniqlash.
2. **Bino modeli.** Mavjud baland binolardan birining loyiha hujjatlari asosida FDS modelini yaratish va zinapoya katagiga tutash xonadagi yong'inni ham o'z ichiga olgan ssenariylar to'plamini hisoblash. Har bir evakuatsiya yo'li uchun ASET qiymatini aniqlash.
3. **Evakuatsiya usullarini taqqoslash.** Agentga asoslangan modellashtirish dasturida bir xil ssenariy va bir xil aholi uchun statik yo'naltirishni dinamik marshrutlash bilan taqqoslash. RSET, zinapoyadagi eng yuqori odamlar zichligi va xavfli sharoitga tushib qolgan agentlar sonini aniqlash.
4. **Belgilar sinovi.** Etika komissiyasi ruxsati bilan bitta qavat yoki binoda dinamik belgilar ishtirokida oldindan e'lon qilingan o'quv mashg'uloti o'tkazish hamda belgilarni payqash va marshrutga amal qilish darajasini o'lchash.
5. **Tajriba-sinov integratsiyasi.** Aniqlash va yo'naltirish qatlamlarini cheklangan tajriba-sinov loyihasida birlashtirish. Bunda mavjud yong'in signalizatsiyasi hal qiluvchi tizim bo'lib qoladi.

Barcha bosqichlarda muvaffaqiyatning asosiy o'lchovi ASET va RSET o'rtasidagi vaqt zaxirasi (4.2-bo'lim) bo'lishi va u o'lchash noaniqligi bilan birga keltirilishi kerak.

8. Xulosa

Baland binolarda yong'inni erta aniqlash va moslashuvchan evakuatsiya uchun zarur vositalar mavjud, biroq ular asosan alohida-alohida, kompyuter modellarida va O'zbekistondan tashqarida sinovdan o'tkazilgan. Modellar mahalliy ma'lumotlar bilan moslashtirilsa, ko'p datchikli tizimlar va videoanalitika yong'inni ertaroq va kamroq yolg'on signal bilan aniqlay oladi. FDS dasturi va

ASET/RSET mezonni har qanday yechimni baholash uchun o'lganadigan asos bo'lib xizmat qiladi. Xavf darajasini hisobga oluvchi marshrut algoritmlari sharoit o'zgarishi bilan evakuatsiya yo'llarini qayta rejalashtira oladi, dinamik chiqish belgilari esa statik belgilarga qaraganda ko'proq payqaladi.

Asosiy hal etilmagan muammo vertikal evakuatsiya bilan bog'liq: mo'ri effekti ta'sirida tutun tarqalayotgan sharoitda odamlarni zinapoya kataklari orqali yo'naltirish. Maqolada taklif etilgan tizim sezish, sun'iy intellekt tahlili, modellashtirishga tayangan raqamli egizak va odamlarni yo'naltirish qatlamlarini birlashtiradi. Tekshirish rejasi esa saqlab qolingani hayotlar yoki tejalgan vaqt haqida biror xulosa chiqarishdan oldin har bir qatlamni O'zbekiston binolarida qanday sinash kerakligini belgilaydi. O'zbekistonda baland binolar qurilishining sur'atini hisobga olsak, ushbu yo'nalishdagi tadqiqotlar ham bino loyihachilari, ham ularni nazorat qiluvchi favqulodda vaziyatlar xizmatlari uchun dolzarb ahamiyatga ega.

Adabiyotlar ro'yxati

1. List of tallest buildings in Uzbekistan. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_in_Uzbekistan (murojaat sanasi: 06.10.2026).
2. Nest One. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nest_One (murojaat sanasi: 06.10.2026).
3. Kun.uz. Three major high-rise projects violate Tashkent's master plan. 21.06.2025. URL: <https://kun.uz/en/news/2025/06/21/three-major-high-rise-projects-violate-tashkents-master-plan>
4. Zhang J., Weng J., Zhou T., Ouyang D., Chen Q., Wei R., Wang J. Investigation on smoke flow in stairwells induced by an adjacent compartment fire in high rise buildings // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 7. 1431. doi:10.3390/app9071431.
5. Grenfell Tower Inquiry. Phase 2 Report. London, 04.09.2024.
6. Galea E.R., Xie H., Deere S., Cooney D., Filippidis L. An international survey and full-scale evacuation trial demonstrating the effectiveness of the active dynamic signage system concept // Fire and Materials. 2017. Vol. 41. P. 493–513.

7. ShNQ 2.01.02-04. Binolar va inshootlarning yong'in xavfsizligi. Shaharsozlik normalari va qoidalari. O'zbekiston Respublikasi.
8. Gottuk D.T., Peatross M.J., Roby R.J., Beyler C.L. Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms // Fire Safety Journal. 2002. Vol. 37. P. 381–394. doi:10.1016/S0379-7112(01)00057-1.
9. Milke J.A., Hulcher M.E., Worrell C.L., Gottuk D.T., Williams F.W. Investigation of multi-sensor algorithms for fire detection // Fire Technology. 2003. Vol. 39. P. 363–382. doi:10.1023/A:1025378100781.
10. Fonollosa J., Solórzano A., Marco S. Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: a review // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 2. 553. doi:10.3390/s18020553.
11. Vorwerk P., Kelleter J., Müller S., Krause U. Classification in early fire detection using multi-sensor nodes – a transfer learning approach // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 5. 1428. doi:10.3390/s24051428.
12. Jin C., Wang T., Alhusaini N., Zhao S., Liu H., Xu K., Zhang J. Video fire detection methods based on deep learning: datasets, methods, and future directions // Fire. 2023. Vol. 6, No. 8. 315. doi:10.3390/fire6080315.
13. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6-nashr. NIST Special Publication 1019, 2013.
14. Cooper L.Y. A concept for estimating available safe egress time in fires // Fire Safety Journal. 1983. Vol. 5, No. 2. P. 135–144.
15. ISO 13571. Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti (ISO).
16. Kuligowski E.D., Peacock R.D., Hoskins B.L. A Review of Building Evacuation Models. 2-nashr. NIST Technical Note 1680, 2010.
17. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. 2000. Vol. 407. P. 487–490.
18. Guan W., Hou S., Yu G., Gong H., Guan S., Zhao J. Dynamic evacuation path planning for multi-exit building fire: bi-objective model and algorithm // Fire Technology. 2023. Vol. 59. P. 2853–2876. doi:10.1007/s10694-023-01448-x.

19. Bai J., Lv X., Nie L., Fang M. Evacuation route determination in indoor architectural environments based on dynamic fire risk assessment // Buildings. 2025. Vol. 15, No. 10. 1715. doi:10.3390/buildings15101715.
20. Galea E.R., Xie H., Deere S., Cooney D., Filippidis L. Evaluating the effectiveness of an improved active dynamic signage system using full scale evacuation trials // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. P. 908–917.
21. Filippidis L., Xie H., Galea E.R., Lawrence P.J. Exploring the potential effectiveness of dynamic and static emergency exit signage in complex spaces through simulation // Fire Safety Journal. 2021. Vol. 125. 103404.
22. Ding Y., Zhang Y., Huang X. Intelligent emergency digital twin system for monitoring building fire evacuation // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 77. 107416. doi:10.1016/j.jobbe. 2023.107416.
23. Liu X., Mo C., Ji Y. A digital twin conceptual framework of intelligent evacuation guidance systems for super high-rise buildings. Singapur: Springer, 2024.

Qisqartmalar ro‘yxati

A* – “A-yulduz” algoritmi – yo‘llar tarmog‘ida maqsad tomon yo‘naltirilgan holda eng qisqa yoki eng xavfsiz yo‘lni topuvchi usul

ADSS – Active Dynamic Signage System – faol dinamik chiqish belgilari tizimi

ASET – Available Safe Egress Time – xavfsiz evakuatsiya uchun mavjud vaqt (yong‘in boshlanganidan yo‘ldagi sharoit inson uchun xavfli bo‘lgunga qadar o‘tadigan vaqt)

CFD – Computational Fluid Dynamics – hisoblash gidrodinamikasi (gaz va tutun oqimlarini kompyuterda hisoblash usuli)

CO / CO₂ – uglerod monoksidi (is gazi) / karbonat angidrid

Dijkstra – Deykstra algoritmi – niderlandiyalik olim E. Deykstra taklif etgan, ikki nuqta orasidagi eng qisqa (eng kam “narx”li) yo‘lni topuvchi usul

EN 54 – yong‘in signalizatsiyasi tizimlariga oid Yevropa standartlari turkumi

FDS – Fire Dynamics Simulator – AQSh NIST instituti ishlab chiqqan, yong‘in va tutun tarqalishini modellashtiruvchi dastur

HCN – vodorod sianid – yong‘inda ajraladigan zaharli gaz

ISO – International Organization for Standardization – Xalqaro standartlashtirish tashkiloti



LES – Large Eddy Simulation – katta uyurmalar usuli (turbulent oqimni hisoblash usuli)

NIST – National Institute of Standards and Technology – AQSh Milliy standartlar va texnologiyalar instituti

NVR – Network Video Recorder – tarmoq videoregistratori

PRISMA – tizimli adabiyotlar tahlilini bajarish va bayon qilish bo'yicha xalqaro qoidalar

RSET – Required Safe Egress Time – xavfsiz evakuatsiya uchun zarur vaqt (yong'in boshlanganidan odamlar xavfsiz joyga yetib borgunga qadar o'tadigan vaqt)

ShNQ – shaharsozlik normalari va qoidalari

YOLO – You Only Look Once – videotasvirda obyektlarni real vaqtda aniqlovchi neyron tarmoq