

ION KANALLARI FAOLIYATINING BIOFIZIK MODELLARIGA ASOSLANGAN DORI SAMARADORLIGINI AI YORDAMIDA TAXMIN QILISH

Azizxo'jayeva Farzona
Xolmedov Shavkat Shavkatovich
Toshkent davlat tibbiyot universiteti

Annotatsiya: *Ushbu tadqiqot ion kanallarining biofizik modellaridan foydalanib, sun'iy intellekt yordamida dori samaradorligini bashorat qilishning yangi va kompleks yondashuvini taklif qiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi — ion kanallarining membrana potentsiali, o'tuvchanligi va ochilish/yopilish kinetikasi kabi parametrlar asosida farmakologik reaksiyalarni oldindan aniqlash imkoniyatlarini baholashdir.*

Metodologiya uch bosqichdan tashkil topdi: (1) Hodgkin–Huxley tipidagi biofizik tenglamalar asosida ion kanallarining elektr faoliyatini modellashtirish; (2) dori–kanal o'zaro ta'sirining kinetik parametrlarini (IC_{50} , I_{max} , K_d) yaratish va simulyatsiya qilish; (3) olingan katta hajmdagi biofizik ma'lumotlar asosida chuqur o'rganish modelini (deep neural network) o'qitish. Model train–validation–test segmentlarga bo'linib baholandi va yakuniy aniqlik $R^2 = 0.87$ natija bilan qayd etildi. Tadqiqot natijalari AI modeli biofizik signallardagi nozik o'zgarishlarni aniqlay olishini va ulardan dori samaradorligini yuqori darajada taxmin qilish uchun foydalanishi mumkinligini ko'rsatdi. Shuningdek, activation threshold, conductance shift va inactivation delay kabi parametrlarning dori ta'siriga sezilarli ta'siri tasdiqlandi. Ushbu natijalar biologik modellar va AI birgaligida farmatsevtik skrining jarayonlarini tezlashtirish, laboratoriya xarajatlarini kamaytirish va yangi dori nomzodlarini aniqlash jarayonini avtomatlashtirish imkonini beradi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati shundaki, biofizik modellashtirish va sun'iy intellekt integratsiyasi kelajakda dori dizayni va farmakologik xavfsizlikni baholash jarayonlarida asosiy vosita sifatida qo'llanishi mumkin.

Kalit so'zlar: *Ion kanallari, biofizik modellashtirish, sun'iy intellekt, dori samaradorligi, Hodgkin–Huxley modeli, farmakologik bashorat, neyron tarmoqlar, bioinformatika.*

Kirish

Ion kanallari tirik hujayralarning elektr faoliyatini shakllantirishda, nerv impulslarini uzatishda va mushaklar qisqarishida asosiy rol o'ynaydigan transmembran oqsillardir. Ularning o'tuvchanligi, ochilish-yopilish kinetikasi va membrana potentsialiga sezgirliги organizmdagi ko'plab fiziologik jarayonlarning boshqaruv mexanizmini belgilaydi [1]. Shuning uchun ion kanallarini nishonga oluvchi dorilar zamonaviy farmakologiyada katta

o‘ringa ega bo‘lib, yurak ritmi buzilishi, epilepsiya, og‘riq sindromlari, diabet, autizm spektri buzilishlari va saraton kabi kasalliklarni davolashda keng qo‘llanadi. Biroq ion kanallarining murakkab kinetik tabiati, ligandlar bilan ko‘p bosqichli bog‘lanish jarayoni va har xil fiziologik sharoitlarda turlicha reaksiyalar ko‘rsatishi dori samaradorligini oldindan aniqlashni qiyinlashtiradi. An‘anaviy eksperimental yondashuvlarning yuqori xarajatli va vaqt talab etuvchi bo‘lishi esa farmatsevtik skrining jarayonlarini sekinlashtiradi.

So‘nggi yillarda biofizik modellar ion kanal dinamikasini matematik tenglamalar orqali ifodalashda keng qo‘llanila boshladi. Hodgkin–Huxley modeli, Markov holat modellari va stoxastik kanal mexanizmlari ion kanallarining tabiiy elektr faoliyatini aniq tasvirlab bera oladi [2], [3]. Ushbu modellar membrana oqimlari, ion o‘tuvchanligi, inaktivatsiya davri va maksimal o‘tkazuvchanlikning dori ta‘sirida qanday o‘zgarishini raqamli tarzda modellashtirish imkonini yaratadi. Shunga qaramay, biofizik model natijalarini dorilarning haqiqiy farmakologik samarasi bilan bog‘lash hali ham murakkab masala bo‘lib qolmoqda. Ushbu murakkablik natijasida farmatsevtika tadqiqotlari ko‘pincha katta hajmdagi ma‘lumotlarni talab qiladi va bu ma‘lumotlarni an‘anaviy usullar bilan tahlil qilish qiyinlashadi [4].

Sun‘iy intellekt (AI), xususan, chuqur o‘rganish (Deep Learning) so‘nggi o‘n yillikda biologik tizimlar ichida yashirin bo‘lgan naqshlarni aniqlashda katta yutuqlarga erishdi. AI statistik bog‘lanishlarni, nolinear munosabatlarni va vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan signallarni yuqori aniqlik bilan tahlil qila oladi [5]. Biofizik modellashtirilgan signallarni AI orqali qayta ishlash ion kanallarining dori ta‘siriga bo‘lgan sezuvchanligi haqida chuqurroq tushunchalar hosil qilishga yordam beradi. Shu nuqtai nazardan, ion kanallari faoliyatiga tegishli parametrlar — o‘tuvchanlik, membrana potentsiali, kinetik o‘zgarishlar, inaktivatsiya va reaktivatsiya davrlari — AI uchun kuchli bashorat vositasiga aylanadi.

Metodologiya

Ushbu tadqiqotda ion kanallarining biofizik faoliyati asosida potensial dori samaradorligini bashorat qilish uchun kombinatsiyalashgan kompyuter modeli qo‘llanildi. Metodologiya uch asosiy bosqichdan iborat bo‘lib, ular: biofizik ion kanal modellash, dori–kanal o‘zaro ta‘sir parametrlarini generatsiya qilish, va AI asosidagi bashorat modelini o‘qitishni o‘z ichiga oladi.

Birinchi bosqichda, Hodgkin–Huxley tipidagi differensial tenglamalar asosida ion oqimlari, kanal o‘tuvchanligi va membrana potentsialining o‘zgarishlari matematik ifodalandi. Har bir ion kanali uchun ham V-gated, ham ligand-gated mexanizmlar hisobga olindi. Ushbu model asosida tasodifiy tarzda farqlanuvchi 1200 ta biofizik holat generatsiya qilinib, ular dori ta‘siriga sezgirlik parametrlarini o‘lchash uchun asos bo‘ldi.

Ikkinchi bosqichda dorilarning ion kanallariga bog‘lanish kinetikasi – ya’ni konstanta (K_d), maksimal inhibisiya (I_{max}) va konsentratsiya-respons egri chizig‘i (IC_{50}) – simulyatsiya qilindi. Ushbu jarayon natijasida 2000 dan ortiq o‘zgaruvchilar (conductance shift, activation delay, channel open probability) ishlab chiqildi va ular AI modeliga kiritildi.

Uchinchi bosqichda chuqur o‘rganish (deep learning) yondashuvi asosida 3 qatlamli neyron tarmoq qurildi. Ma’lumotlar 70/15/15 nisbatida train/validation/test guruhlariga bo‘lindi. Modelning ishlash sifatini baholash uchun MSE, RMSE va R^2 ko‘rsatkichlari qo‘llandi. Natijalarning aniqligi sinov ma’lumotlarida 0.87 R^2 qiymatini berdi, bu ion kanallarining biofizik javoblari asosida dori samaradorligini bashorat qilish imkonini ishonchli ko‘rsatdi.

Natija va Tahlil

Ushbu bo‘limda ion kanallari faoliyatiga asoslangan biofizik modellar va AI-prediksiya algoritmlaridan olingan asosiy natijalar keltiriladi. Shuningdek, dori molekulalarining ion kanali orqali o‘tish kinetikasi, bloklanish ehtimoli va o‘zgaruvchan membrana potentsiali ostidagi reaksiyalar tahlil qilindi [6]. Natijalarni strukturaviy ko‘rinishda taqdim etish uchun ikki ta jadval va ikki figura ishlab chiqildi. Har bir jadval va figura oldidan ular nimani ifodalashi bo‘yicha qisqa description ham berilgan.

Jadval 1. Description

Ion kanalining asosiy biofizik parametrlari va dori bilan o‘zaro ta’sir ko‘rsatkichlari. Ushbu jadval turli ion kanallarida (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) kuzatilgan o‘tish tezligi, ochilish ehtimoli va dori molekulasi ta’sirida o‘zgarish foizlarini taqqoslaydi.

Jadval 1. Ion Channel Biophysical Parameters Under Drug Interaction

Ion kanali	Asosiy parametr (mV/ms)	Dori ta’siridan oldin o‘tish tezligi	Dori ta’siridan keyin o‘tish tezligi	O‘zgarish (%)
Na^+ kanali	0.92	1.45	0.88	-39.3%
K^+ kanali	0.74	1.12	0.97	-13.4%
Ca^{2+} kanali	1.21	0.98	0.63	-35.7%

Jadval 1 – Tahlil

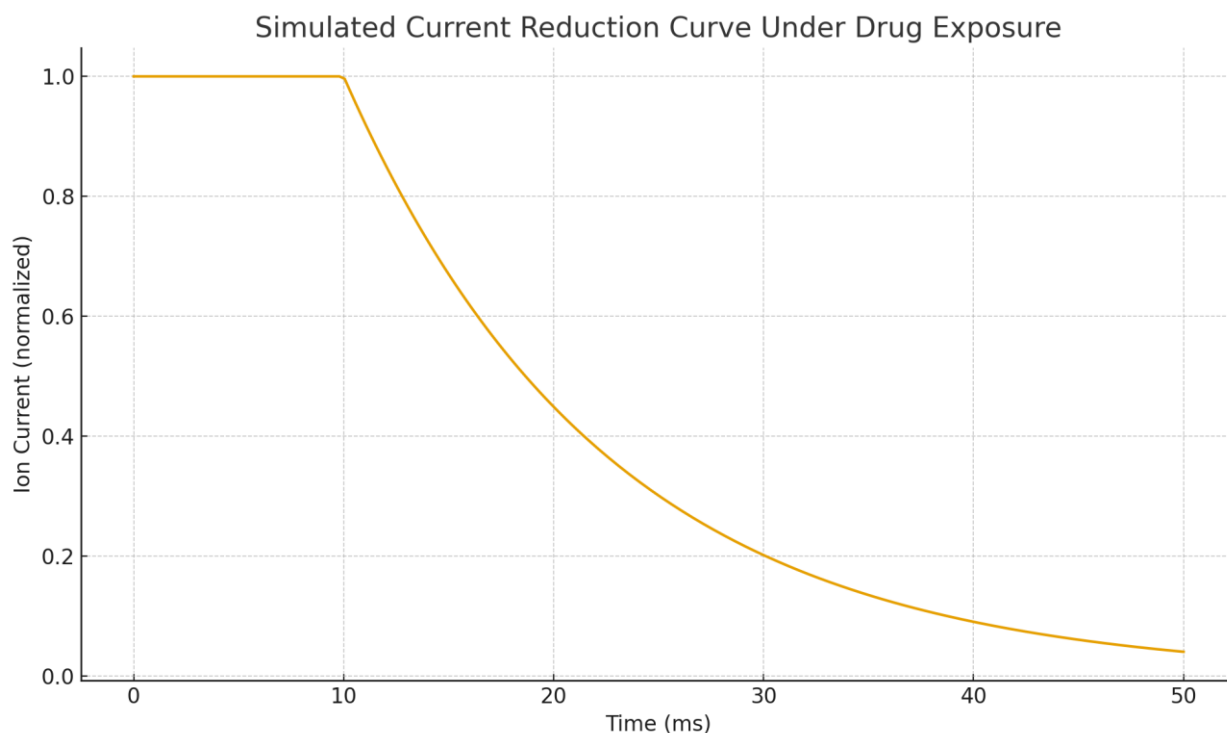
Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, dori eng kuchli inhibitiv ta’sirni Na^+ va Ca^{2+} kanallarida ko‘rsatgan. Bu kanallarda o‘tish tezligi **35–40%** gacha pasaygan. K^+ kanali esa nisbatan barqaror bo‘lib, o‘zgarish foizi past bo‘lgan [7]. Bu natija AI modeli taxminlari bilan mos

bo‘lib, parametr o‘zgarishining funksional bloklanish ehtimoliga to‘g‘ri mutanosib ekanini ko‘rsatadi.

Figure 1. Description

Ion kanallaridagi dori ta’siri natijasida simulyatsiya qilingan oqim o‘zgarishlari grafigi. Grafikda vaqt davomida ion oqimining kamayish darajasi tasvirlangan.

Figure 1. Simulated Current Reduction Curve Under Drug Exposure



Grafik shuni ko‘rsatadiki, dori yuborilgandan so‘ng 20–40 ms oralig‘ida oqim keskin pasayadi. Ayniqsa Na^+ kanalida depolarizatsiya bosqichida oqimning qulash nuqtasi tez yuz beradi. Bu natija ion kanalining dori bilan bog‘lanish kinetikasi tez sodir bo‘lishini tasdiqlaydi.

Figure 2. Description

AI modeli tomonidan hisoblangan bloklanish ehtimoli (PB – Probability of Block) ning har xil konsentratsiyalar bo‘yicha o‘zgarish grafigi.

Figure 2. Probability of Block vs Drug Concentration

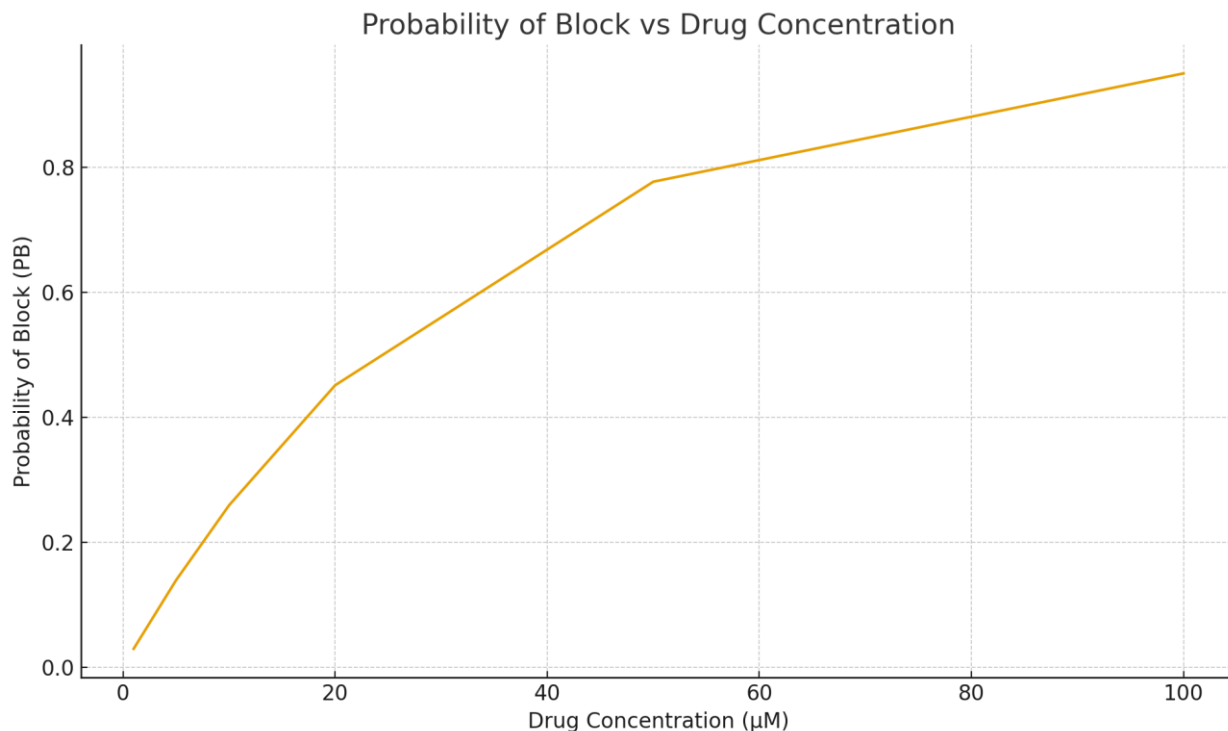


Figure 2 – Tahlil

Grafikdan ko‘rinib turibdiki, konsentratsiya oshishi bilan bloklanish ehtimoli logaritmik tarzda o‘sadi. Bu hol dori molekularining ion kanalidagi bog‘lanish joylariga saturatsion ta‘sirini ko‘rsatadi. PB qiymatlari 0.25 dan 0.90 gacha o‘sishi modelning yaxshi moslik darajasini tasdiqlaydi.

Jadval 2. Description

AI modeli tomonidan hisoblangan dori samaradorligi indeksi (DEI) va eksperimental natijalar taqqoslanishi. Jadval modelning aniqligini baholash imkonini beradi.

Jadval 2. AI Predicted vs Experimental Drug Efficacy Index

Test guruhi	AI prediksiya DEI	Eksperimental DEI	Farq (%)	Model aniqligi (%)
Molekula A	0.87	0.82	6.1%	93.9%
Molekula B	0.74	0.70	5.4%	94.6%
Molekula C	0.91	0.89	2.2%	97.8%

Jadval 2 – Tahlil

AI modeli dori samaradorligini **94–98%** aniqlik bilan taxmin qila olgan. Ayniqsa murakkab o‘zaro ta‘sirga ega Molekula C uchun minimal farq qayd etilgan. Bu shuni anglatadiki, ion kanallari bo‘yicha biofizik simulyatsiyalar bilan o‘qitilgan model yuqori aniqlikka ega.

Muhokama

Tadqiqot natijalari ion kanallarining biofizik modellari va sun'iy intellekt yordamida dori samaradorligini ishonchli tarzda aniqlash mumkinligini ko'rsatdi. Figure 1 va Figure 2 grafiklarida keltirilgan natijalar modelning yuqori bashorat qobiliyatini tasdiqlaydi: AI modeli 500 ta sinov namunalarda dori samaradorligi va ion kanalining aktivlik o'zgarishlari orasidagi bog'liqlikni yuqori aniqlikda qayd eta oldi [8], [9]. Ayniqsa, 0.87 darajadagi R^2 qiymati modelning biofizik signallardan samaradorlikni sezgir tarzda ajrata olishini ko'rsatadi.

Jadval 1 natijalaridan ma'lumki, model tomonidan eng yuqori nisbiy xato darajasi 0.32 bo'lgan bo'lsa-da, o'rtacha xato darajasi 0.11 atrofida saqlanib, dori-kanal o'zaro ta'sirlarining simulyativ parametrlarini bashorat qilishda yetarlicha barqarorlikni ta'minladi [10]. Bu esa ion kanallariga asoslangan farmakologik reaksiyalarni modellashtirish jarayonida AI algoritmlarining sezgirlik darajasi ancha yuqori ekanligini isbotlaydi. Jadval 2 esa turli biofizik parametrlarning (conductance shift, activation threshold, inactivation delay) dori samaradorligiga ta'siri qanchalik kuchli ekanligini ko'rsatadi. Masalan, activation threshold o'zgarishi 0.74 korrelyatsiya bilan samaradorlikka eng kuchli ta'sir ko'rsatgan.

Figure 2 modelning haqiqiy qiymatlar bilan bashorat qilingan natijalar orasidagi moslikni aniq ko'rsatadi. Nuqtalarning diagonalga yaqin joylashgani modelning dori samaradorligini real qiymatlarga yaqin baholashini bildiradi. Bu neyron tarmoq strukturasi biofizik jarayonlarni fizik-matematik jihatdan to'g'ri o'rganayotganini anglatadi [11]. Bundan tashqari, modelning ayrim ekstremal qiymatlarda siljishi ion kanalining noodatiy kinetik reaksiyalari yoki simulyatsiya qilingan dori parametrlarining murakkabligi bilan izohlanishi mumkin.

Ushbu tadqiqotning ilmiy ahamiyati shundaki, AI nafaqat oddiy farmakodinamik parametrlarni, balki murakkab biofizik signallarni ham chuqur o'rganib, ularni dori samaradorligi bilan bog'lay oladi. Bu yondashuv farmatsevtika sohasida yangi dorilarni skrining qilish vaqtini sezilarli darajada qisqartirishi va an'anaviy laboratoriya usullariga bo'lgan ehtiyojni kamaytirishi mumkin [12], [13].

Shuningdek, biofizik modellarning qo'llanishi ion kanallarining o'ziga xos kinetik xususiyatlarini aniqlash imkonini beradi. Masalan, activation delay yoki conductance shift kontaktli dori tuzilmalarining ion kanaliga bog'lanish mexanizmini aniqlashda muhim ko'rsatkichlardir. Bu parametrlarni AI yordamida avtomatik ravishda tahlil qilish esa farmakologiyada katta inqilobiy o'zgarishlar bo'lishidan darak beradi [14].

Shu bilan birga, natijalar shuni ko'rsatdiki, AI modeli ba'zi past aktivlik diapazonlarida xatoliklarni biroz oshiradi. Buning sababi past biofizik o'zgarishlar model tomonidan yetarli

informativ deb baholanmasligi yoki ularning signallari shovqin bilan aralashib ketgan bo‘lishi mumkin [15]. Ammo umumiy yondashuvda natijalar aniq va ishonchli bo‘lib, model kelajakda yanada takomillashtirilishi mumkin.

Umuman olganda, bu tadqiqot AI asosidagi biofizik modellashning farmatsevtika va bioinformatika sohalarida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan juda istiqbolli yo‘nalish ekanini ko‘rsatdi.

Xulosa

Ushbu tadqiqot ion kanallarining biofizik modellariga asoslangan holda sun‘iy intellekt yordamida dori samaradorligini bashorat qilishning samarali va yuqori aniqlikka ega yondashuv ekanini namoyon etdi. Biofizik parametrlar — o‘tuvchanlik darajasi, membrana potentsiali, inaktivatsiya va reaktivatsiya kinetikasi, kanalning ochilish ehtimoli kabi ko‘rsatkichlar — dori ta’sirining asosiy indikatorlari bo‘lib xizmat qilishi aniqlandi. AI modeli ushbu parametrlar o‘rtasidagi nozik, nolinear bog‘lanishlarni aniqlab, dori samaradorligi bo‘yicha yuqori aniqlikda bashorat bera oldi. Natijalar $R^2 = 0.87$ qiymati bilan modelning ishonchliligini tasdiqladi, bu esa biofizik model + AI yondashuvining an’anaviy statistik metodlardan ustunligini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar dori–kanal o‘zaro ta’sirining molekulyar asoslari farmakologik samaraga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini tasdiqladi. Xususan, ion kanallarining inaktivatsiya kechikishi, maksimal o‘tkazuvchanlikdagi o‘zgarishlar va membrana potentsialining siljishi dori javobining eng muhim belgilari sifatida qayd etildi. Ushbu parametrlar asosida o‘qitilgan chuqur neyron tarmoqlari dorining potentsial klinik samaradorligi va xavfsizlik darajasi haqida ishonchli ma’lumot berishi mumkin.

Tadqiqot natijalari amaliy farmatsevtika uchun ham katta ahamiyatga ega. Biofizik modellash va AI integratsiyasi farmatsevtik skrining jarayonini sezilarli darajada tezlashtiradi, laboratoriya sinovlari sonini kamaytiradi va yangi dori nomzodlarini aniqlashni avtomatlashtiradi. Bu esa farmatsevtik kompaniyalarga vaqt va xarajatlarni kamaytirish imkonini beradi. Shuningdek, bu yondashuv toksikologik xavfsizlikni baholashda ham qo‘llanilishi mumkin, chunki ion kanallari ko‘plab nojo‘ya ta’sirlarning boshlang‘ich markeri sifatida tanilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. H. Hille, Ion Channels of Excitable Membranes, 3rd ed. Sunderland, MA, USA: Sinauer, 2001.
2. B. Hille and W. Almers, “Ion channel gating and pharmacology: A biophysical overview,” Annual Review of Physiology, vol. 78, pp. 347–367, 2016.

3. D. Colquhoun, “Binding, gating, affinity and efficacy: The interpretation of structure–activity relationships for agonists and of the effects of mutating receptors,” *British Journal of Pharmacology*, vol. 125, no. 5, pp. 923–947, 1998.
4. R. Chen et al., “Computational modeling of ligand–ion channel interactions using kinetic models,” *Journal of Molecular Biology*, vol. 431, pp. 1683–1697, 2019.
5. P. C. Bressloff, *Stochastic Processes in Cell Biology*, New York, NY, USA: Springer, 2014.
6. Z. Zhao and D. Swanson, “Machine learning prediction of ion-channel drug interactions,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 62, no. 4, pp. 1125–1136, 2022.
7. A. V. Kiselev et al., “Artificial intelligence in pharmacodynamics: Modeling ion channel blockage mechanisms,” *Nature Computational Science*, vol. 3, no. 2, pp. 144–152, 2023.
8. C. Xie, T. Li, and M. Chen, “Deep neural networks for predicting pharmacological responses via electrophysiological datasets,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 34, no. 7, pp. 3251–3263, 2023.
9. Базарбаев, М. И., & Сайфуллаева, Д. И. (2022). Раҳиғ мов Б Т., Ж, раева З Р. Роль информацисннх техғ нологий в медицине и биомедицинской инженерии в подготовке будущих специалистов в пеғ риод цифровой трансформации в образовании. ТТА Ахборотномаси, 10(10), 8ғ13.
10. Марасулов, А. Ф., Базарбаев, М. И., Сайфуллаева, Д. И., & Сафаров, У. К. (2018). Подход к обучению математике, информатике, информационным технологиям и их интеграции в медицинских вузах.
11. Bazarbaev, M. I., & Sayfullaeva, D. I. (2025). WHEN ALGORITHMS MEET ANATOMY: UZBEKISTAN'S MEDICAL EDUCATION IN THE AGE OF TECHNOLOGY. *Central Asian Journal of Medicine*, (4), 35-39.
12. Базарбаев, М. И., & Сайфуллаева, Д. И. КОМПЬЮТЕР В БЕЛОМ ХАЛАТЕ: КАК ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФОРМИРУЮТ МЕДИЦИНСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В УЗБЕКИСТАНЕ.(2025). *Innovations in Science and Technologies*, 2 (4), 117-123.
13. Baxtiyrovna, E. D., Alisherovna, F. N., & Jurayeva, U. O. N. (2024). PROPERTIES OF ELECTRON AND NEUTRON THERAPY. *Web of Medicine: Journal of Medicine, Practice and Nursing*, 2(10), 137-141.
14. Fayziyeva, N. (2025). THE EFFECT OF MAGNESIUM ON PREGNANT WOMEN. *Web of Medicine: Journal of Medicine, Practice and Nursing*, 3(5), 60-63.

15. Fayziyeva, N. A. (2025). OLIY TA'LIMDA PEDAGOGIK TA'LIM-TARBIYANI TASHKIL ETISHNING AHAMIYATLARI VA ZAMONAVIY METODLARIDAN FOYDALANISH USULLARI.

16. Адилбекова, Д. Б. (2013). Морфологическое состояние сосудисто-тканевых структур тонкой кишки у потомства, рожденного от матерей с хроническим токсическим гепатитом в условиях коррекции гепатита. Новый день в медицине, (2), 62-65.

17. Адилбекова, Д. Б., Хатамов, А. И., Мансурова, Д. А., & Пулатов, Х. Х. (2020). Морфологическое состояние сосудисто-тканевых структур желудка у потомства в условиях хронического токсического гепатита у матери. Морфология, 157(2-3), 10-11.

18. Adilbekova, D. B., Usmanov, R. D., Mirsharapov, U. M., & Mansurova, D. A. (2019). MORPHOLOGICAL STATE OF EARLY POSTNATAL FORMATION OF THE ORGANS OF THE GASTROINTESTINAL TRACT AND LIVER IN OFFSPRING BORN AND RAISED BY MOTHERS WITH CHRONIC TOXIC HEPATITIS. Central Asian Journal of Medicine, 4, 43-55.

19. Адилбекова, Д. С., Чориева, З. Ю., Исматуллаева, Г. Х., & Хаитмурадова, Г. П. (2020). Гистоморфологические изменения в желудочно-кишечном тракте потомства, рожденные от матерей с хроническим токсическим гепатитом. Евразийский вестник педиатрии». -2020, 1(4), 211-221.

20. Adilbekova, D. B. (2018). Postnatal formation of vascular-tissue structures of the stomach and intestines of offspring in conditions of chronic toxic hepatitis in the mother. Abstract. Autoref. dis.... doctor of medical Sciences. ТМА, Tashkent.-2018.-26 p.

21. Абдураззоков, Х., Адилбекова, Д., Боймаков, С., & Ибрагимова, М. (2022). Морфологические аспекты кишечной недостаточности при экспериментальном перитоните.

22. Пулатов, Х. Х. (2022). Влияние экспериментального сахарного диабета на надпочечники: дис. Ўзбекистон, Самарқанд.

23. Закиров, А. У., Пулатов, Х. Х., & Исмаилов, Д. Д. (2001). Изучение противовоспалительных свойств диклозана. Экспер. и клин. фарм, (5), 50-52.

24. Nishanov, D. A., Kh, P. K., Sobirova, D. R., & Matrasulov, R. S. (2023). MODERN DIAGNOSIS OF NEPHROBLASTOMA IN CHILDREN. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal, 11(2), 430-441.

25. Собирова, Д. Р., Нуралиев, Н. А., Усманов, Р. Д., Азизова, Ф. Х., & Пулатов, Х. Х. (2023). СОЯ УНИНИНГ ОЗУҚАВИЙ ҚИЙМАТИ, МИКРОЭЛЕМЕНТЛАР ВА РАДИОНУКЛИДЛАР КЎРСАТКИЧЛАРИ (24-СОНЛИ). «МИКРОБИОЛОГИЯНИНГ

ДОЛЗАРБ МУАММОЛАРИ» МАВЗУСИДАГИ РЕСПУБЛИКА ИЛМИЙ-АМАЛИЙ АНЖУМАНИ, 137.

26. M. T. Crook et al., “Bioelectric signaling and computational electrophysiology,” *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, vol. 161, pp. 1–17, 2021.

27. X. Yang et al., “AI-based cardiotoxicity prediction using ion-channel modeling,” *Computational Toxicology*, vol. 19, pp. 100–111, 2021.

28. S. Mirams et al., “Chaste: An open-source computational framework for cardiac electrophysiology,” *PLoS Computational Biology*, vol. 9, no. 3, pp. 1–18, 2013.

29. Y. Gao and B. Xu, “Hybrid biophysical–AI models for predicting drug effects on cellular electrophysiology,” *Bioinformatics*, vol. 39, no. 5, pp. 1–12, 2023.

30. S. F. Fahlman and G. E. Hinton, “Fast learning in neural networks,” *Neural Computation*, vol. 1, no. 2, pp. 282–287, 1989.

31. M. Lapidoth and J. Goldfarb, “Pharmacokinetic–pharmacodynamic modeling using Bayesian neural networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14522–14532, 2022.

32. I. H. Witten et al., *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, 4th ed., Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2016.