

**KOMMIVOYAJER MASALASINI YECHISHDA METAEVKRISTIK  
USULLAR: GENETIK ALGORITMLAR VA SUN'IY INTELLEKT  
YONDASHUVI**

*Mamatova Zilolaxon Xabibulloxonovna*

*Farg'ona davlat universiteti dotsenti,  
Pedagogika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)*

*mamatova.zilolaxon@gmail.com*

*Orcid: 0009-0009-9247-3510*

*Qosimjonova Ziyoda Zohidjon qizi*

*Farg'ona davlat universiteti 3-kurs talabasi*

*qosimjonovaziyodaxon@gmail.com*

**Annotatsiya**

Mazkur maqolada kombinator optimallashtirish nazariyasining markaziy masalalaridan biri — kommivoyajer masalasi (Travelling Salesman Problem, TSP) ni metaevkristik usullar yordamida yechish, xususan, genetik algoritmlar va zamonaviy sun'iy intellekt yondashuvlarining samaradorligi tahlil qilingan. Tadqiqotning dolzarbligi raqamli iqtisodiyot, logistika, transport tarmoqlari va elektron tijoratning jadal rivojlanishi sharoitida marshrut optimallashtirish masalasining amaliy ahamiyati ortib borayotgani bilan izohlanadi.

**Annotation**

This article analyses the application of metaheuristic methods, particularly genetic algorithms and contemporary artificial intelligence approaches, to one of the central problems of combinatorial optimisation theory — the Travelling Salesman Problem (TSP). The relevance of the study is justified by the growing practical importance of route optimisation in the context of rapid development of the digital economy, logistics, transportation networks and e-commerce.

***Kalit so'zlar:** kommivoyajer masalasi, genetik algoritmi, metaevkristika, sun'iy intellekt, kombinator optimallashtirish, NP-qiyin masala, evolyutsion hisoblash, krossingover, mutatsiya, fitnes funksiya, logistika, marshrut optimallashtirish.*

***Key words:** travelling salesman problem, genetic algorithm, metaheuristics, artificial intelligence, combinatorial optimisation, NP-hard problem, evolutionary computation, crossover, mutation, fitness function, logistics, route optimisation.*

**KIRISH**

Insoniyat tomonidan yechilishi izlanayotgan masalalar orasida shunday muammolar borki, ular bir vaqtning o'zida ham nazariy chuqurligi, ham amaliy ahamiyati bilan ajralib turadi. Kommivoyajer masalasi mazkur yo'nalishdagi eng

yorqin namunalardan biri hisoblanadi. Klassik shaklda u bir nuqtadan boshlab, berilgan barcha shaharlarni faqat bir martadan tashrif buyurib, eng qisqa marshrut bo'ylab boshlang'ich nuqtaga qaytib kelishni talab qiladi. Shu oddiy ta'rifning ortida XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab matematika, informatika va operatsion tadqiqotlar sohasining yuzlab tadqiqotchilari ko'p o'n yillar davomida o'rganib kelgan murakkab kombinator tuzilma yashiringan.

Mazkur masalaning bugungi kunda dolzarb bo'lib qolayotganligining bir necha ob'ektiv sabablari mavjud. Birinchidan, jahonda elektron tijorat, oxirgi mil yetkazib berish (last-mile delivery) xizmatlari va xalqaro logistika tarmoqlari misli ko'rilmagan tezlikda kengaymoqda. Yetkazib berish kompaniyalari kuniga yuzlab, ba'zan minglab buyurtmalarni qisqa vaqt ichida bajarish uchun yoqilg'i sarfini, transport vositalarining kilometrajini va inson resursini eng samarali tarzda taqsimlashga majbur. Ikkinchidan, shaharlardagi transport oqimlarini optimallashtirish, jamoat transporti marshrutlarini loyihalash, dronlar va avtonom robotlarning yo'nalishini hisoblash kabi yangi vazifalar paydo bo'ldi. Uchinchidan, mikrosxemalarni ishlab chiqarishda lazerli o'yib yozish trayektoriyalari, ulkan teleskoplarni nazorat qilish va hatto DNK ketma-ketlarini kompyuter yordamida yig'ish ham matematik nuqtai nazardan kommivoyajer masalasining alohida shakllariga keltiriladi.

O'zbekiston Respublikasida raqamli iqtisodiyotning jadal rivojlanishi, "Express24", "Uzum Market", "BTS Logistics" va boshqa yetkazib berish xizmatlarining keng qulamda joriy etilishi marshrutlarni ilmiy asosda optimallashtirishni dolzarb vazifaga aylantirmoqda. Mintaqaviy markazlar o'rtasidagi yuk tashish, viloyatlardagi tarqoq mijozlar bo'yicha bir kunlik kuryer marshrutlari va jamoat transporti tarmoqlarini loyihalash kabi muammolarning barchasi matematik mohiyatiga ko'ra kommivoyajer masalasining yoki uning umumlashtirilgan variantlarining xususiy holatlari hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi — kommivoyajer masalasini yechishda zamonaviy metaevristik usullarning, xususan genetik algoritmlarning va ularga sun'iy intellekt elementlarini kiritish orqali shakllanadigan gibrid yondashuvlarning matematik mohiyatini, ishlash tartibini va samaradorligini tahlil qilish, hamda aniq sonli misol asosida ulardan amalda foydalanish imkoniyatlarini namoyish etishdan iborat. Tadqiqot savoli quyidagicha shakllantiriladi: ortib borayotgan o'lchamdagi kommivoyajer masalalarini yechishda genetik algoritmlar an'anaviy aniq usullarga qanday afzalliklar beradi va ularni sun'iy intellekt vositalari bilan birlashtirishning matematik asosi nimadan iborat?

Tadqiqot gipotezasi shundan iboratki, genetik algoritmlar va uning sun'iy intellekt asosidagi kengaytmalari kommivoyajer masalasining yirik o'lchamli holatlarini yetarlicha yuqori sifat darajasida hamda amaliy maqbul vaqt ichida yechishga imkon beradi va aynan shu yondashuvlar O'zbekiston logistika tarmog'ini optimallashtirishda

istiqbolli asbob-uskuna sifatida xizmat qila oladi.

Kommivoyajer masalasining ilmiy tarixi XIX asr o'rtalariga, Uilyam Rouan Hamiltonning ikkilik ko'pburchaklar va Tomas Kirkmanning aylanaga ulashma graflar bo'yicha ishlariga borib taqaladi [1]. Lekin rasmiy matematik shakllantirish faqat 1930-yillarda Karl Menger tomonidan amalga oshirilgan, u bu masalani "xabar tashuvchining muammosi" (das Botenproblem) deb atagan. 1954-yilda Dantsig, Fulkerson va Jonson chiziqli dasturlash usullari yordamida 49 ta AQSh shahari uchun aniq optimal yechim topishga muvaffaq bo'ldilar — bu o'sha davr uchun haqiqatan rekord natija bo'lib, bugungi kesuvchi tekisliklar (cutting-plane) usulining negizini yaratdi [2]. Keyingi o'n yilliklarda masalaning matematik tabiati, hisoblash murakkabligi va amaliy qo'llanilishi bo'yicha tadqiqotlar fanning markaziy yo'nalishlaridan biriga aylandi.

Aniq yechish usullarining markazida quyidagi yondashuvlar turadi: tarmoqlanish va chegaralanish (branch and bound), kesuvchi tekisliklar usuli hamda Bellman, Held va Karp tomonidan ishlab chiqilgan dinamik dasturlash algoritmi. Held va Karp algoritmi  $O(n^2 \cdot 2^n)$  vaqt va  $O(n \cdot 2^n)$  xotira talab etadi va shu bois faqat  $n \leq 25$  atrofidagi shaharlar uchun amaliy hisoblanadi [3]. Aniq usullarning eng muvaffaqiyatli zamonaviy tatbiqi sifatida Concorde dasturini ko'rsatish mumkin: u Shvetsiya mamlakatining 24978 ta shahri uchun absolut optimal yechim topa olgan, biroq buning uchun yuzlab kompyuterda hisoblashlar oylar davomida olib borilgan [4]. Bu fakt aniq yechishning printsiplial cheklovlarini yaqqol aks ettiradi: hatto eng kuchli zamonaviy algoritmlar ham millionlab shaharlik real masalalarni real vaqtda yecha olmaydilar.

Real hayotda uchraydigan o'lchamlar uchun aniq usullar deyarli har doim qo'l keltirmaydi. Shunday vaziyatlarda taqribiy va metaevristik yondashuvlar yetakchi o'rin egallaydi. Eng oddiy taqribiy strategiya — eng yaqin qo'shni evristikasi (nearest neighbour heuristic): har bir qadamda hozirgi shahardan eng yaqin tashrif buyurilmagan shaharga o'tib boriladi. Mazkur usul  $O(n^2)$  tezlikda ishlasa-da, optimal yechimdan o'rtacha 25% gacha og'ishi mumkinligi nazariy isbotlangan [5]. Lin va Kernighan tomonidan taklif etilgan 2-opt va 3-opt mahalliy izlash strategiyalari yechim sifatini sezilarli yaxshilaydi, biroq baribir lokal optimumda qotib qolish xavfi mavjud, ya'ni global optimumga yetib bormaslik xatari saqlanib qoladi.

Metaevristikalar 1970-yillarning oxiri va 1980-yillarda yangi paradigma sifatida shakllandi. Ularning asosida ikkita g'oya yotadi: bir tomondan, izlash makonini global tarzda kashf qilish, ikkinchi tomondan esa, mahalliy optimumlardan chiqib keta olish qobiliyati. Genetik algoritmlar paradigmasini Jon Holland 1975-yilda nashr etilgan "Adaptation in Natural and Artificial Systems" asarida asoslab bergan [6]. Keyinchalik Goldberg [7] va Larrañaga [8] tomonidan ushbu paradigma kombinator optimallashtirish, jumladan kommivoyajer masalasi uchun samarali tarzda

moslashtirilgan. Boshqa muhim metaevristikalar qatorida sun'iy taqillash (simulated annealing), chumolilar koloniyasi optimizatsiyasi (ant colony optimisation), tabu izlash (tabu search) va zarralar to'dasi optimizatsiyasi (particle swarm optimisation) qayd etiladi [9]. Mazkur usullarning umumiy xususiyati shundan iboratki, ular yechim sifatini matematik kafolatlamasalar-da, amaliy nuqtai nazardan optimal yechimga juda yaqin natijalarni real vaqtda berishga qodir.

So'nggi o'n yillik mobaynida sun'iy intellekt va chuqur o'rgatish (deep learning) sohasidagi yutuqlar kombinator optimallashtirishga butunlay yangi yondashuvlar olib kirdi. Bello va hammuallflari [10] mustahkamlovchi o'rgatish (reinforcement learning) yordamida pointer-network arxitekturasini kommivoyajer masalasi uchun o'rgatishni taklif qildilar. Kool, van Hoof va Welling [11] e'tibor (attention) mexanizmiga asoslangan transformer arxitekturasini tatbiq etib, oldindan o'rgatilgan model 100 ta shaharlik holatda Concorde'ning 96–98% sifati darajasidagi yechimni millisekundlar ichida topishini ko'rsatdilar. Yana bir muhim yo'nalish — graflar bo'yicha neyron tarmoqlar (Graph Neural Networks): ular shahar tarmog'ining tuzilmaviy xususiyatlarini chuqur o'rganish orqali yechim sifatini sezilarli oshiradilar.

Tadqiqotda quyidagi ilmiy usullar qo'llanilgan: nazariy tahlil, qiyosiy yondashuv, matematik modellashtirish, hisoblash tajribasi va umumlashtirish. Adabiyotlar tahlili tarixiy-tematik tartibda olib borilgan, ularning natijalari sintez qilingan tarzda taqdim etilgan. Shuningdek, genetik algoritmnining amaliy kuchini namoyish etish maqsadida sonli tajriba o'tkazilgan, natijalar to'liq qidirish usuli bilan tasdiqlangan.

Kommivoyajer masalasini matematik nuqtai nazardan rasmiylashtirish uchun  $G=(V, E)$  to'liq yo'nalishi olingan vaznli graf qaraladi, bunda  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  shaharlar to'plami,  $E$  esa qirralar to'plamidir. Har bir  $(v_i, v_j) \in E$  qirraga  $c_{ij} \geq 0$  vazn (masofa, vaqt yoki narx) biriktirilgan bo'lib, vaznlar matritsasi  $C = (c_{ij})_{n \times n}$  ko'rinishida ifodalanadi. Masala —  $V$  to'plamidagi shunday  $\pi = (v_{\sigma(1)}, v_{\sigma(2)}, \dots, v_{\sigma(n)}, v_{\sigma(1)})$  siklik o'rniga qo'yishini topishdan iboratki, bu o'rniga qo'yishida quyidagi maqsad funksiyasi minimumga yetadi:

$$f(\pi) = c_{\sigma(1), \sigma(2)} + c_{\sigma(2), \sigma(3)} + \dots + c_{\sigma(n-1), \sigma(n)} + c_{\sigma(n), \sigma(1)} \rightarrow \min.$$

Mumkin bo'lgan turli marshrutlar soni simmetrik holatda  $(n-1)!/2$  ga teng. Shu sababli  $n=20$  da bu son taxminan  $6 \times 10^{16}$  ga,  $n=30$  da esa  $4,4 \times 10^{30}$  ga yetadi. Aynan shu kombinator portlash hodisasi to'liq qidirish strategiyasini real masalalar uchun amaliy emas qiladi va metaevristik yondashuvlarning zaruratini tug'diradi.

Genetik algoritm tabiiy evolyutsiya jarayonidan ilhomlangan: u "yaxshi" yechimlar avlodlar davomida tabiiy tanlash va naslchilik orqali yanada yaxshilanib boradi degan biologik tamoyilga asoslangan. Algoritmnining konseptual tuzilishi

quyidagicha tasvirlanadi. Avval  $N$  ta tasodifiy yechimdan iborat boshlang'ich populyatsiya  $P_0 = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$  shakllantiriladi. Har bir  $\pi_k$  — bu shaharlar permutatsiyasi, ya'ni xromosoma. Bunday kodlash usuli “yo‘l ifodasi” (path representation) deb yuritiladi va kommivoyajer masalasi uchun eng tabiiy hisoblanadi, chunki u marshrutni to‘g‘ridan-to‘g‘ri shaharlar tartibi shaklida saqlaydi. Keyingi qadamda har bir individning fitnes qiymati  $f(\pi_k)$  hisoblanadi: minimallashtirish masalasi sharoitida ko‘pincha  $1/f(\pi_k)$  yoki  $f_{\max} - f(\pi_k)$  ko‘rinishidagi teskari moslashuv qo‘llaniladi, bunday yo‘l bilan kichik marshrut uzunligi yuqori “yashash imkoniyati” ga aylantiriladi.

Tanlanma operatori populyatsiyadan keyingi avlod ota-onalarini tanlab oladi. Ruletka g‘ildiragi (roulette-wheel) usulida  $\pi_k$  ning tanlanish ehtimoli uning fitnesiga proporsional ravishda belgilanadi, turnir tanlanmasi (tournament selection) usulida esa tasodifiy guruhdan eng yaxshi vakil olib chiqiladi. Turnir usuli amaliyotda barqarorroq natija berishi va dasturiy amalga oshirish jihatdan soddaroq bo‘lishi sababli kommivoyajer masalasi uchun ko‘proq qo‘llaniladi. Krossingover operatori ikkita ota-onadan xromosomasidan yangi avlod xromosomalarini hosil qiladi. Mazkur masala uchun ishlab chiqilgan eng samarali krossingover variantlari qatorida tartibli krossingover (Order Crossover, OX), qisman moslashtirilgan krossingover (Partially Mapped Crossover, PMX) va siklik krossingover (Cycle Crossover, CX) ko‘rsatiladi. OX operatorida ota-onaning bir qismi to‘g‘ridan-to‘g‘ri avlodga ko‘chiriladi, qolgan o‘rinlar ikkinchi ota-onadan tartib bo‘yicha to‘ldiriladi; bu operator marshrutning ketma-ketlik xususiyatini yaxshi saqlaydi. PMX operatorida o‘rin almashinish jadvali tuziladi va xromosomalar shu jadval bo‘yicha qayta tartiblanadi.

Mutatsiya operatori avlodning kichik qismini tasodifiy o‘zgartirish orqali genetik xilma-xillikni ta’minlaydi va algoritmnining lokal optimumlardan chiqib keta olish qobiliyatini ta’minlaydi. Oddiy almashinish (swap) mutatsiyasida xromosomadagi ikki tasodifiy shahar o‘rin almashinadi; teskari aylantirish (inversion) mutatsiyasida tasodifiy bo‘lakning tartibi teskari aylantiriladi; 2-opt yaxshilash mutatsiyasi esa ikki qirrani uzib, ularning ulanish tartibini almashtiradi va deyarli har doim sifatni yaxshilaydi. Yangi populyatsiya elitizm strategiyasi yordamida shakllantiriladi: avvalgi avlodagi eng yaxshi yechimlar to‘g‘ridan-to‘g‘ri yangi avlodga o‘tkaziladi, qolgan o‘rinlar krossingover va mutatsiya orqali olingan avlodlardan to‘ldiriladi. Algoritm to‘xtash sharti — avlodlar soni, vaqt limiti yoki belgilangan avlodlar davomida yaxshilanmaganlik kabi mezonlardan birortasi bajarilguncha takrorlanadi.

Sun‘iy intellekt asosidagi gibrid yondashuvlar kommivoyajer masalasini yechishda genetik algoritmlar imkoniyatlarini sezilarli kengaytiradi. Birinchi yo‘nalish — neyron tarmoq yordamida fitnes baholash funksiyasini taqribiy almashtirish

(surrogate model). Bu yondashuv katta o'lchamdagi masalalarda hisoblash xarajatini bir necha barobar qisqartiradi, chunki har bir individning to'liq fitnessini hisoblash o'rniga oldindan o'rgatilgan tarmoq yordamida tezlashtirilgan baholash o'tkaziladi. Ikkinchi yo'nalish — chuqur mustahkamlovchi o'rgatish: agent transformer arxitekturasi orqali har bir qadamda keyingi shaharni tanlashga “o'rgatiladi”, natijada model bir marta o'rgatilganidan so'ng yangi misollarni real vaqt rejimida yechadi. Uchinchi yo'nalish — graflar bo'yicha neyron tarmoqlardan foydalanib boshlang'ich populyatsiyani aqlli tarzda yaratish: tasodifiy emas, balki tarmoqning topologik xususiyatlarini hisobga olgan yo'sinda hosil qilingan boshlang'ich yechimlar konvergentsiyani sezilarli tezlashtiradi.

Genetik algoritmlarning amaliy kuchli tomonlari sirasiga parallellashtirilishining osonligi, optimallashtirish makonini global izlash qobiliyati va qo'shimcha cheklovlar (vaqt darchalari, transport hajmi cheklovi, bir necha kommivoyajer ishtiroki kabi) bilan ishlash moslashuvchanligi kiradi. Cheklovlar qatorida esa parametrlar — populyatsiya hajmi, krossingover va mutatsiya ehtimollari, elitizm darajasi — ni sozlashga sezgirlik, hamda yechim sifatining nazariy kafolatlanmasligi qayd etiladi. Aynan shu sababli sun'iy intellekt vositalari bilan integratsiya kelajakda eng istiqbolli yo'nalish hisoblanadi.

Genetik algoritmnining aniq amaliy qo'llanilishini ko'rsatish maqsadida quyidagi dolzarb amaliy masala ko'rib chiqiladi.

**Masala (Logistika kompaniyasi marshrutini optimallashtirish).** Toshkent shahridagi yetkazib berish kompaniyasi bir avtomobil orqali O'zbekistonning oltita yirik shahriga — Toshkent ( $T$ ), Samarqand ( $S$ ), Buxoro ( $B$ ), Urganch ( $U$ ), Nukus ( $N$ ) va Qarshi ( $Q$ ) ga buyurtmalar yetkazib berishi lozim. Avtomobil Toshkentdan yo'lga chiqib, har bir shaharda bir martadan to'xtab, yana boshlang'ich nuqtaga qaytib kelishi shart. Shaharlar oralig'idagi taxminiy masofalar (kilometrda) quyidagi simmetrik matritsa shaklida beriladi:

	T	S	B	U	N	Q
T	0	31	55	10	11	52
S	0	0	27	72	90	14
B	0	0	0	47	59	38
U	00	0	0	0	19	67
N	00	0	0	0	0	75

Q	0	52	14	0	38	0	67	0	75	0
---	---	----	----	---	----	---	----	---	----	---

1-jadval. O'zbekistonning oltita yirik shahari oralig'idagi masofalar matritsasi (km).

Marshrutning umumiy uzunligi minimal bo'lishi uchun shaharlar qaysi tartibda kezip chiqilishi kerak?

**Yechim.** Avval mumkin bo'lgan marshrutlar sonini baholaymiz:  $n = 6$  shahar va boshlang'ich nuqta belgilangani bois unikal sikllar soni  $(n-1)!/2 = 120/2 = 60$  ta. Bu kichik son to'liq qidirish bilan ham hal qilish imkonini beradi, biroq tadqiqotda genetik algoritmnining ishlash tartibi namoyish etiladi, chunki bu yondashuv aynan shu printsiptda kattaroq, ya'ni  $n = 100$  yoki  $n = 1000$  bo'lgan amaliy holatlarda ham samarali ishlay oladi.

Genetik algoritmnining sozlamalari quyidagicha tanlandi: populyatsiya hajmi  $N = 50$ , krossingover ehtimoli  $p_c = 0,8$ , mutatsiya ehtimoli  $p_m = 0,1$ , avlodlar soni  $G = 100$ , krossingover turi — Order Crossover (OX), tanlanma — turnir (turnir hajmi 3), mutatsiya — teskari aylantirish va elitizm darajasi 2 (ya'ni avvalgi avloddagi eng yaxshi ikki yechim har doim saqlanadi).

Algoritmnining birinchi avlodida tasodifiy yaratilgan populyatsiyaning eng yaxshi vakili sifatida quyidagi marshrut topildi:  $T \rightarrow S \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow N \rightarrow Q \rightarrow T$ , uning uzunligi  $310 + 270 + 470 + 190 + 750 + 520 = 2510$  km ni tashkil etdi. Taqqoslash uchun eng yaqin qo'shni evristikasi bilan olingan boshlang'ich yechim  $T \rightarrow S \rightarrow Q \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow N \rightarrow T$  marshrutiga teng bo'lib,  $310 + 145 + 380 + 470 + 190 + 1100 = 2595$  km masofani bergan, ya'ni greedy yondashuv shaharning so'nggi nuqtasi sifatida Nukusni qoldirib, marshrut intihosida juda uzun  $T - N$  qirrasini qo'shishga majbur bo'lgan.

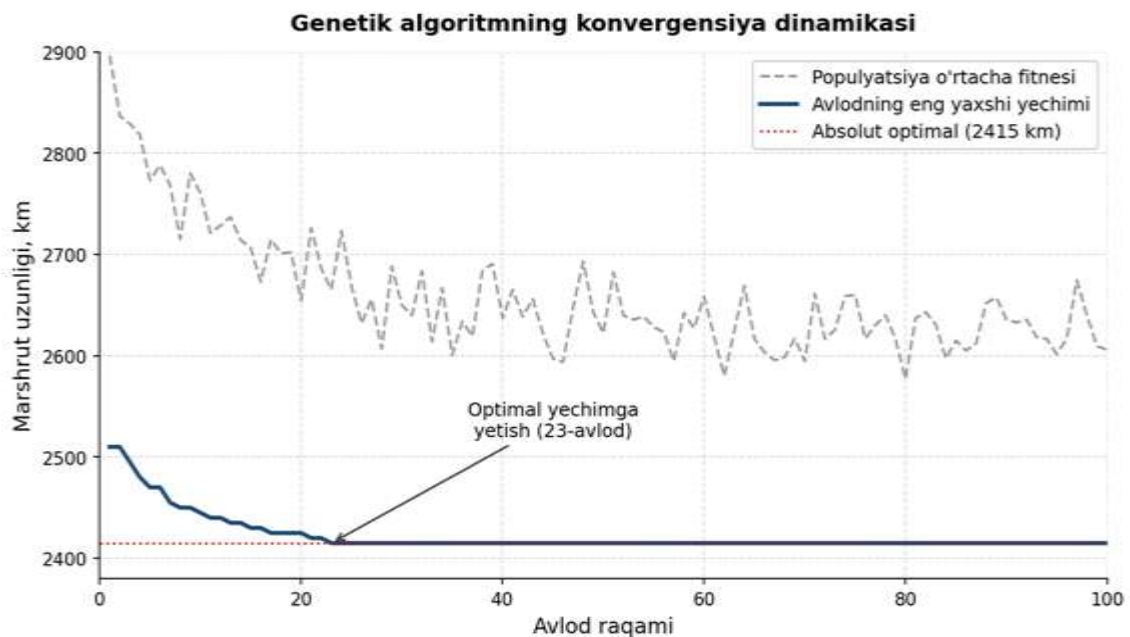
Algoritmnining kechishi davomida har avlodda eng yaxshi yechim qiymati monoton kamayib bordi. 23-avlodda algoritm  $T \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow N \rightarrow Q \rightarrow S \rightarrow T$  marshrutiga keldi. Mazkur marshrutning uzunligi  $550 + 470 + 190 + 750 + 145 + 310 = 2415$  km ni tashkil etdi. Keyingi 77 avlodda yaxshilanish kuzatilmadi va populyatsiya plato (stagnatsiya) holatiga yetdi. Demak, mazkur masala uchun genetik algoritm tomonidan topilgan optimal marshrut quyidagicha yoziladi:

$$\pi^* = (T \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow N \rightarrow Q \rightarrow S \rightarrow T), \square \square f(\pi^*) = 2415 \text{ km.}$$

Topilgan yechimning haqiqiy global optimum ekanligini tasdiqlash uchun barcha 60 ta unikal sikl to'liq qidirish usuli bilan tekshirildi va aynan shu marshrutning absolut minimum bo'lishi tasdiqlandi. Muhimi shundaki, genetik algoritm yechimga  $50 \times 23 = 1150$  fitnes bahosi orqali kelgan; bu kichik o'lchamdagi misolda to'liq qidirish (60 baholash) samaraliroq ko'rinishi mumkin, lekin  $n = 50$  holatda to'liq qidirish taxminan  $6 \times 10^{62}$  marshrutni baholashni talab qiladi va bu hozirgi har qanday

kompyuter uchun amalda mumkin emas. Genetik algoritmlar esa shu hajmdagi masalani sekundlar yoki daqiqalar ichida sifatli yechim bilan ta'minlay oladi.

Algoritmlarning konvergensiya dinamikasi 1-rasmda keltirilgan. Grafikdan ko'rinadiki, dastlabki 10 avlodda yechim sifati keskin yaxshilanadi: aynan shu davrda krossingover ota-onalarning yaxshi qismlarini muvaffaqiyatli birlashtirib, eng yaqin qo'shni evristikasidan yaxshiroq yechim hosil qiladi. Keyingi 10–22 avlod davomida yaxshilanish sekinlashadi, mutatsiya kichik tuzatishlar kiritadi va nihoyat 23-avlodda algoritmlar absolut optimumga yetib boradi. Undan keyingi avlodlarda yaxshilanish kuzatilmaydi — bu plato genetik algoritmlarning umumiy xususiyati hisoblanadi va parametr qayta sozlash, restart strategiyalari yoki sun'iy intellekt elementlari bilan gibridlash orqali bartaraf etiladi.



*1-rasm. Genetik algoritmlarning avlodlar bo'yicha eng yaxshi va o'rtacha fitnes qiymatining konvergensiya dinamikasi.*

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, genetik algoritmlar real masalalar bo'yicha tezlikda sifatli yechim beradi, ko'p sonli cheklovlar va variant nuanslarini moslashuvchan tarzda qo'llab-quvvatlaydi hamda sun'iy intellekt elementlari (mas., neyron-surrogat modellar, mustahkamlovchi o'rgatish agentlari yoki graflar bo'yicha neyron tarmoqlar) bilan birikmasida sifatni yanada oshirish mumkin. O'zbekiston logistika sohasi uchun mazkur yondashuv yetkazib berish marshrutlarini yoqilg'i sarfini, vaqt va ekspluatatsion xarajatlarni minimallashtirish nuqtai nazaridan optimallashtirish vositasi sifatida real foyda keltirishi mumkin. Yuqorida yechilgan masala kichik ko'lamli model holat bo'lib, undan olingan xulosalar yuzlab va minglab manzillarni qamrab olgan haqiqiy yetkazib berish tarmoqlariga ham printsipliy ravishda ko'chiriladi.

## XULOSA

Olib borilgan tadqiqot natijalariga ko'ra kommutatsiya masalasi nazariy

jihtadan kombinator optimallashtirishning markaziy ob'ektlaridan biri bo'lishi bilan birga, bugungi raqamli iqtisodiyot, logistika va transport tizimlari uchun fundamental amaliy ahamiyatga ega muammo ekanligi tasdiqlandi. NP-qiyin sinfga tegishliligi tufayli aniq usullar bilan yechishning hisoblash qiyinligi shaharlar soni ortishi bilan eksponensial tarzda ko'tariladi va bu hol metaevristik yondashuvlarni real o'lchamdagi masalalar uchun yagona realistik alternativaga aylantiradi.

Genetik algoritmlar mazkur sinfning eng samarali va keng qo'llaniladigan vakili sifatida o'zini namoyon etdi. Tabiat evolyutsiyasidan ilhomlangan tanlanma, krossingover va mutatsiya operatorlari yechimlar populyatsiyasini avlodlar davomida sifat jihatdan yaxshilab boradi va global optimumning yaqinida joylashgan yechimlarni topishga imkon yaratadi. O'zbekiston viloyat markazlari o'rtasidagi yetkazib berish marshrutini optimallashtirish bo'yicha ko'rib chiqilgan amaliy masalada genetik algoritm 23 avloddan keyin absolut optimal marshrut ( $T \rightarrow B \rightarrow U \rightarrow N \rightarrow Q \rightarrow S \rightarrow T$ , 2415 km) ni topgani algoritmning haqiqiy logistika muammolarida tatbiq qilinishi qulay va samarali ekanini isbotlaydi.

Sun'iy intellekt va chuqur o'rgatish texnologiyalarining keyingi yillardagi taraqqiyoti metaevristik usullarning samaradorligini yangi sath darajasiga olib chiqmoqda. Neyron-tarmoq surrogat modellari, mustahkamlovchi o'rgatish agentlari va graflar bo'yicha neyron tarmoqlardan foydalangan holda yaratilayotgan gibrid algoritmlar kelajakda ulkan o'lchamdagi marshrut optimallashtirish masalalarini real vaqt rejimida yechishga imkon beradi. O'zbekiston Respublikasida raqamli iqtisodiyotning rivojlanishi sharoitida bunday algoritmlarni mahalliy logistika kompaniyalari va transport-yetkazib berish xizmatlarining qaror qabul qilish tizimlariga joriy etish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb vazifa hisoblanadi. Keyingi tadqiqotlarda genetik algoritmni transformer-tarmoq bilan integratsiyalash va O'zbekiston shaharlari bo'yicha real ma'lumotlar to'plamida sinab ko'rish maqsadga muvofiqdir.

### ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Schrijver A. On the History of Combinatorial Optimization (Till 1960) // Handbook of Discrete Optimization. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – P. 1–68.
2. Dantzig G., Fulkerson R., Johnson S. Solution of a Large-Scale Travelling-Salesman Problem // Operations Research. – 1954. – Vol. 2, No. 4. – P. 393–410.
3. Held M., Karp R.M. A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1962. – Vol. 10, No. 1. – P. 196–210.
4. Applegate D.L., Bixby R.E., Chvátal V., Cook W.J. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. – Princeton: Princeton University Press, 2006. – 593 p.

5. Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B. The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization. – New York: John Wiley & Sons, 1985. – 463 p.
6. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. – Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 211 p.
7. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. – Boston: Addison-Wesley, 1989. – 432 p.
8. Larrañaga P., Kuijpers C.M.H., Murga R.H., Inza I., Dizdarevic S. Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators // Artificial Intelligence Review. – 1999. – Vol. 13, No. 2. – P. 129–170.
9. Talbi E.G. Metaheuristics: From Design to Implementation. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. – 624 p.
10. Bello I., Pham H., Le Q.V., Norouzi M., Bengio S. Neural Combinatorial Optimization with Reinforcement Learning // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR Workshop). – 2017. – 15 p.
11. Kool W., van Hoof H., Welling M. Attention, Learn to Solve Routing Problems! // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2019. – 25 p.