AGENTLARARO KELISHUVDA MOSLASHUVCHAN ISHONCH VAZNLARI: KO‘P MEZONLI QAROR QABUL QILISH UCHUN DINAMIK VAZNLASH MEXANIZMI VA UNING KONVERGENSIYASI

Eshankulov Hamza Ilhomovich

Buxoro davlat universiteti professori
E-mail: x.i.eshonkulov@buxdu.uz

K E Y W O R D S

ko‘p-agentli tizimlar, agentlararo kelishuv, moslashuvchan ishonch vaznlari, ko‘p mezonli qaror qabul qilish, konvergensiya, qisqaruvchi akslantirish, Pareto-samaradorlik

A B S T R A C T

Ushbu maqolada axborot-tahliliy muhitda ko‘p mezonli qaror qabul qilish jarayonida agentlararo kelishuvni ta’minlovchi moslashuvchan ishonch vaznli yangi mexanizm taklif etilgan. Mavjud yondashuvlardan farqli ravishda, agentlar o‘rtasidagi ishonch vaznlari statik emas, balki ularning baholari orasidagi farqqa qarab har iteratsiyada dinamik moslashtiriladi. Vaznlarni eksponensial pasayish qonuni hamda quyi chegara asosida moslashtirish baholari sezilarli farq qiluvchi agentlarning ta’sirini avtomatik kamaytiradi, ammo axborot almashinuvining to‘liq uzilishiga yo‘l qo‘ymaydi. Vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan stoxastik matritsalar ko‘paytmasi nazariyasi (Hajnal–Wolfowitz ergodik koeffitsiyenti) asosida taklif etilgan kelishuv operatorining yagona kollektiv bahoga geometrik tezlikda konvergensiyasi qat’iy isbotlangan. Real universitet boshqaruv ma’lumotlari (10 248 yozuv) asosidagi ablyatsion tajriba moslashuvchan vaznlash konvergensiyani 23 dan 16 iteratsiyaga qisqartirishini va qaror aniqligini 0,84 dan 0,89 gacha oshirishini ko‘rsatdi.

KIRISH

Zamonaviy axborot-tahliliy muhitlarda qaror qabul qilish jarayonlari katta hajmdagi heterogen ma’lumotlar, ko‘p mezonlilik hamda real vaqt rejimidagi talablarning kuchayishi natijasida sezilarli darajada murakkablashib bormoqda [14]. An’anaviy markazlashgan yondashuvlar bunday sharoitda hisoblash yuklamasining ortishi va qaror qabul qilish tezligining pasayishi muammosiga duch keladi. Shu sababli qaror qabul qilishni taqsimlangan, ya’ni bir nechta mustaqil intellektual agentlar ishtirokida tashkil etish istiqbolli yondashuv sifatida qaralmoqda [4, 13, 15].

Ko‘p-agentli tizimlarda har bir agent qaror variantlarini o‘zining lokal nuqtai nazaridan baholaydi. Biroq global muvozanatli yechimga erishish uchun agentlarning lokal baholarini yagona kollektiv bahoga yaqinlashtiruvchi kelishuv (consensus) mexanizmi zarur bo‘ladi [1, 12]. Klassik kelishuv modellarida agentlar o‘rtasidagi ta’sir vaznlari oldindan belgilanadi va jarayon davomida o‘zgarmas (statik) saqlanadi [1, 3, 12]. Bunday yondashuvning asosiy kamchiligi shundaki, agentlar baholarining sifati va ishonchliligi turlicha bo‘lishiga qaramay, ularga bir xil yoki qat’iy belgilangan vazn beriladi. Natijada baholari boshqa agentlardan sezilarli farq qiluvchi (ya’ni ishonchsiz yoki shovqinli) agent ham kollektiv bahoga teng huquqli ta’sir ko‘rsatib, konvergensiya tezligini pasaytiradi va yakuniy qaror aniqligini buzadi.

Mazkur maqolada ushbu muammoni hal etish maqsadida *moslashuvchan ishonch vaznli agentlararo kelishuv* mexanizmi taklif etiladi. Taklif etilayotgan yondashuvning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat: *birinchidan*, agentlararo ishonch vaznlari baholar farqiga qarab har iteratsiyada dinamik ravishda moslashtiriladi; *ikkinchidan*, vaznlarning quyi chegarasi joriy etilib, axborot almashinuvining to‘liq uzilishi oldini oladi; *uchinchidan*, vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan stoxastik matritsalar nazariyasi

(cc) BY

asosida moslashuvchan kelishuv jarayonining konvergensiyasi qat'iy matematik isbotlanadi. Aynan oxirgi jihat — vaznlar dinamik o‘zgarganda ham kafolatlangan barqarorlik — taklif etilgan mexanizmni mavjud moslashuvchan kelishuv usullaridan ajratib turadi.

MASALANING QO‘YILISHI VA TEGISHLI ISHLAR TAHLILI

Ko‘p-agentli kelishuv masalasi nazariy jihatdan grafda joylashgan agentlar holatlarining yagona qiymatga yaqinlashuvi sifatida ifodalanadi. DeGroot [12] kollektiv fikrni og‘irliklangan o‘rtacha sifatida shakllantiruvchi klassik modelni taklif qilgan. Olfati-Saber va Murray [1] uzluksiz hamda diskret kelishuv protokollarining barqarorligini graf Laplas matritsasi spektri orqali asoslagan. Jadbabaie va hammualliflar [2] hamda Ren va Beard [3] vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan tarmoq topologiyalarida kelishuv shartlarini o‘rgangan. Xiao va Boyd [11] kelishuv tezligini ikkinchi xos qiymat orqali optimallashtirish masalasini qo‘ygan, Nedić va hammualliflar [10] esa cheklangan kelishuv va optimallashtirishni birlashtirgan. Mazkur ishlarning batafsil sharhi [13] da keltirilgan. Biroq ushbu ishlarning aksariyatida vaznlar oldindan belgilangan va statik deb qabul qilinadi.

Ko‘p mezonli qaror qabul qilish yo‘nalishida Pareto-samaradorlik tamoyili hamda evolyutsion ko‘p mezonli optimallashtirish algoritmlari [8] keng qo‘llaniladi. Shu bilan birga, ko‘p-agentli muhitda Pareto tanlashni agentlararo kelishuv bilan birlashtirish hamda agentlarning ishonchlilik darajasini hisobga olish masalalari yetarli darajada o‘rganilmagan [4]. Ko‘p-agentli muhitda agentlarning xatti-harakat strategiyalarini moslashtirish uchun mustahkamlovchi o‘rganish (reinforcement learning) usullaridan ham keng foydalaniladi [9]. Ayrim ishlarda ishonchga asoslangan vaznlash taklif etilgan bo‘lsa-da, ularda vaznlar dinamik o‘zgarganda kelishuv konvergensiyasining saqlanishi nazariy jihatdan to‘liq asoslanmagan. Aynan shu ilmiy bo‘shliq — dinamik moslashuvchan vaznlash va uning konvergensiya kafolatining yagona model doirasida birlashtirilmaganligi — mazkur tadqiqotning yo‘nalishini belgilab berdi.

Faraz qilaylik, tizimda K ta agentdan iborat $A = \{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ to‘plam mavjud bo‘lib, ular bog‘langan $G = (A, E)$ grafi orqali o‘zaro ta’sirda bo‘lsin. Har bir a_i agent muayyan qaror varianti uchun m ta mezon bo‘yicha baholash vektorini shakllantiradi ($i = 1, \dots, K$):

$$\boldsymbol{e}_i^{(r)} = \left(e_{i,1}^{(r)}, \dots, e_{i,m}^{(r)}\right) \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

bu yerda $i = 1, \dots, K$ — agent indeksi, r — iteratsiya raqami. Kelishuv masalasining maqsadi barcha agentlar baholarini yagona kollektiv $\bar{\mathbf{c}} \in \mathbb{R}^m$ qiymatga yaqinlashtirishdan iborat, ya’ni har qanday $\varepsilon > 0$ uchun shunday R topiladiki, barcha $r \geq R$ da $\left\|\mathbf{e}_i^{(r)} - \bar{\mathbf{c}}\right\| < \varepsilon$ bo‘ladi.

MOSLASHUVCHAN ISHONCH VAZNLI KELISHUV MODELI

A. Klassik (statik) kelishuv operatori. Standart iterativ kelishuv jarayonida har bir agent o‘z bahosini boshqa agentlar baholari bilan farqni hisobga olgan holda yangilaydi:

$$\boldsymbol{e}_i^{(r+1)} = \boldsymbol{e}_i^{(r)} + \alpha \sum_{i\prime \neq i} w_{i,i\prime}\left(\boldsymbol{e}_{i\prime}^{(r)} - \boldsymbol{e}_i^{(r)}\right) \quad (2)$$

bu yerda $\alpha \in (0,1)$ — kelishuv koeffitsiyenti (yaqinlashish tezligini belgilaydi), $w_{i,i\prime} \geq 0$ — agentlar o‘rtasidagi ishonch vaznlari. (2)-ifodani ekvivalent og‘irliklangan o‘rtacha shaklida yozish mumkin:

$$\boldsymbol{e}_i^{(r+1)} = \sum_{i\prime=1}^{K} P_{i,i\prime}\, \boldsymbol{e}_{i\prime}^{(r)} \quad (3)$$

bu yerda $P = \left[P_{i,i\prime}\right]$ — kelishuv operatori matritsasi. Klassik modelda $w_{i,i\prime}$ qiymatlari oldindan belgilanadi va quyidagi qator-stoxastiklik shartini qanoatlantiradi:

$$w_{i,i\prime} \geq 0, \qquad \sum_{i'=1}^{K} w_{i,i'} = 1 \quad (4)$$

Bu shartlar har bir i uchun bajariladi va matritsa qator-stoxastik bo‘lishini va baholarning keskin o‘zgarib ketishining oldini olishini ta’minlaydi. Biroq vaznlarning statikligi tufayli ishonchsiz agentlar ta’siri kamaytirilmaydi.

B. Taklif etilgan moslashuvchan vaznlash mexanizmi.

(cc) BY

Taklif etilayotgan yondashuvda ishonch vaznlari har iteratsiyada agentlar baholari orasidagi farqqa qarab qayta hisoblanadi. Avval ikki agent baholari orasidagi masofa aniqlanadi:

$$d_{i,i'}^{(r)} = \| \boldsymbol{e}_i^{(r)} - \boldsymbol{e}_{i'}^{(r)} \| \qquad (5)$$

so‘ngra normallashtirilmagan moslashuvchan vazn eksponensial pasayish qonuni asosida hisoblanadi:

$$\widetilde{w}_{i,i'}^{(r)} = max\left(w_{min},\, e^{-\kappa d_{i,i'}^{(r)}}\right) \qquad (6)$$

bu yerda $\kappa > 0$ — ishonchning farqqa nisbatan sezgirligini boshqaruvchi parametr, $w_{min} \in (0,1)$ — vaznning quyi chegarasi. (6)-ifodaning mantiqiy mohiyati shundaki, agent a_i ning bahosi $a_{i'}$ ning bahosidan qanchalik ko‘p farq qilsa, $a_{i'}$ ga beriladigan ishonch shunchalik kam bo‘ladi. Ayni paytda w_{min} chegarasi hech bir agentga beriladigan vazn nolga aylanmasligini, ya’ni axborot almashinuvi to‘liq uzilmasligini kafolatlaydi. Keyingi bosqichda vaznlar qator bo‘yicha normallashtiriladi:

$$w_{i,i'}^{(r)} = \frac{\widetilde{w}_{i,i'}^{(r)}}{\sum_{j=1}^{K} \widetilde{w}_{i,j}^{(r)}} \qquad (7)$$

Normallashtirish natijasida (4)-shart har iteratsiyada avtomatik bajariladi, demak kelishuv operatori matritsasi $P^{(r)}$ vaqt bo‘yicha o‘zgarsa-da, doimo qator-stoxastik bo‘lib qoladi. Shunday qilib, kelishuv jarayoni vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan stoxastik matritsalar ko‘paytmasi sifatida ifodalanadi:

$$E^{(r+1)} = P^{(r)} E^{(r)} \qquad (8)$$

bu yerda $E^{(r)} = (\mathbf{e}_1^{(r)}, \ldots, \mathbf{e}_K^{(r)})^\top$ — barcha agentlar baholari matritsasi. Aynan vaznlarning iteratsiyadan iteratsiyaga o‘zgarishi konvergensiyani isbotlashni an’anaviy (statik matritsali) holatga nisbatan murakkablashtiradi va alohida nazariy tahlilni talab qiladi.

KONVERGENSIYA TAHLILI

Moslashuvchan vaznlash sharoitida konvergensiyani isbotlash uchun vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan stoxastik matritsalar ko‘paytmasining ergodikligi nazariyasidan, xususan Dobrushin–Hajnal ergodik koeffitsiyentidan foydalanamiz [5, 6, 7].

1-lemma (qator-stoxastiklikning saqlanishi). Har bir r iteratsiyada (7)-ifoda bo‘yicha qurilgan $P^{(r)}$ matritsa qator-stoxastik bo‘ladi: $P_{i,i'}^{(r)} \geq 0$ va $\sum_{i'} P_{i,i'}^{(r)} = 1$.

Isbot. (6)-ifodaga ko‘ra $\widetilde{w}_{i,i'}^{(r)} \geq w_{min} > 0$, demak barcha elementlar manfiy emas. (7)-dagi normallashtirish maxraji $\sum_j \widetilde{w}_{i,j}^{(r)} > 0$ bo‘lgani uchun $\sum_{i'} w_{i,i'}^{(r)} = 1$.

2-lemma (musbat elementlarning pastdan chegaralanganligi). *Agar agentlar grafi G bog‘langan va $w_{min} > 0$ bo‘lsa, u holda $P^{(r)}$ matritsaning har bir noldan farqli elementi musbat doimiy bilan pastdan chegaralanadi:*

$$P_{i,i'}^{(r)} \geq \delta = \frac{w_{min}}{K} > 0 \qquad (9)$$

Isbot. (6) va (7)-ifodalardan istalgan noldan farqli element uchun $w_{i,i'}^{(r)} = \widetilde{w}_{i,i'}^{(r)} / \sum_j \widetilde{w}_{i,j}^{(r)} \geq w_{min} / \sum_j \widetilde{w}_{i,j}^{(r)}$. Maxraj $\sum_j \widetilde{w}_{i,j}^{(r)} \leq K$ (chunki $\widetilde{w} \leq 1$), shu sababli $w_{i,i'}^{(r)} \geq w_{min}/K = \delta$. ■

Matritsalar ko‘paytmasining yaqinlashuvini baholash uchun Dobrushin ergodik koeffitsiyentini kiritamiz. Qator-stoxastik P matritsa uchun:

$$\tau(P) = 1/2 \max_{i,k} \sum_{j=1}^{K} |P_{i,j} - P_{k,j}| \qquad (10)$$

bu koeffitsiyent $0 \leq \tau(P) \leq 1$ qiymatlarni qabul qiladi.

Teorema (moslashuvchan kelishuvning geometrik konvergensiyasi). *Agar har bir iteratsiyada (i) $P^{(r)}$ qator-stoxastik (1-lemma), (ii) noldan farqli elementlar $\delta = w_{min}/K$ dan katta (2-lemma), (iii) agentlar grafi G bog‘langan bo‘lsa, u holda kelishuv operatorining ergodik koeffitsiyenti*

$$\tau\left(P^{(r)}\right) \leq \beta = 1 - \delta < 1 \qquad (11)$$

(cc) BY

bilan chegaralanadi va kelishuv jarayoni yagona kollektiv bahoga geometrik tezlikda yaqinlashadi:

$$\| E^{(r)} - \mathbf{1}\bar{\boldsymbol{c}}^{\top} \| \leq \beta^{r} \| E^{(0)} - \mathbf{1}\bar{\boldsymbol{c}}^{\top} \| \qquad (12)$$

bu yerda $\mathbf{1} = (1, \ldots, 1)^{\top}$, $\bar{\boldsymbol{c}}$ *— yagona kollektiv baho.*

Isbot. Stoxastik matritsalar ko‘paytmasi uchun ergodik koeffitsiyent submultiplikativ xususiyatga ega [5, 7]:

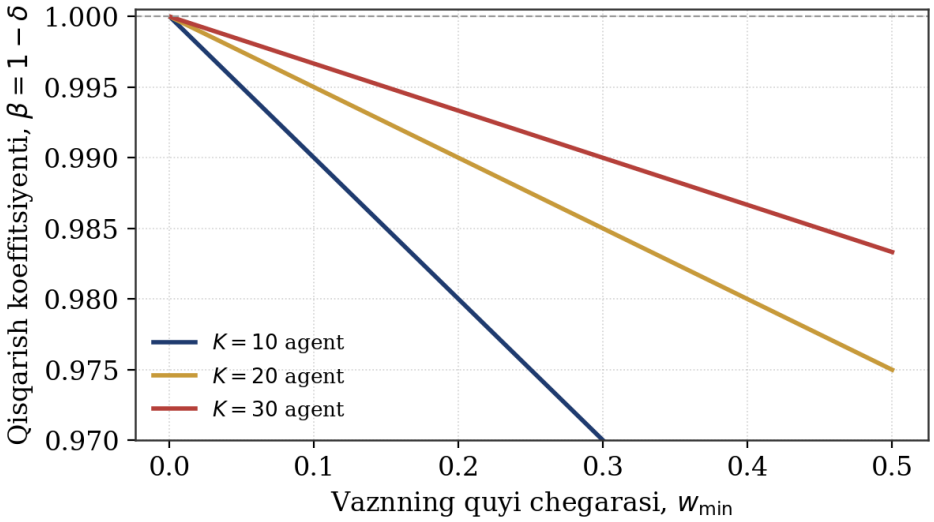
$$\tau\left(P^{(r)} \ldots P^{(0)}\right) \leq \prod_{s=0}^{r} \tau\left(P^{(s)}\right) \qquad (13)$$

2-lemmaga ko‘ra har bir $\mathrm{P}^{(\mathrm{r})}$ ning ixtiyoriy ikki qatori bir-biri bilan kamida δ qiymatda umumiy musbat massaga ega, shuning uchun ularning ℓ_1-masofasi $2(1-\delta)$ dan oshmaydi; demak (10)-ifodaga ko‘ra $\tau\left(\mathrm{P}^{(\mathrm{r})}\right) \leq 1 - \delta = \beta$. Graf bog‘langanligi yagona statsionar yo‘nalish (Perron vektori) mavjudligini ta’minlaydi. Banach qisqaruvchi akslantirish teoremasiga binoan $\beta < 1$ bo‘lgani uchun (8)-iterativ jarayon yagona qo‘zg‘almas nuqtaga — kollektiv $\bar{\mathbf{c}}$ qiymatga — yaqinlashadi va (12)-baho o‘rinli bo‘ladi.

Eslatma. $\beta = 1 - \delta$ qisqarish koeffitsiyenti kelishuv operatori matritsasining moduli bo‘yicha ikkinchi eng katta xos qiymati $|\lambda_2|$ bilan bevosita bog‘liq [11]:

$$|\lambda_2| \leq \tau(P) \leq \beta \qquad (14)$$

Shu sababli $\mathrm{w_{min}}$ ni oshirish δ ni kattalashtiradi, bu esa β ni kichraytirib, konvergensiyani tezlashtiradi. Biroq juda katta $\mathrm{w_{min}}$ agentlar baholaridagi xilma-xillikni susaytirishi mumkin, shu bois $\mathrm{w_{min}}$ muvozanatli tanlanadi. Mazkur bog‘liqlik 1-rasmda turli K qiymatlari uchun keltirilgan.



1-rasm. Qisqarish koeffitsiyenti $\beta = 1 - \delta$ *ning* w_{min} *ga bog‘liqligi (turli agentlar soni K uchun)*

1-rasmdan ko‘rinadiki, $\mathrm{w_{min}}$ ning oshishi qisqarish koeffitsiyentini kamaytiradi, demak konvergensiyani tezlashtiradi; agentlar soni K ortgani sayin esa bitta agentning kollektiv bahoga ta’siri kamayadi va konvergensiya sekinlashadi.

EKSPERIMENTAL NATIJALAR

A. Eksperimental muhit. Taklif etilgan moslashuvchan vaznlash mexanizmining amaliy samaradorligini baholash maqsadida ablyatsion (ajratib baholash) tajribasi o‘tkazildi. Eksperimental ma’lumotlar Buxoro davlat universitetining HEMIS, Moodle, Uniwork va KPI monitoring tizimlaridan olingan bo‘lib, 2022–2025 o‘quv yillariga oid 10 248 ta yozuv va 12 ta atributdan iborat. Ma’lumotlar tozalash, normalizatsiya va atributlarni ajratish bosqichlaridan o‘tkazildi hamda 80% o‘qitish va 20% test to‘plamlariga ajratildi. Tizim $\mathrm{K} = 10{,}20{,}30{,}40{,}50$ agent konfiguratsiyalarida sinovdan o‘tkazildi; parametrlar empirik ravishda $\alpha = 0{,}5$, $\kappa = 1{,}0$, $\mathrm{w_{min}} = 0{,}05$ etib tanlandi.

B. Konvergensiya va qiyosiy tahlil. Taklif etilgan model an’anaviy yondashuvlar bilan

(cc) BY

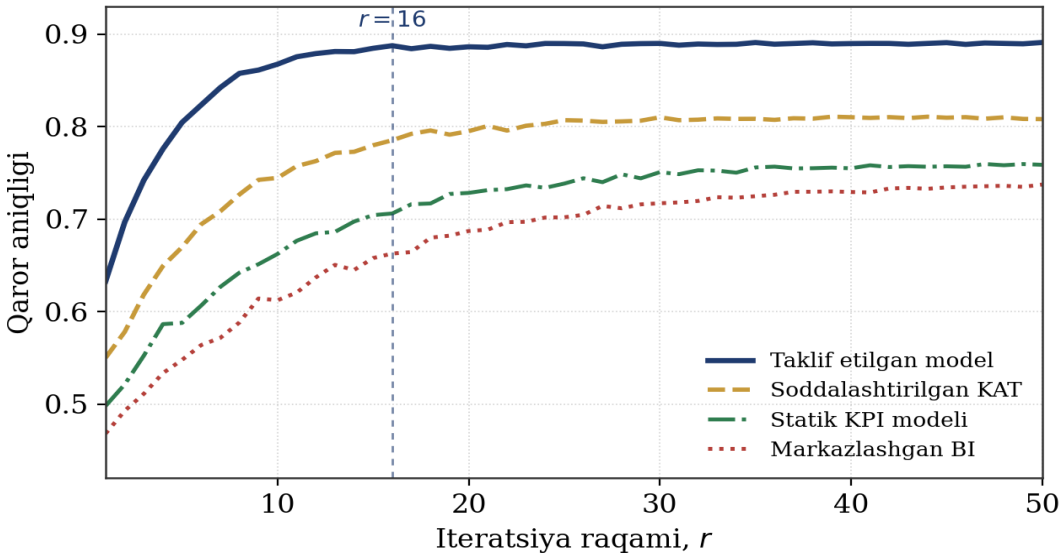
qiyoslandi: statik KPI modeli, markazlashgan business intelligence (BI) hamda soddalashtirilgan ko‘p-agentli tizim (KAT). Qiyosiy natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

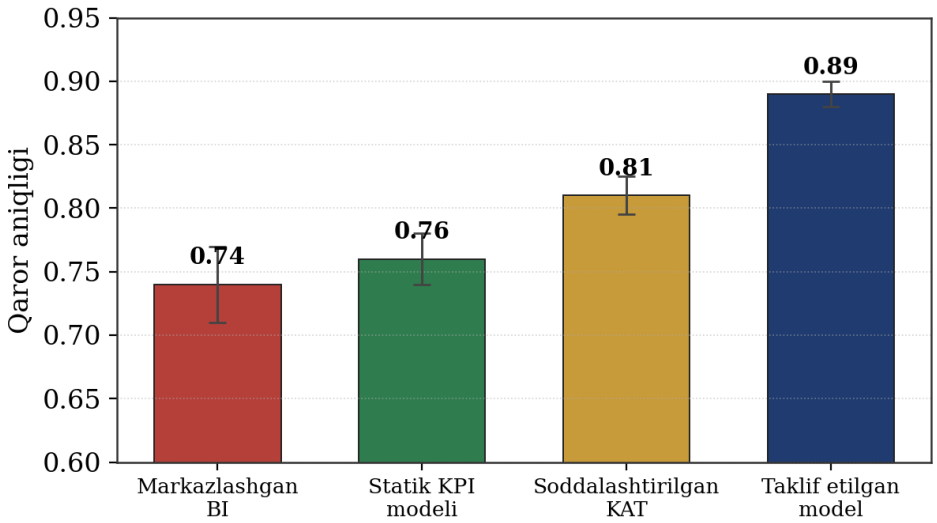
Taklif etilgan modelni mavjud yondashuvlar bilan qiyosiy tahlili

Model	Aniqlik	Vaqt (ms)	Barqarorlik	Konvergensiya iteratsiyasi
Statik KPI modeli	0,76 ± 0,02	120 ± 14	o‘rtacha	31
Markazlashgan BI	0,74 ± 0,03	137 ± 16	past	42
Soddalashtirilgan KAT	0,81 ± 0,015	110 ± 10	o‘rtacha	24
Taklif etilgan model	**0,89 ± 0,01**	**94 ± 9**	**yuqori**	**16**

1-jadvaldan ko‘rinadiki, taklif etilgan model aniqlik (0,89), hisoblash vaqti (94 ms), barqarorlik hamda konvergensiya tezligi (16 iteratsiya) bo‘yicha barcha bazaviy yondashuvlardan ustun natija ko‘rsatdi. Modellarning iteratsiyalar bo‘yicha aniqlik dinamikasi 2-rasmda, yakuniy aniqlik ko‘rsatkichlari esa 3-rasmda taqdim etilgan.



2-rasm. Iteratsiyalar bo‘yicha qaror aniqligining konvergensiya tahlili



3-rasm. Modellar bo‘yicha qaror aniqligining qiyosiy tahlili (standart og‘ishlar bilan)

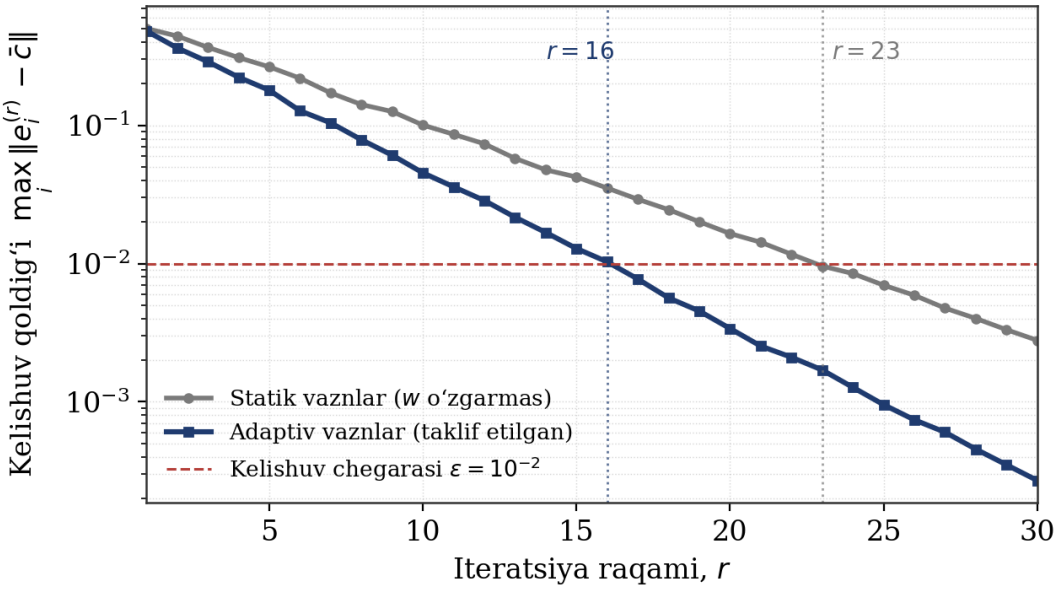
(cc) BY *dtai.uz*

2-rasmdan ko‘rinadiki, taklif etilgan model boshqa modellarga nisbatan tezroq konvergensiyaga erishadi: uning aniqlik ko‘rsatkichi dastlabki iteratsiyalardayoq keskin oshib, 16-iteratsiya atrofida barqaror qiymatga yaqinlashadi. 3-rasm esa yakuniy aniqlik bo‘yicha ustunlikni vizual tasdiqlaydi.

C. Ablyatsion tajriba. Moslashuvchan vaznlash mexanizmining hissasini alohida baholash maqsadida model bir xil sharoitda ikki rejimda ishga tushirildi: agentlararo vaznlar o‘zgarmas saqlangan *statik rejim* hamda vaznlar (6)–(7)-ifodalar asosida moslashtiriladigan *moslashuvchan rejim*. Qolgan barcha komponentlar ikkala rejimda ham bir xil saqlandi. Natijalar 2-jadval va 4-rasmda keltirilgan.

2-jadval. Agentlararo vaznlarni yangilash mexanizmining qiyosiy tahlili

Kelishuv mexanizmi	Aniqlik	Konvergensiya iteratsiyasi	Barqarorlik
Statik vaznlar (w o‘zgarmas)	0,84 ± 0,015	23	o‘rtacha
Moslashuvchan vaznlar (taklif etilgan)	**0,89 ± 0,01**	**16**	**yuqori**



4-rasm. Kelishuv qoldig‘ining iteratsiyalar bo‘yicha kamayishi: statik va moslashuvchan vaznlash (logarifmik shkala)

2-jadval va 4-rasmdan ko‘rinadiki, moslashuvchan vaznlash konvergensiyani 23 dan 16 iteratsiyaga qisqartirib, qaror aniqligini 0,84 dan 0,89 gacha oshirdi hamda natijalar barqarorligini yaxshiladi (dispersiya 0,015 dan 0,01 gacha kamaydi). Kuzatilgan yaxshilanish (6)-mexanizm baholari sezilarli farq qiluvchi agentlarning ta’sirini avtomatik kamaytirib, ishonchli agentlar fikriga ko‘proq tayanish imkonini berishi bilan izohlanadi. Bunda w_{min} quyi chegarasi agentlararo axborot almashinuvining to‘liq uzilishining oldini olib, tizim moslashuvchanligini saqlaydi.

Natijalarning statistik ishonchliligini baholash maqsadida moslashuvchan va statik rejimlar o‘rtasida qaror aniqligi ko‘rsatkichi bo‘yicha ikki tanlamali mustaqil Studentning t-testi qo‘llanildi. Hisob-kitob natijalariga ko‘ra farq statistik jihatdan ahamiyatli bo‘ldi ($t = 8{,}37$, $df = 8$, $p < 0{,}001$), bu esa moslashuvchan vaznlash mexanizmining ustunligini tasdiqlaydi. Olingan empirik natijalar yuqorida isbotlangan nazariy xulosaga — w_{min} ni hisobga olgan moslashuvchan vaznlash konvergensiya kafolatini buzmasdan uni tezlashtirishi — to‘liq mos keladi.

(cc) BY

XULOSA

Maqolada ko‘p mezonli qaror qabul qilish jarayonida agentlararo kelishuvni ta’minlovchi moslashuvchan ishonch vaznli yangi mexanizm ishlab chiqildi. Mavjud yondashuvlardan farqli ravishda, ishonch vaznlari statik emas, balki agentlar baholari orasidagi farqqa qarab har iteratsiyada eksponensial pasayish qonuni hamda quyi chegara (w_{min}) asosida dinamik moslashtiriladi.

Tadqiqotning asosiy nazariy natijasi shundan iboratki, vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan stoxastik matritsalar va Dobrushin–Hajnal ergodik koeffitsiyenti nazariyasi yordamida moslashuvchan kelishuv operatorining yagona kollektiv bahoga geometrik tezlikda konvergensiyasi qat’iy isbotlandi. Qator-stoxastiklik va musbat elementlarning pastdan chegaralanganligi ($\delta = w_{min}/K$) konvergensiya koeffitsiyentini $\beta = 1 - \delta < 1$ bilan chegaralashi ko‘rsatildi.

Real universitet boshqaruv ma’lumotlari asosidagi ablyatsion tajriba moslashuvchan vaznlash statik vaznlashga nisbatan konvergensiyani 23 dan 16 iteratsiyaga qisqartirishini, qaror aniqligini 0,84 dan 0,89 gacha oshirishini hamda natijalar barqarorligini yaxshilashini tasdiqladi; bu natijalar nazariy xulosalar bilan to‘liq muvofiq keladi.

ADABIYOTLAR

1. Olfati-Saber R., Murray R.M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1520–1533.
2. Jadbabaie A., Lin J., Morse A.S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2003. – Vol. 48, No. 6. – P. 988–1001.
3. Ren W., Beard R.W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2005. – Vol. 50, No. 5. – P. 655–661.
4. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
5. Hajnal J. Weak ergodicity in non-homogeneous Markov chains // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. – 1958. – Vol. 54, No. 2. – P. 233–246.
6. Wolfowitz J. Products of indecomposable, aperiodic, stochastic matrices // Proceedings of the American Mathematical Society. – 1963. – Vol. 14, No. 5. – P. 733–737.
7. Seneta E. Non-negative Matrices and Markov Chains. 2nd ed. – New York: Springer, 2006. – 287 p.
8. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6, No. 2. – P. 182–197.
9. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. – Cambridge, MA: MIT Press, 2018. – 552 p.
10. Nedić A., Ozdaglar A., Parrilo P.A. Constrained consensus and optimization in multi-agent networks // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2010. – Vol. 55, No. 4. – P. 922–938.
11. Xiao L., Boyd S. Fast linear iterations for distributed averaging // Systems & Control Letters. – 2004. – Vol. 53, No. 1. – P. 65–78.
12. DeGroot M.H. Reaching a consensus // Journal of the American Statistical Association. – 1974. – Vol. 69, No. 345. – P. 118–121.
13. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2013. – Vol. 9, No. 1. – P. 427–438.
14. Power D.J. Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers. – Westport: Quorum Books, 2002. – 251 p.
15. Eshankulov Kh.I., Murodova R.B. Multi-agent tizimlarining business intelligence integratsiyasi uchun Petri to‘ri asosidagi modeli // Raqamli transformatsiya va sun’iy intellekt. – 2024. – Vol. 2, No. 1. – P. 90–99.

(cc) BY