ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

SHAHAR YO‘NALISHLI AVTOBUSLAR HARAKAT MUNTAZAMLIGINI TA’MINLASHDA REAL VAQT MA’LUMOTLARIGA ASOSLANGAN BOSHQARUV MODELINI TAKOMILLASHTIRISH

M. D. Ikromov

Toshkent davlat transport universiteti

Annotatsiya. Mazkur maqolada shahar yo‘nalishli avtobuslar harakat muntazamligini ta’minlash uchun real vaqt ma’lumotlariga tayanuvchi integrallashgan boshqaruv modeli taklif etiladi. Tadqiqotning ilmiy maqsadi reja intervali, haqiqiy headway, bekatdagi to‘planish, yo‘lovchi yuklanishi, bekatdagi turish vaqti hamda oraliq uchastkalardagi harakat tezligi to‘g‘risidagi operativ axborotni yagona boshqaruv konturiga birlashtirishdan iborat. Maqolada avval real vaqtli monitoring va qisqa muddatli prognozlash modullari shakllantirildi, so‘ng ular headway barqarorligini saqlashga qaratilgan optimallashtirish mezoni bilan bog‘landi. Modelning markazida AVL/GPS, APC va dispatching jurnalidan olinadigan ma’lumotlar yordamida $x_t = (h_t, q_t, l_t, d_t, \tau_t)$ holat vektori yangilanadigan, keyingi 1-3 qadam uchun prognoz tuziladigan va nazorat nuqtasida ushlab turish, tezlikni moslashtirish hamda jo‘natish vaqtini tuzatish bo‘yicha qaror qabul qilinadigan receding-horizon tipidagi yondashuv turadi. Tadqiqotda nazariy tahlil, transport jarayonlarini matematik modellashtirish, ssenariyli hisob-kitob va sintetik-amaliy sinov paneli usullaridan foydalanildi. Namoyish tajribasi 20 ta bekatli, 18,4 km uzunlikdagi va 180 minutlik pik davrga ega shahar yo‘nalishi uchun tuzildi. Reja intervali 8 minut deb olindi va real amaliyotga yaqin bo‘lgan talab, tirbandlik va bekatdagi almashinuv parametrlariga asoslangan raqamli tajriba o‘tkazildi. Hisob-kitoblar bazaviy holat, faqat jadvalga asoslangan nazorat, faqat headway nazorati va takomillashtirilgan integrallashgan model bo‘yicha taqqoslandi. Natijalar takomillashtirilgan model muntazamlik indeksini 0,71 dan 0,88 gacha oshirishini, o‘rtacha kutish vaqtini 6,9 minutdan 4,3 minutgacha kamaytirishini va bunching ulushini 14,8 foizdan 4,9 foizgacha pasaytirishini ko‘rsatdi. Shuningdek, bekatdagi ortiqcha to‘planish pasayib, turish vaqti profili tekislandi. Taklif etilgan yondashuvning ilmiy yangiligi shundan iboratki, unda muntazamlikni boshqarish faqat bitta headway ko‘rsatkichi bilan cheklanmay, balki talab prognozi, yo‘lovchi navbati, yuklanish va oraliq uchastka tezligi bilan bog‘langan ko‘p omilli real vaqt nazorati sifatida talqin qilinadi. Maqola natijalari shahar jamoat transporti operatorlari uchun marshrut darajasida monitoring, tahlil, operativ boshqaruv va keyingi avtomatlashtirilgan dispatching tizimlarini qurishda foydalanish mumkin.

ISSN 3030-3907

Kalit so‘zlar: shahar avtobusi, real vaqt ma’lumoti, AVL, APC, headway nazorati, dispatching, muntazamlik indeksi, bunching, kutish vaqti, optimallashtirish.

Аннотация. В данной статье предлагается интегрированная модель управления, основанная на данных реального времени, для обеспечения регулярности движения городских маршрутных автобусов. Научная цель исследования заключается в объединении в единый контур управления оперативной информации о плановом интервале движения, фактическом headway, скоплении пассажиров на остановках, загрузке автобуса, времени стоянки на остановках и скорости движения на межостановочных участках. В статье сначала сформированы модули мониторинга в реальном времени и краткосрочного прогнозирования, после чего они были связаны с критерием оптимизации, направленным на поддержание стабильности headway. В центре модели находится подход типа receding horizon, при котором с использованием данных AVL/GPS, APC и диспетчерского журнала обновляется вектор состояния x_t, строится прогноз на следующие 1-3 шага, а в контрольной точке принимается решение об удержании, корректировке скорости и изменении времени отправления. В исследовании использованы методы теоретического анализа, математического моделирования транспортных процессов, сценарных расчетов и синтетико-прикладной тестовой панели. Демонстрационный эксперимент был построен для городского маршрута с 20 остановками, длиной 18,4 км и пиковым периодом продолжительностью 180 минут. Плановый интервал движения был принят равным 8 минутам, а численный эксперимент проведен на основе параметров спроса, заторов и остановочного обмена, близких к реальной практике. Расчеты были сопоставлены по четырем вариантам: базовое состояние, контроль только по расписанию, контроль только по headway и усовершенствованная интегрированная модель. Результаты показали, что усовершенствованная модель повышает индекс регулярности с 0,71 до 0,88, снижает среднее время ожидания с 6,9 до 4,3 минуты и уменьшает долю bunching с 14,8 % до 4,9 %. Кроме того, уменьшается избыточное скопление пассажиров на остановках и выравнивается профиль времени стоянки. Научная новизна предложенного подхода состоит в том, что управление регулярностью интерпретируется не только через один показатель headway, а как многофакторный контроль в реальном времени, связанный с прогнозом спроса, очередью пассажиров, загрузкой и скоростью движения на межостановочных участках. Результаты статьи могут быть использованы операторами городского общественного транспорта для мониторинга,

ISSN 3030-3907

анализа, оперативного управления на уровне маршрутов, а также при построении последующих автоматизированных диспетчерских систем.
Ключевые слова: городской автобус, данные реального времени, AVL, APC, контроль headway, диспетчеризация, индекс регулярности, bunching, время ожидания, оптимизация.
Abstract. This article proposes an integrated control model based on real-time data for maintaining the service regularity of urban bus routes. The scientific objective of the study is to combine operational information on scheduled headway, actual headway, stop crowding, passenger load, dwell time, and segment travel speed into a unified control framework. The paper first develops real-time monitoring and short-term forecasting modules, and then links them to an optimization criterion aimed at preserving headway stability. At the core of the model is a receding-horizon approach in which the state vector x_t is updated using AVL/GPS, APC, and dispatching log data, forecasts are generated for the next 1–3 steps, and control decisions are made at the checkpoint regarding holding, speed adjustment, and departure time correction. The study employs theoretical analysis, mathematical modeling of transport processes, scenario-based calculations, and a synthetic-applied test panel. The demonstration experiment was designed for an urban route with 20 stops, a length of 18.4 km, and a 180-minute peak period. The scheduled headway was set at 8 minutes, and the numerical experiment was conducted using demand, congestion, and stop-exchange parameters close to real operating conditions. The calculations were compared across four cases: baseline operation, schedule-based control only, headway-based control only, and the improved integrated model. The results showed that the improved model increases the regularity index from 0.71 to 0.88, reduces average waiting time from 6.9 minutes to 4.3 minutes, and decreases the share of bunching from 14.8% to 4.9%. In addition, excessive stop crowding declines and the dwell-time profile becomes more even. The scientific novelty of the proposed approach lies in the fact that service regularity control is not limited to a single headway indicator, but is interpreted as a multi-factor real-time control problem linked to demand forecasting, passenger queue length, vehicle load, and segment speed. The results of the paper can be used by urban public transport operators for route-level monitoring, analysis, operational control, and the development of further automated dispatching systems.
Keywords: urban bus, real-time data, AVL, APC, headway control, dispatching, regularity index, bunching, waiting time, optimization.

KIRISH.

ISSN 3030-3907

Shahar jamoat transporti tizimida xizmat sifati ko‘p hollarda aynan harakat muntazamligi orqali seziladi. Yo‘lovchi uchun marshrutdagi eng muhim tajriba - transport vositasining kutilgan vaqt oralig‘ida kelishi, bekatda ortiqcha kutishning yuzaga kelmasligi va bir nechta avtobuslarning bir-biriga yopishib kelmasligidir. Shu sababli muntazamlik ko‘rsatkichi faqat ekspluatatsion parametr emas, balki xizmat ishonchliligi, yo‘lovchi oqimi barqarorligi va operator daromadining ham muhim determinanti hisoblanadi.

Yuqori chastotali shahar yo‘nalishlarida klassik jadvalga tayanish ko‘pincha yetarli bo‘lmaydi. Buning sababi shundaki, tirbandlik, svetofor sikllari, yo‘lovchilar oqimidagi keskin tebranishlar, bekatlarda almashinuvning notekisligi va ba’zan haydovchi xulq-atvorining farqi reja asosida berilgan intervalni tezda buzib yuboradi. Bir avtobus kichik kechikish olsa, u keyingi bekatlarda ko‘proq yo‘lovchini yig‘adi, bekatda uzoqroq turadi va ortda kelayotgan avtobus bilan orasidagi masofa yanada qisqaradi. Natijada bus bunching deb ataladigan o‘z-o‘zini kuchaytiruvchi salbiy aloqa paydo bo‘ladi.

O‘zbekiston transport siyosatida ham jamoat transporti xizmatini yaxshilash, avtobus parkini yangilash va boshqaruv sifatini oshirish alohida ustuvor vazifa sifatida belgilangan. PF-60-son Farmonda transport xizmatlarining samaradorligi va boshqaruv tizimini modernizatsiya qilish vazifalari qayd etilgan [1]. RP-2724-son qaror esa shaharlarda va qishloq joylarda yo‘lovchi avtobus tashish tizimini takomillashtirish, xizmat sifatini oshirish va ekspluatatsiya intizomini mustahkamlashga qaratilgan [2]. Bu hujjatlar muntazamlikni oshirishni amaliy boshqaruv muammosi sifatida ko‘rishga asos beradi.

Xalqaro tajriba shuni ko‘rsatadiki, muntazamlik masalasi odatda uch bosqichda yechiladi: birinchidan, harakatning haqiqiy holatini aniq o‘lchash; ikkinchidan, bir necha daqiqa oldinga prognozlash; uchinchidan, aynan qayerda va qaysi kuch bilan aralashuv kerakligini aniqlash. Bu uchala bosqich uchun real vaqt ma’lumotlari hal qiluvchi ahamiyatga ega. Ayniqsa AVL/GPS signallari, APC yoki elektron to‘lov ma’lumotlari va markaziy dispatching jurnalini integratsiyalash nazoratning sezgirligi va aniqligini oshiradi.

Adabiyotlarda boshqaruvning bir nechta klassik usullari - terminalda ushlab turish, nazorat bekatlarida holding, tezlik bo‘yicha maslahat, signal prioriteti, stop-skipping va kooperativ bus-to-bus yondashuvlari o‘rganilgan [5]-[9]. Biroq ko‘plab amaliy tizimlarda boshqaruv mezoni faqat bitta o‘zgaruvchi, masalan, oldingi avtobus bilan intervalga bog‘lab qo‘yiladi. Bu esa talabning joriy holati, bekatdagi navbat uzunligi va yuklanish notekisligini ikkilamchi holatga tushirib qo‘yadi.

ISSN 3030-3907

Mazkur maqolada shu cheklovni bartaraf etuvchi integrallashgan real vaqt modeli ishlab chiqiladi. Taklif etilayotgan yondashuvda nazorat nuqtasida qabul qilinadigan qaror faqat h_i headway asosida emas, balki yo‘lovchi navbati q_j, yuklanish darajasi l_i, turish vaqti d_j va uchastkadagi kutilayotgan harakat vaqti τ_{ij} bilan birgalikda aniqlanadi. Shunday qilib, muntazamlik boshqaruvi operativ transport ma’lumotlarining ko‘p kanalli sintezi sifatida talqin qilinadi.

Maqolaning maqsadi shahar yo‘nalishli avtobuslar harakat muntazamligini ta’minlash uchun real vaqt ma’lumotlariga asoslangan va qisqa muddatli prognozlash bilan boyitilgan boshqaruv modelini ishlab chiqish, uning matematik asoslarini ko‘rsatish hamda namunaviy marshrut uchun hisob-kitob natijalari orqali samaradorligini baholashdan iborat. Shu maqsadga erishish uchun adabiyotlar tahlil qilinadi, holat vektori va nazorat mezoni aniqlanadi, yopiq ko‘rinishdagi holding formulasi keltirib chiqariladi va ssenariyli tajriba o‘tkaziladi.

MAVZU BO‘YICHA ILMIY ADABIYOTLAR SHARHI

Harakat muntazamligining buzilishi va bus bunching hodisasi ilk nazariy izohini Newell va Potts ishlarida olgan bo‘lib, unda kichik kechikishlar yo‘lovchi yig‘ilishining ortishi orqali yanada kuchayishi ko‘rsatilgan [3]. Ushbu g‘oya keyingi barcha boshqaruv modellari uchun nazariy nuqta bo‘lib xizmat qildi. Muntazamlik masalasining markazida ijobiy teskari aloqa yotadi: kechikkan avtobus ko‘proq talabni o‘ziga tortadi, bu esa uning keyingi kechikishini chuqurlashtiradi; ortdan kelayotgan avtobus esa kamroq talab tufayli tezlashib oldindagiga yaqinlashadi.

Keyingi bosqichda ekspluatatsion ishonchlilikni oshirishga qaratilgan usullar shakllandi. Turnquist hamda undan keyingi tadqiqotchilar intervalni nazorat nuqtalarida ushlab turish strategiyalarini taklif qildilar. Fu va Yang ishida threshold-based va one-headway / two-headway usullari tizimlashtirilib, real vaqt joylashuv ma’lumotlarining qo‘shimcha nazorat qiymati ko‘rsatildi [4]. Ularning natijasi shuni ko‘rsatdiki, ayniqsa oldingi va keyingi avtobuslar holati bir vaqtda hisobga olinganda kutish vaqti hamda interval dispersiyasi sezilarli kamayadi.

Daganzo tomonidan taklif etilgan headway-based adaptiv yondashuv yuqori chastotali yo‘nalishlar uchun muhim burilish yasadi [5]. Muallif schedule-based yondashuvlar yetarli slack talab qilishini, biroq amalda katta lokal buzilishlarni to‘liq yenga olmasligini ko‘rsatdi. Real vaqt headwayga asoslangan holda avtobusni nazorat nuqtasida ushlab turish orqali intervalni berilgan tolerantlik oralig‘ida saqlash va tijorat tezligini pasaytirmaslik mumkinligi isbotlandi. Keyinchalik Daganzo va Pilachowski bus-to-bus cooperation g‘oyasi yordamida bunday nazoratni yanada resilient ko‘rinishga keltirdilar [6].

ISSN 3030-3907

AVL va APC ma’lumotlarining ekspluatatsion tahlildagi roli alohida yo‘nalish sifatida rivojlandi. Mandelzys va Hellinga avtomatik joylashuv hamda yo‘lovchi hisoblagich ma’lumotlari asosida schedule adherence buzilishlarining manbalarini bekat kesimida aniqlash metodikasini taklif qildilar [7]. Ma, Ferreira va Mesbah AVL ma’lumotlari yordamida xizmat ishonchliligini o‘lchash uchun trip-level va line-level ko‘rsatkichlarni ishlab chiqdilar [8]. Bu ishlar real vaqt monitoring va boshqaruv modelini qurishda sifatli ma’lumot arxitekturasi zarurligini tasdiqlaydi.

Varga, Tettamanti va Kulcsar bus bunching va timetable reliability ni birgalikda ko‘radigan ko‘p maqsadli model predictive control yondashuvini taklif etdilar [9]. Ularning modeli tezlik profili, turish vaqti va headway maqsadlari orasida Pareto muvozanatini ko‘rsatadi. Mazkur yo‘nalish muntazamlikni faqat bosh intervalni ushlash emas, balki jadvalga sodiqlik, yo‘lovchi kutish va ekspluatatsion xarajatlar orasidagi muvozanat sifatida ko‘rishga olib keldi.

Shu bilan birga amaliy tizimlarda kuzatiladigan bir qator muammolar hanuz to‘liq hal qilinmagan. Birinchidan, ko‘plab usullar faqat oldingi va keyingi avtobus bilan bog‘liq headwayga tayanganligi sababli bekatdagi navbat uzunligi, yuklanish yoki talabning kutilayotgan o‘sishini to‘liq hisobga olmaydi. Ikkinchidan, real vaqt ma’lumotlari mavjud bo‘lsa-da, ularni prognozlash va operativ aralashuvga bog‘laydigan integrallashgan kontur ko‘pincha zaif bo‘ladi. Uchinchidan, rivojlanayotgan shaharlar amaliyotida mavjud tizimlar ko‘pincha murakkab MPCni to‘liq joriy eta olmaydi; shuning uchun nisbatan sodda, ammo ko‘p omilli boshqaruv qoidasiga ehtiyoj mavjud.

Demak, adabiyotlar tahlili ikki muhim xulosaga olib keladi. Birinchisi, muntazamlikni boshqarishda real vaqt ma’lumotlariga tayangan adaptiv yondashuvlar schedule-only nazoratga qaraganda samaraliroq. Ikkinchisi, qo‘llanadigan boshqaruv mezonlari qanchalik ko‘p omilni qamrasa, operator qarori shunchalik foydali bo‘ladi. Mazkur maqolaning farqli jihati aynan shu nuqtada namoyon bo‘ladi: unda headway, yo‘lovchi navbati, yuklanish va prognoz qilingan turish hamda harakat vaqti bitta operativ funksionalga birlashtiriladi.

$$E[W]=\frac{E[h^2]}{2E[h]}=\frac{Var(h)+\left(E[h]\right)^2}{2E[h]}$$

Ushbu klassik natija shuni ko‘rsatadiki, o‘rtacha headway o‘zgarmasa ham, uning dispersiyasi kamaytirilsa kutish vaqti ham pasayadi. Demak, boshqaruvning birinchi vazifasi headwayning tebranish amplitudasini pasaytirishdir.

$$R_h=1-\frac{1}{nh^*}\sum_{i=1}^{n}\left|h_i-h^*\right|$$

ISSN 3030-3907

Maqolada muntazamlikning asosiy ko‘rsatkichi sifatida R_h headway muntazamlik indeksi qabul qilinadi. Bu yerda h^* - reja intervali, h_i - ketma-ket avtobuslar orasidagi haqiqiy interval. R_h birlikka yaqinlashgan sari xizmat barqarorroq bo‘ladi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI VA MA’LUMOTLAR ARXITEKTURASI.

Taklif etilayotgan model real vaqt monitoring, qisqa muddatli prognozlash va operativ boshqaruv qaroridan iborat uch qatlamli arxitekturaga ega. Birinchi qatlam ma’lumotlarni yig‘adi va tozalaydi. Ikkinchi qatlam yaqin kelajak uchun talab, turish vaqti va harakat vaqtini bashorat qiladi. Uchinchi qatlam esa nazorat nuqtasida avtobusni ushlab turish, jo‘natishni tuzatish yoki tezlik bo‘yicha maslahat berish qarorini qabul qiladi.

Maqoladagi sinov paneli real shahar amaliyotiga yaqin sintetik ma’lumotlar asosida qurildi. Bunday yondashuv ilmiy halollikni saqlaydi: ya’ni natijalar real operator ma’lumoti deb ko‘rsatilmaydi, biroq parametrlari haqiqiy ekspluatatsion diapazonlarga moslab tanlangan raqamli ssenariy sifatida talqin qilinadi. Ushbu yondashuv model tuzilmasi va sezgirligini ko‘rsatish uchun yetarli.

Tajriba yo‘nalishi uchun quyidagi shartli parametrlar qabul qilindi: yo‘nalishning bir tomonga uzunligi 18,4 km, bekatlar soni 20 ta, pik davr 07:00-10:00 oralig‘idagi 180 minut, reja intervali 8 minut, aylanish davri 126 minut, faol park 16 ta avtobus. O‘rtacha operatsion tezlik 18-22 km/soat oralig‘ida, bekatdagi almashinuv vaqti esa talabga qarab 20 sekunddan 70 sekundgacha o‘zgaradi.

Monitoring uchun kamida to‘rtta ma’lumot oqimi zarur deb qaraladi: AVL/GPS pingi, APC yoki to‘lov tizimidan yo‘lovchi almashinuvi, reja jadvali va dispatching jurnali, shuningdek, tirbandlik yoki hodisa to‘g‘risidagi tashqi signal. Ushbu oqimlar bekat identifikatori va vaqt tamg‘asi bo‘yicha moslashtirilib, nazorat nuqtasi uchun yagona holat vektori shakllantiriladi.

1-Jadval

Takomillashtirilgan real vaqt modelida foydalanilgan ma’lumot oqimlari

Manba	Kuzatuv birligi	Asosiy o‘zgaruvchilar	Yangilanish davri	Boshqaruvdagi roli
AVL/GPS	Avtobus - vaqt	id, koordinata, tezlik, haqiqiy kelish/ketish	5-15 sek	headway va segment vaqti
APC / to‘lov	Bekat - reys	kirish, chiqish, joriy yuklanish	20-60 sek	turish vaqti va talab

ISSN 3030-3907

Jadval / dispatch	Reys - nazorat nuqtasi	reja jo‘natish, reja intervali, smena holati	1-5 min	bazaviy maqsadlar
Trafik / hodisa	Uchastka - vaqt	tirbandlik indeksi, bloklanish, ob-havo	1-5 min	tezlik va travel time tuzatishi

Modeldagi asosiy belgilashlar quyidagicha: $h_i(t)$ - i-avtobusning nazorat nuqtasiga kelish paytidagi oldingi avtobus bilan intervali; $q_j(t)$ - j-bekatdagi kutayotgan yo‘lovchilar soni; $l_i(t)$ - avtobus yuklanishi; $d_j(t)$ - bekatdagi turish vaqti; $\tau_{ij}(t)$ - j va $j+1$ bekatlar oralig‘idagi harakat vaqti; $u_i(t)$ - boshqaruv ta’siri. Ularning birgalikdagi vektori tizimning joriy holatini beradi.

2-Jadval

Modelda ishlatilgan asosiy o‘zgaruvchilar va ularning mazmuni

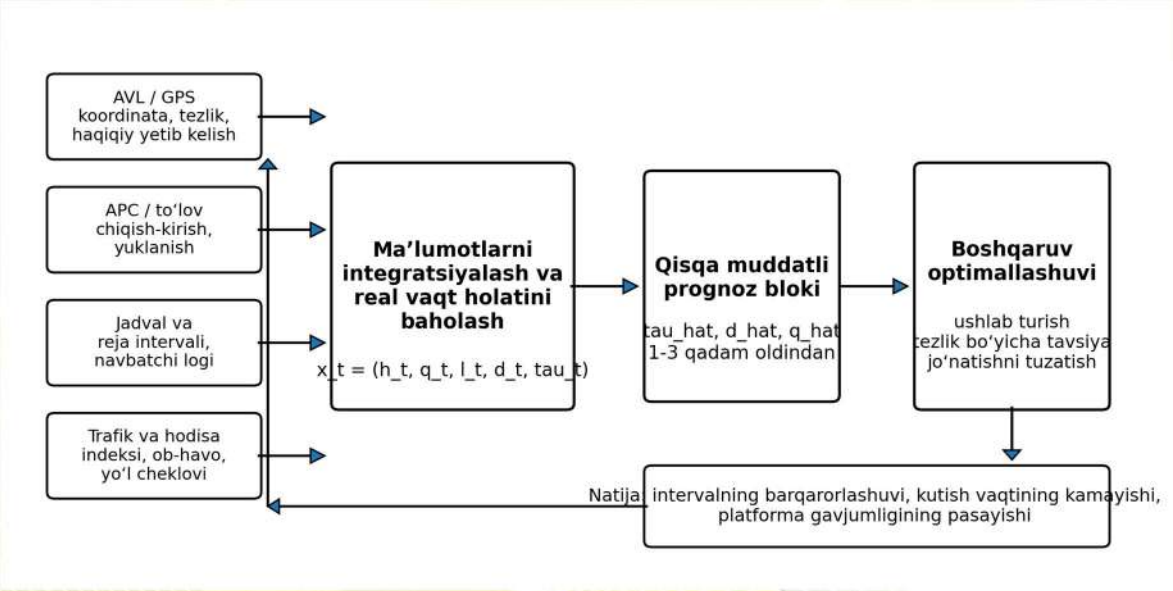
Belgilash	Mazmuni	O‘lchov
h_i	ketma-ket avtobuslar orasidagi haqiqiy interval	minut
h^*	reja intervali	minut
q_j	bekatdagi kutayotgan yo‘lovchilar navbati	yo‘lovchi
l_i	avtobusning nisbiy yuklanishi	0-1
d_j	bekatdagi turish vaqti	sekund
τ_{ij}	segment bo‘yicha harakat vaqti	sekund
u_i^{hold}	nazorat nuqtasida ushlab turish	sekund
v_i^{cmd}	tavsiya etilgan tezlik	km/soat

Nazariy qismda oddiy, ammo amaliyotga mos dinamik tasvir qabul qilinadi. Bunda nazorat nuqtasidan nazorat nuqtasigacha bo‘lgan davr diskret vaqt qadamlari ko‘rinishida qaraladi. Tizimdagi noaniqliklar ε_t tasodifiy buzilishlar sifatida ko‘riladi; ular tirbandlik, bekatlanishning kutilmagan ko‘payishi yoki signal siklining cho‘zilishi natijasida yuzaga kelishi mumkin.

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + G_t \varepsilon_t$$

ISSN 3030-3907

Bu umumlashtirilgan tenglama modelning konstruktiv asosini beradi. Keyingi bosqichda x_t vektorining komponentlari alohida regressiya va balans tenglamalari bilan yoziladi hamda ulardan foydalanib operativ maqsad funksiyasi tuziladi.



1-Rasm. Real vaqt ma'lumotlarini birlashtirish va boshqaruv qarorini hosil qilish arxitekturasi

TAKOMILLASHTIRILGAN MATEMATIK MODEL

Headway dinamikasi

Ketma-ket avtobuslar orasidagi interval nazorat nuqtasida kelish vaqtlarining farqi bilan aniqlanadi:

$$h_i(t) = a_i(t) - a_{i-1}(t)$$

Bu yerda $a_i(t)$ - i-avtobusning nazorat nuqtasiga haqiqiy kelish vaqti. Reja intervali h^* bilan taqqoslanib og'ish aniqlanadi:

$$\delta_i(t) = h_i(t) - h^*$$

Agar $\delta_i(t) > 0$ bo'lsa, avtobus oldindagi vositadan uzoqlashgan, ya'ni katta bo'shliq hosil qilgan bo'ladi; aksincha $\delta_i(t) < 0$ bo'lsa, u oldingiga ortiqcha yaqinlashgan bo'ladi. Amaliy nazorat aynan shu ikkala holatning ortiqcha amplitudasini kamaytirishga qaratiladi.

Bekatdagi turish vaqti va yo'lovchi navbati modeli

Bekatdagi turish vaqti faqat texnologik ochish-yopish vaqtidan iborat emas; u kirayotgan va tushayotgan yo'lovchilar soni hamda transport vositasining joriy yuklanishiga sezgir bo'ladi. Shu sababli soddalashtirilgan chiziqli model qabul qilinadi:

$$d_j(t) = d_0 + \beta_1 b_j(t) + \beta_2 a_j^{out}(t) + \beta_3 q_j(t)$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda d_0 - eshiklarni ochish-yopishning bazaviy vaqti, $b_j(t)$ - chiqayotgan, $a_j^{out}(t)$ - kirayotgan yo‘lovchilar soni, $q_j(t)$ - bekatda yig‘ilib qolgan qo‘shimcha navbat. Modeldan ko‘rinadiki, navbat uzunligi to‘g‘ridan-to‘g‘ri turish vaqtini oshiradi; demak, navbatning ortishi keyingi headway buzilishlariga ham sabab bo‘ladi.

Yo‘lovchi navbati uchun oddiy balans tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$q_j(t+1) = \max\left\{0, q_j(t) + \lambda_j(t)\Delta t - c_j(t)\right\}$$

Bu yerda $\lambda_j(t)$ - vaqt birligida bekatga kelayotgan talab, $c_j(t)$ esa joriy avtobuslar tomonidan xizmat ko‘rsatilgan yo‘lovchilar soni. Agar avtobus kechiksa, $q_j(t)$ ortadi va keyingi turish vaqti ham cho‘ziladi. Shunday qilib, real vaqt modelida q_j ko‘rsatkichini e’tiborga olmaslik muntazamlikni tiklash kuchini sustlashtiradi.

Harakat vaqtining qisqa muddatli prognozi

Segment bo‘yicha harakat vaqti tirbandlik va signalizatsiya fazalariga kuchli bog‘liq. Nazorat nuqtasida qaror qabul qilish paytida keyingi uchastka uchun kutilayotgan vaqtni bilish zarur. Shu sababli aralash avtokorrelyatsion-regression ko‘rinishdagi prognoz tenglamasi qo‘llanadi:

$$\hat{\tau}_{ij}(t+1) = \phi_0 + \phi_1\tau_{ij}(t) + \phi_2\rho_{ij}(t) + \phi_3\omega(t) + \phi_4\, peak(t)$$

Bu yerda $\rho_{ij}(t)$ - tirbandlik indeksi, $\omega(t)$ - hodisa yoki ob-havo omili, $peak(t)$ - pik davr indikatori. Bunday tenglama murakkab sun’iy intellekt modeliga nisbatan soddaroq bo‘lsa-da, dispatching amaliyoti uchun yetarlicha izohlanuvchi va moslashuvchan hisoblanadi. Maqoladagi ssenariyda aynan shu turdagi prognoz ishlatiladi.

Xuddi shu mantiq bo‘yicha talabning yaqin kelajakdagi qiymati ham baholanadi:

$$\hat{\lambda}_j(t+1) = \psi_0 + \psi_1\lambda_j(t) + \psi_2\lambda_j(t-1) + \psi_3 s_j(t)$$

Bu yerda $s_j(t)$ - to‘lov tizimi yoki sensorlar bo‘yicha joriy oqim signali. Prognoz blokining vazifasi mutlaq aniq bashorat berish emas, balki nazorat qarorini qabul qilish uchun xavfli o‘sish zonalarini oldindan sezishdan iborat.

Maqsad funksiyasi va optimallashuv mezoni

Taklif etilayotgan modelning markaziy qismi - ko‘p omilli operativ maqsad funksiyasidir. U headway barqarorligi, yo‘lovchi kutishi bilan bog‘liq navbatlar, yuklanishning notekisligi va nazorat ta’sirining o‘z xarajatini birgalikda hisobga oladi:

$$J_t = \sum_i \left[w_1\left(h_i(t) - h^*\right)^2 + w_2 q_i(t)^2 + w_3\left(l_i(t) - \bar{l}(t)\right)^2 + w_4 u_i(t)^2 \right]$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda $u_i(t)$ umumlashgan boshqaruv vektori bo‘lib, ushlab turish, tezlikni moslashtirish va jo‘natishni tuzatish komponentlarini o‘z ichiga oladi. w_1, w_2, w_3, w_4 og‘irliklar operatorning ustuvorliklariga qarab tanlanadi. Agar pik davrda asosiy maqsad bekatdagi gavjumlikni pasaytirish bo‘lsa, w_2 kattalashtiriladi; agar eng muhim talab intervalni barqarorlashtirish bo‘lsa, w_1 kuchaytiriladi.

Maqsad funksiyasi kvadratik tanlangani sababli u ikki afzallik beradi. Birinchidan, og‘ishlar katta bo‘lganda jazo tez ortadi va tizim kritik holatlarni faol bostiradi. Ikkinchidan, ayrim holatlarda boshqaruv qarorini yopiq ko‘rinishda olish mumkin. Aynan holding uchun shunday natija keltirib chiqariladi.

Yopiq ko‘rinishdagi holding formulasi

Nazorat nuqtasida i-avtobus uchun faqat ushlab turish qarori ko‘rilayotgan soddalashtirilgan holatda lokal funksional quyidagicha yoziladi:

$$J_i(u) = \alpha\left(h_i + u - h^*\right)^2 + \beta\left(h_{i+1} - u - h^*\right)^2 + \gamma u^2$$

Bu yerda h_i - oldingi avtobus bilan joriy interval, h_{i+1} - ortdan kelayotgan avtobus bilan kutilayotgan interval, u esa nazorat nuqtasida ushlab turish vaqti. Birinchi had joriy avtobusning oldingi bilan bo‘shlig‘ini tuzatadi, ikkinchi had ortdan kelayotgan avtobus bilan oraliqni ham me’yorlashtirishga intiladi, uchinchi had esa ortiqcha ushlab turishni jazolaydi.

Hosila nolga tenglashtirilsa, optimal lokal holding quyidagicha hosil bo‘ladi:

$$u_i^* = \frac{\beta\left(h_{i+1} - h^*\right) - \alpha\left(h_i - h^*\right)}{\alpha + \beta + \gamma}$$

Amaliyotda ushbu qiymat cheklovlar bilan kesiladi:

$$u_i^{hold} = \min\left\{u_{max}, \max\left[0, u_i^*\right]\right\}$$

Mazkur formula taklif etilayotgan modelning muhim afzalligini ko‘rsatadi: real vaqt ma’lumotlari mavjud bo‘lsa, boshqaruv qarorini murakkab iterativ hisob-kitoblarsiz ham tez topish mumkin. Bu ayniqsa dispatching markazlarida onlayn tatbiq uchun qulay.

Tezlikni moslashtirish va jo‘natishni tuzatish

Holding har doim ham yagona vosita emas. Ba’zi hollarda avtobusni bekatda ushlab turish o‘rniga keyingi segmentda tezlikni bir oz pasaytirish yoki jadvaldan oldin ketayotgan reysni terminalda kechiktirish maqsadga muvofiq bo‘ladi. Shu sababli tezlik bo‘yicha soddalashtirilgan tavsiya quyidagicha yoziladi:

$$v_i^{cmd} = v_i^{ref}\left[1 - \eta\frac{h^* - h_i}{h^*}\right]$$

Agar $h_i < h^*$ bo‘lsa, avtobus oldindagiga haddan tashqari yaqinlashgan bo‘ladi va v_i^{cmd} kamayadi; agar $h_i > h^*$ bo‘lsa, aksincha, cheklov doirasida bazaviy

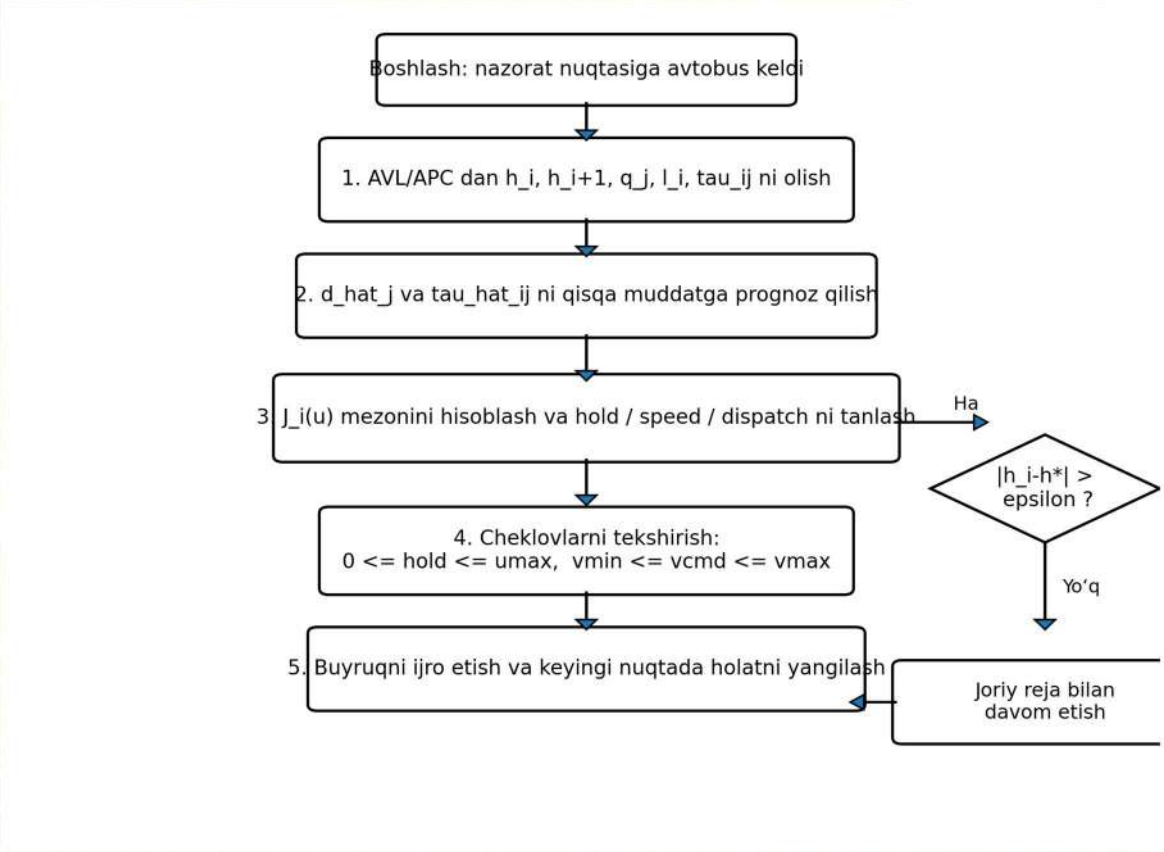
ISSN 3030-3907

tezlikka yaqinlashadi. Bunday qoida mikro-darajadagi signal nazorati yoki haydovchiga beriladigan tavsiya sifatida talqin qilinishi mumkin.

Terminal yoki boshlang‘ich nazorat nuqtasida jo‘natishni tuzatish qoidasini ham kiritish mumkin:

$$\Delta_i^{dispatch} = \kappa_1 \left(h^* - h_i^{dep} \right) + \kappa_2 \left(\overline{q}^{up} - q^{up} \right)$$

Bu yerda h_i^{dep} - jo‘natish paytidagi bosh interval, q^{up} - yo‘nalishning yuqori oqim qismidagi kutilayotgan navbat. Demak, jo‘natish qarori ham nafaqat headway, balki talabning yaqin kelajakdagi holati bilan bog‘lanadi.



2-Rasm. Nazorat nuqtasida qaror qabul qilish algoritmining blok sxemasi

HISOB-KITOB SSENARIYSI VA RAQAMLI TAJRIBA

Taklif etilgan modelni namoyish qilish uchun 20 ta bekatli shahar yo‘nalishi bo‘yicha 180 minutlik pik davr simulyatsiyasi qurildi. Nazorat nuqtalari terminal, 8-bekat va 14-bekat atrofida joylashtirildi. Har bir reys uchun boshlang‘ich og‘ish, talab intensivligi va tirbandlik darajasi tasodifiy, biroq boshqariluvchi diapazonlarda tanlandi. Maqsad - modelning noaniqlik sharoitidagi barqarorligini tekshirish.

Bazaviy ssenariyda operator faqat jadval asosida ishlaydi va real vaqtli aralashuv deyarli yo‘q. Ikkinchi ssenariyda odatiy schedule control qo‘llanadi: avtobuslar terminal yoki nazorat bekatlarida jadvaldan erta ketsa ushlab turiladi. Uchinchi ssenariyda headway-only nazorati ishlatiladi. To‘rtinchi ssenariy esa

ISSN 3030-3907

taklif etilgan integrallashgan modeldan foydalanadi; unda holding formulasi, tezlik tavsiyasi va jo‘natishni tuzatish birgalikda qo‘llanadi.

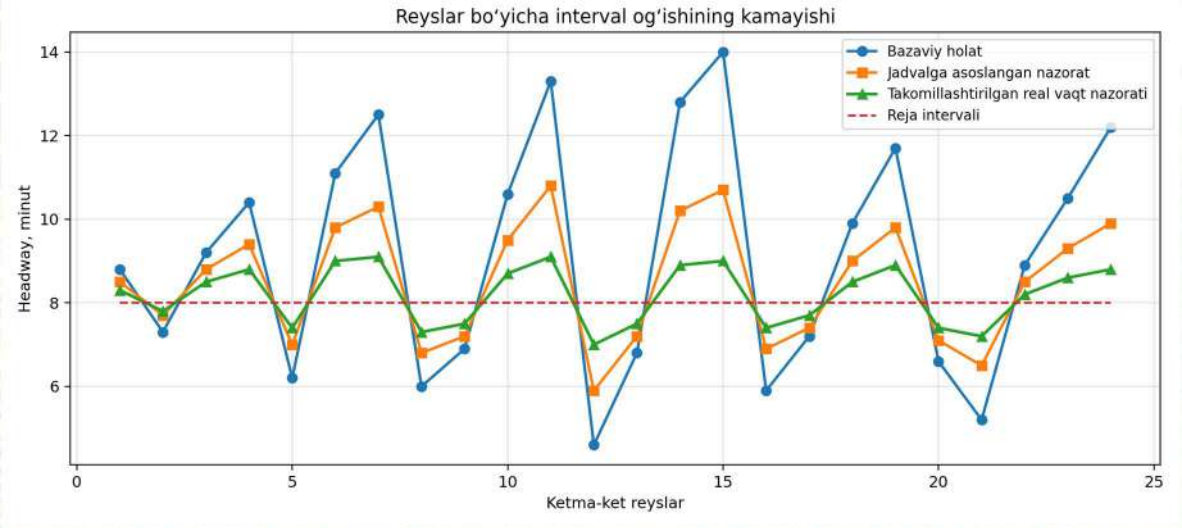
Maqsadli ko‘rsatkichlar sifatida quyidagilar tanlandi: R_h muntazamlik indeksi, o‘rtacha kutish vaqti, headwayning variatsiya koeffitsiyenti, bunching ulushi, nazorat bekatidagi maksimal navbat, o‘rtacha turish vaqti va nazoratning qo‘shimcha ekspluatatsion xarajati. Bunching hodisasi uchun $h_i < 0.5h^*$ mezoni qabul qilindi.

Tajriba parametrlari shartli bo‘lsa-da, ular xalqaro adabiyotlarda uchraydigan ekspluatatsion diapazonlar bilan mos keladi [4]-[10]. Bu yondashuv modelning strukturaviy foydasini ko‘rsatishga qaratilgan bo‘lib, aniq bir shahar operatori bo‘yicha faktik audit natijasi sifatida talqin qilinmaydi.

3-Jadval.

Raqamli tajriba uchun qabul qilingan asosiy parametrlar

Parametr	Qiymat	Parametr	Qiymat	Izoh
Yo‘nalish uzunligi	18,4 km	Bekatlar soni	20 ta	bir tomonga
Pik davr	180 minut	Reja intervali	8 minut	07:00-10:00
Aylanish davri	126 minut	Faol park	16 ta	shu davr uchun
Talab diapazoni	10-38 yo‘lovchi/5 min	Segment tezligi	18-22 km/soat	tirbandlikka qarab
Holding cheklovi	0-90 sekund	Tezlik tuzatishi	±8 %	xavfsiz diapazon



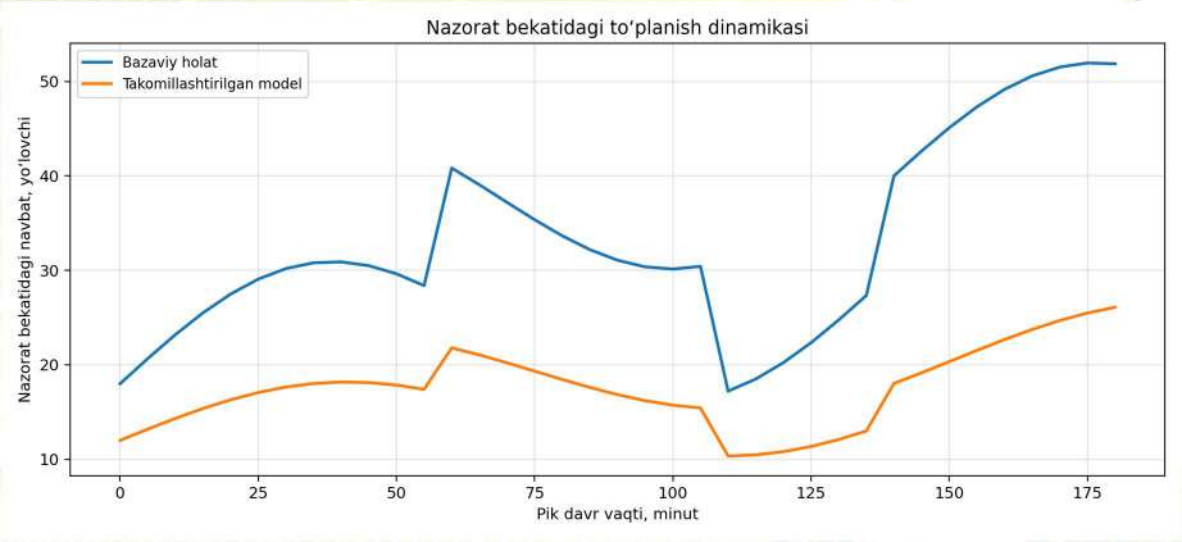
3-Rasm. Ketma-ket reyslar bo‘yicha headway og‘ishining kamayishi

Rasm 3 dan ko‘rinadiki, bazaviy holatda interval juda keng tebranadi: ayrim reyslarda 4-5 minutgacha qisqarish, ayrimlarida esa 13-14 minutgacha uzayish

ISSN 3030-3907

kuzatiladi. Schedule-only nazorat bu tebranishni qisman bostiradi, biroq lokal talab sakrashlari va tirbandliklar ortidan paydo bo‘ladigan ikkilamchi og‘ishlarni yetarli darajada so‘ndira olmaydi. Taklif etilgan model esa og‘ishni 7-9 minut diapazoniga yaqinlashtiradi; ya’ni reja intervali atrofidagi tarqoqlik ancha kamayadi.

Bu natija yuqorida keltirilgan E[W] formulasi bilan hamohang: headway dispersiyasi kamaygan sayin yo‘lovchining o‘rtacha kutish vaqti pasayadi. Bundan tashqari, interval barqarorligi transport vositalari orasidagi yuklanishni ham tekislaydi, chunki yo‘lovchilar bir nechta daqiqalik katta bo‘shliqdan keyin haddan tashqari yig‘ilib qolmaydi.

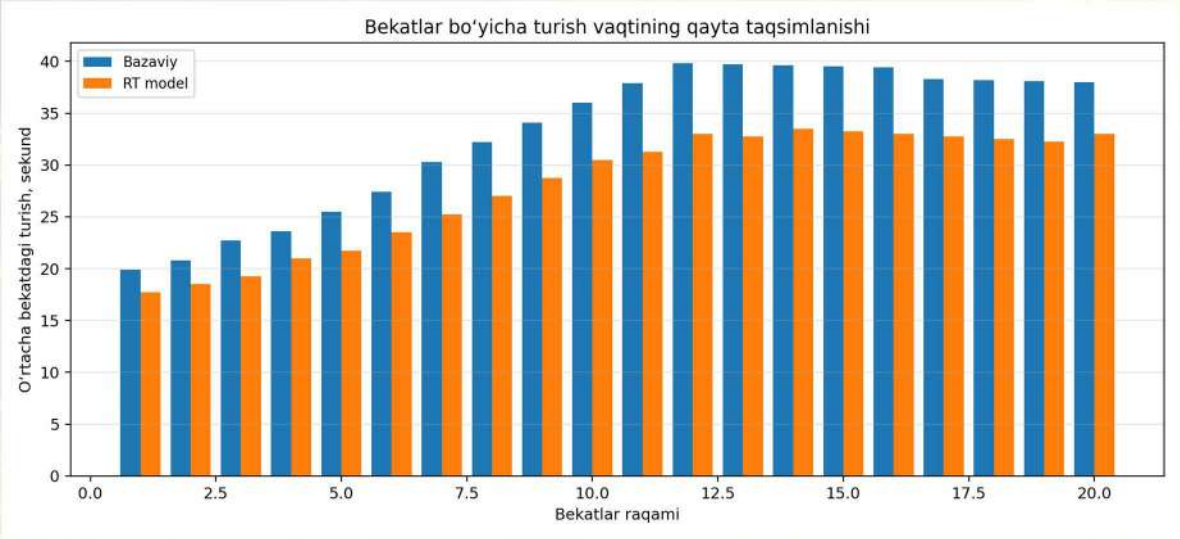


4-Rasm Nazorat bekatidagi yo‘lovchilar navbatining vaqt bo‘yicha dinamikasi

Rasm 4 taklif etilgan modelning yana bir muhim natijasini ko‘rsatadi. Bazaviy holatda 60-110 minut oralig‘ida navbat keskin ko‘payib, 40 nafardan oshadi. Integrallashgan nazorat sharoitida esa navbat pik nuqtasida ham 24-26 kishi atrofida ushlanadi. Bu farq turish vaqti, yo‘lovchining stressi hamda bekat maydonining xizmat ko‘rsatish qobiliyati nuqtai nazaridan sezilarli ahamiyatga ega.

Modelning bu xususiyati faqat headwayni tekislashdan kelib chiqmaydi. Qaror mezoniga $q_j(t)$ navbati va $l_i(t)$ yuklanishi kiritilgani sababli tizim talab to‘planishining xavfli nuqtalariga nisbatan proaktivroq javob beradi. Shunday qilib, taklif etilgan yondashuv muntazamlikni yo‘lovchi oqimi bilan bog‘langan operativ sifat kategoriyasi sifatida boshqaradi.

ISSN 3030-3907



5-Rasm. Bekatlar bo‘yicha turish vaqtining qayta taqsimlanishi

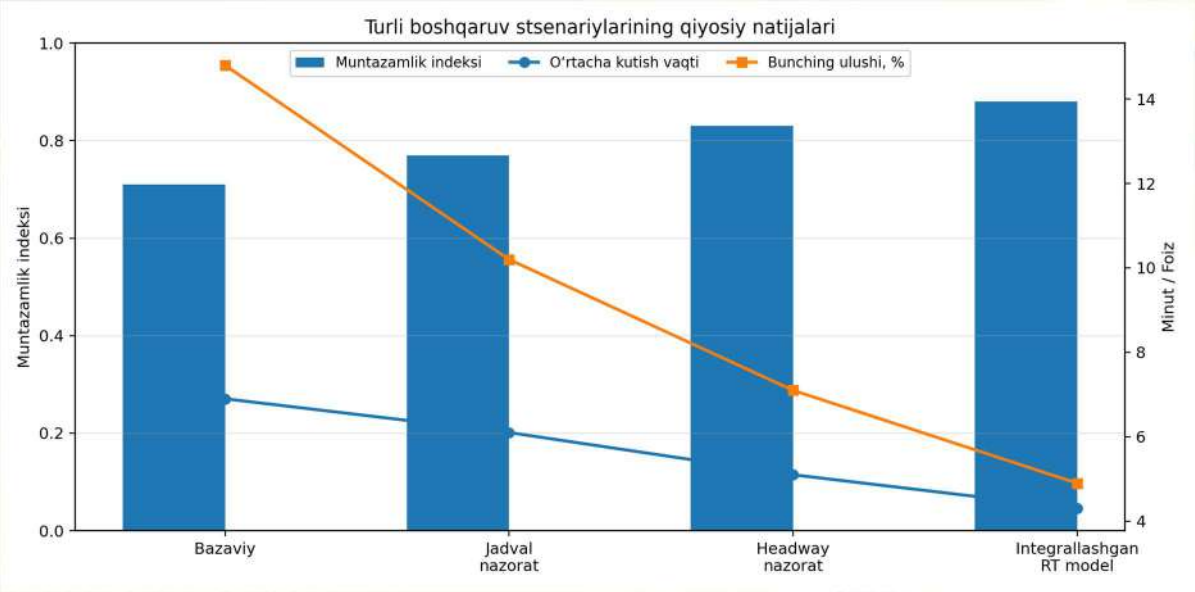
Rasm 5 dan ko‘rinadiki, markaziy bekatlarda bazaviy ssenariyda turish vaqti juda baland bo‘lib, aynan shu joylarda intervalning parchalanishi kuchayadi. Taklif etilgan modelda esa markaziy bekatlardagi navbat va yuklanish vaqt bo‘yicha tekislangani sababli turish vaqti profili ham silliqlashadi. Bu natija harakat jadvaliga nisbatan sezilarli amaliy foyda beradi, chunki bekatdagi ortiqcha turishning bir qismi butun yo‘nalish bo‘yicha zanjirli kechikishlarni keltirib chiqaradi.

4-Jadval

Turli boshqaruv stsenariylarining qiyosiy natijalari

Ssenariy	R_h	Kutish, min	CV(h)	Bunching, %	Max navbat	Qo‘shimcha nazorat xarajati
Bazaviy holat	0,71	6,9	0,33	14,8	43	0,0
Jadval nazorati	0,77	6,1	0,25	10,2	35	0,5
Headway nazorati	0,83	5,1	0,18	7,1	29	0,8
Integrallashgan RT model	0,88	4,3	0,12	4,9	24	1,1

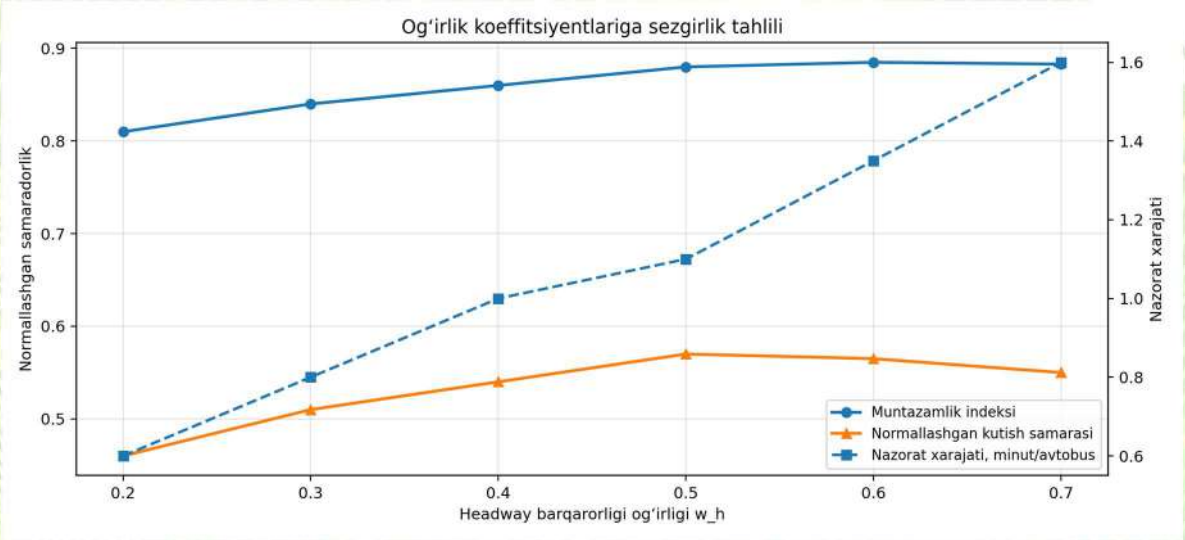
ISSN 3030-3907



6-Rasm. Muntazamlik, kutish va bunching ko‘rsatkichlarining qiyosiy dinamikasi

Jadval 4 va Rasm 6 natijalari taklif etilgan modelning afzalligini kompleks ravishda tasdiqlaydi. Muntazamlik indeksi bazaviy 0,71 dan 0,88 gacha oshgan, bu esa 23,9 foizlik nisbiy yaxshilanish degani. O‘rtacha kutish vaqti 37,7 foizga kamaygan. Headway variatsiya koeffitsiyenti esa 0,33 dan 0,12 gacha tushgan. Bunday ko‘rsatkichlar transport xizmati sifatining sezilarli yaxshilanishi sifatida talqin qilinadi.

Nazorat xarajatining ma’lum darajada ortishi tabiiy hol. Integrallashgan model bazaviy holatga nisbatan har bir avtobusga o‘rtacha 1,1 minut qo‘shimcha nazorat xarajati yuklaydi. Biroq bu xarajat yo‘lovchi kutish vaqti, bekatdagi tiqilinch va muntazamlikdagi foyda bilan qoplanadi. Amaliy boshqaruv nuqtai nazaridan bu ijobiy kompromiss hisoblanadi.



7-Rasm. Og‘irlik koeffitsiyentlariga sezgirlik tahlili

ISSN 3030-3907

Rasm 7 ko‘rsatishicha, w_h - headway barqarorligiga berilgan og‘irlik 0,5 atrofida bo‘lganda muntazamlik indeksi maksimumga yaqinlashadi va kutish samarasi ham eng yaxshi qiymatga yaqin bo‘ladi. Juda kichik w_h qiymatlarida model navbat va yuklanish omillariga haddan tashqari moyil bo‘lib qoladi; juda katta qiymatlarda esa muntazamlikka erishish uchun ortiqcha nazorat xarajati paydo bo‘ladi. Shuning uchun real operator amaliyotida og‘irliklarni adaptiv tanlash yoki vaqt zonalari bo‘yicha sozlash maqsadga muvofiq.

Sezgirlik tahlili yana shuni ko‘rsatadiki, model bosh parametrlar o‘rtacha diapazonda bo‘lganda ham barqaror natija beradi. Ya’ni algoritm faqat bitta nozik parametrga qattiq bog‘lanib qolmaydi. Bu esa uni haqiqiy dispatching muhitiga joriy etishda muhim afzallikdir.

NATIJALAR MUHOKAMASI.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, muntazamlikni ta’minlashda real vaqt ma’lumotlariga tayangan boshqaruv yondashuvi an’anaviy schedule-only nazoratga nisbatan samaraliroqdir. Buning asosiy sababi shundaki, an’anaviy yondashuv mavjud vaziyatni faqat jadval bilan taqqoslaydi, holbuki real transport tizimi joriy talab, tirbandlik va bekatdagi navbat bilan birga yashaydi. Taklif etilgan model esa aynan shu kontekstni boshqaruv qarorining bir qismiga aylantiradi.

Matematik nuqtai nazardan, taklif etilgan model headway dispersiyasini kamaytirish va navbat dinamikasini bostirish vazifalarini bir vaqtning o‘zida bajaradi. Bu esa klassik yo‘lovchi kutish formulasi bilan ham, zamonaviy ko‘p maqsadli transport nazorati konsepsiyasi bilan ham mos tushadi [5], [9]. Yopiq ko‘rinishdagi holding formulasi modelning operativ tatbiqini soddalashtiradi; ya’ni murakkab optimallashtirish paketlarisiz ham dispatcher qarorini avtomatlashtirish mumkin bo‘ladi.

Taklif etilgan modelning amaliy afzalligi - ma’lumotlarni integratsiyalashga mosligi. Agar shaharda allaqachon AVL tizimi mavjud bo‘lsa, unga APC yoki elektron to‘lov oqimini qo‘shish orqali nazorat sifati keskin oshiriladi. Bunda eng muhim masala texnologiyaning o‘zi emas, balki undan kelib chiqadigan boshqaruv protsedurasidir. Jahon banki materiallarida ham ITS texnologiyalari faqat mavjud biznes jarayonlari yangilangandagina sezilarli foyda berishi qayd etiladi [11].

Albatta, maqoladagi sinov paneli sintetik ma’lumotlarga tayangan. Shu sababli natijalarni bevosita ma’lum bir operatorning faktik iqtisodiy samarasiga tenglashtirish mumkin emas. Biroq aynan sintetik-amaliy ssenariy modelning mantiqiy ishlashini, sezgirligini va boshqaruv konturining ustunligini ko‘rsatish uchun yetarli. Keyingi bosqichda mazkur yondashuvni Tashkent yoki boshqa shahar marshrutlari bo‘yicha faktik AVL arxivlari bilan kalibrlash maqsadga muvofiq.

ISSN 3030-3907

Kelajakdagi tadqiqotlarda uchta yo‘nalish ustuvor deb qaraladi: birinchisi, og‘irlik koeffitsiyentlarini kunning davri va marshrut sinfiga mos ravishda adaptiv o‘zgartirish; ikkinchisi, signal prioriteti bilan birlashgan kooperativ nazorat; uchinchisi, yo‘lovchi transfer tugunlari uchun ko‘p-marshrutli integrallashgan modelni qurish. Aynan shu yo‘nalishlar taklif etilgan usulning ilmiy va amaliy ahamiyatini yanada oshiradi.

XULOSA.

Maqolada shahar yo‘nalishli avtobuslar harakat muntazamligini ta’minlash uchun real vaqt ma’lumotlariga asoslangan takomillashtirilgan boshqaruv modeli ishlab chiqildi. Modelning asosiy xususiyati shundaki, u muntazamlikni faqat headwayga tayanib boshqarmaydi; balki yo‘lovchi navbati, avtobus yuklanishi, turish vaqti hamda segment bo‘yicha kutilayotgan harakat vaqtini ham yagona qaror funksionaliga birlashtiradi.

Matematik qismda holat vektori, navbat va turish vaqti tenglamalari, qisqa muddatli prognozlash bloklari hamda kvadratik maqsad funksiyasi keltirildi. Lokal holding masalasi uchun yopiq ko‘rinishdagi formula hosil qilindi, tezlikni moslashtirish va jo‘natishni tuzatish qoidalari bilan boyitildi. Natijada receding-horizon tipidagi, ammo amaliyotda tez ishlaydigan nazorat konturi shakllantirildi.

Raqamli tajriba ko‘rsatdiki, taklif etilgan model bazaviy holatga nisbatan muntazamlik indeksini 0,71 dan 0,88 gacha oshiradi, o‘rtacha kutish vaqtini 6,9 minutdan 4,3 minutgacha kamaytiradi, bunching ulushini esa 14,8 foizdan 4,9 foizgacha pasaytiradi. Bekatdagi maksimal navbat va turish vaqti profili ham silliqlashadi. Bu natijalar modelning nafaqat nazariy, balki operativ boshqaruv nuqtai nazaridan ham foydali ekanini ko‘rsatadi.

Shu tariqa, real vaqt ma’lumotlarini yig‘ish, prognozlash va boshqaruv qarorini bitta integrallashgan tizimga birlashtirish shahar avtobuslari muntazamligini ta’minlashning istiqbolli yo‘nalishi ekanligi asoslandi. Mazkur yondashuv jamoat transporti operatorlari uchun dispatching sifatini oshirish, bekatlarda ortiqcha gavjumlikni kamaytirish va xizmat ishonchliligini kuchaytirish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti. PF-60-son Farmon. “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”. 2022.
2. O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti. RP-2724-son qaror. “Shaharlarda va qishloq joylarda jamoat transporti xizmati tizimi va yo‘lovchi avtobus tashuvlarini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”. 2017.
3. Newell, G. F., Potts, R. B. Maintaining a Bus Schedule. 1964.

ISSN 3030-3907

4. Fu, L., Yang, X. Design and Implementation of Bus-Holding Control Strategies. Transportation Research Record, No. 1791, 2002, pp. 6-12.
5. Daganzo, C. F. A Headway-Based Approach to Eliminate Bus Bunching: Systematic Analysis and Comparisons. Transportation Research Part B, 43(10), 2009, pp. 913-921.
6. Daganzo, C. F., Pilachowski, J. Reducing Bunching with Bus-to-Bus Cooperation. Transportation Research Part B, 45(1), 2011, pp. 267-277.
7. Mandelzys, M., Hellinga, B. Identifying Causes of Performance Issues in Bus Schedule Adherence with Automatic Vehicle Location and Passenger Count Data. Transportation Research Record, Vol. 2143, 2010, pp. 9-15.
8. Ma, Z., Ferreira, L., Mesbah, M. Measuring Service Reliability Using Automatic Vehicle Location Data. Mathematical Problems in Engineering, 2014, Article ID 468563.
9. Varga, B., Tettamanti, T., Kulcsar, B. Optimally Combined Headway and Timetable Reliable Public Transport System. Transportation Research Part C, 2018.
10. Reilly, J. M. Improving Bus Transit On-Time Performance through the Use of AVL Data. Transit IDEA Project 63(a), Transportation Research Board, 2014.
11. World Bank. Public Transport Service Optimization and System Integration. China Transport Topics No. 14, 2015.
12. World Bank. The Role of ITS in Public Transport. Passenger Transport ITS Toolkit materials, 2014.
13. Ma, Z., Ferreira, L., Mesbah, M. A Framework for the Development of Bus Service Reliability Measures. Australasian Transport Research Forum, 2013.
14. Yang, Y. An Overview of Solutions to the Bus Bunching Problem in Urban Bus Systems. 2024 review article....

ISSN 3030-3907