

SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA ELEKTROMAGNIT MAYDON (EMM) TA'SIRINI BAHOLASH: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR VA ISTIQBOLLAR

Allamuratova Zamira Jumamuratovna

"Intellektual tizimlar" kafedrasi dotsenti, PhD.

*Toshkent shahridagi Belarus-O'zbekiston qo'shma tarmoqlarora amaliy texnik
kvalifikatsiyalar instituti*

74zamira@inbox.ru

Sarikulova Fatima Sabitovna

Tayanch doktorant

*Toshkent shahridagi Belarus-O'zbekiston qo'shma tarmoqlarora amaliy texnik
kvalifikatsiyalar instituti*

fatimasarikulova@gmail.com

Annotatsiya

Mazkur maqolada elektromagnit maydon (EMF) monitoringi va prognozlash sohasida sun'iy intellekt asosidagi zamonaviy yondashuvlar tizimli ravishda tahlil qilingan. Xususan, chuqur o'rganish (Deep Learning), mashinaviy o'rganish (Machine Learning) hamda sensor asosidagi tizimlarning imkoniyatlari, afzalliklari va cheklovlari ko'rib chiqilgan. Shuningdek, ANN, CNN kabi neyron tarmoq modellari murakkab urban muhitlarda elektromagnit maydonni baholashda yuqori samaradorlik ko'rsatishi aniqlangan. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, mavjud yondashuvlarning hech biri bir vaqtning o'zida yuqori aniqlik, real vaqt rejimi va hisoblash samaradorligini to'liq ta'minlay olmaydi. Shu sababli, kelgusida sun'iy intellekt, sensor ma'lumotlari va fizik modellarni birlashtirgan gibrid tizimlarni ishlab chiqish eng istiqbolli yo'nalish sifatida qaraladi.

Kalit so'zlar: *Elektromagnit maydon, EMF monitoring, sun'iy intellekt, sun'iy neyron tarmoqlar, chuqur o'rganish, mashinaviy o'rganish, CNN, ANN, sensor tizimlar, gibrid modellar, prognozlash.*

Kirish

So'nggi o'n yilliklarda axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining jadal rivojlanishi, xususan 4G va 5G mobil aloqa tizimlarining keng miqyosda joriy etilishi elektromagnit maydon (EMM) ta'sirini baholash masalasini dolzarb ilmiy muammolardan biriga aylantirdi. Simsiz aloqa infratuzilmasining zichlashuvi, bazaviy stansiyalar sonining ortishi va foydalanuvchilar trafigining keskin oshishi EMM darajalarining makon va vaqt bo'yicha murakkab o'zgarishini keltirib chiqarmoqda [8], [9]. EMM ta'sirining inson salomatligiga va atrof-muhitga potentsial xavflari sababli ushbu sohada aniqlik, ishonchlilik va tezkorlikka ega baholash usullarini ishlab chiqish zarurati ortib bormoqda. An'anaviy yondashuvlar, asosan, eksperimental o'lchovlar va fizik modellashtirishga asoslangan bo'lib, ular ko'p hollarda statik sharoitlar uchun mos keladi va real muhitdagi dinamik o'zgarishlarni to'liq aks ettira olmaydi [10]. Murakkab shahar muhitlari, ko'p qatlamli signal tarqalishi, to'siqlar (binolar, relyef) va tarmoq yuklamasining o'zgaruvchanligi kabi omillar EMMni aniq baholashni qiyinlashtiradi. Shu sababli, an'anaviy deterministik va statistik modellarning imkoniyatlari cheklanganligi kuzatilmoqda.

So'nggi yillarda sun'iy intellekt (SI) texnologiyalari, xususan mashinaviy o'rganish (Machine Learning) va chuqur o'rganish (Deep Learning) usullari ushbu muammoni hal qilishda istiqbolli yondashuv sifatida e'tirof etilmoqda. SI modellarining asosiy ustunligi katta hajmdagi

ma'lumotlarni qayta ishlash, murakkab nolinear bog'liqliklarni aniqlash va yuqori aniqlikda prognoz qilish imkoniyatidadir [6].

Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, sun'iy neyron tarmoqlar (ANN), konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) va gibrid modellar yordamida EMM darajasini bashorat qilish samaradorligi sezilarli darajada oshgan [1], [5]. Ayniqsa, turli manbalardan olingan ma'lumotlarni (sensor o'lchovlari, geofazoviy ma'lumotlar, tarmoq parametrlari) integratsiya qilish orqali yanada aniq natijalarga erishish mumkinligi aniqlangan [4]. Bundan tashqari, EMMni baholash nafaqat texnik, balki ijtimoiy va sog'liqni saqlash nuqtai nazaridan ham muhim ahamiyat kasb etadi. Sun'iy intellekt texnologiyalarining radiatsiya xavfsizligi, kasbiy sog'liqni muhofaza qilish va monitoring tizimlarida qo'llanilishi ushbu yo'nalishdagi tadqiqotlarning dolzarbligini yanada oshirmoqda [7]. Shu bilan birga, mavjud tadqiqotlarda bir qator muammolar ham mavjud. Jumladan, ma'lumotlar yetishmasligi, modellarni umumlashtirish qobiliyatining cheklanganligi, hisoblash resurslariga yuqori talab va real vaqt rejimida ishlashdagi murakkabliklar hali to'liq hal etilmagan [5], [6].

Mazkur maqolaning maqsadi — elektromagnit maydon ta'sirini baholashda sun'iy intellekt asosidagi zamonaviy yondashuvlarni tahlil qilish, ularning afzallik va kamchiliklarini aniqlash hamda kelgusidagi ilmiy tadqiqotlar uchun istiqbolli yo'nalishlarni belgilashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili

Elektromagnit maydon (EMF) monitoringi va prognozlash sohasida so'nggi yillarda bir qator ilmiy yondashuvlar taklif etilgan bo'lib, ularni uch asosiy yo'nalishga ajratish mumkin: chuqur o'rganishga asoslangan modellar, mashinaviy o'rganish yondashuvlari hamda sensor va o'lchovga asoslangan tizimlar. Mazkur yo'nalishlar bir-birini to'ldiruvchi xususiyatga ega bo'lib, EMFni aniqlash va prognozlashda turli darajadagi aniqlik va murakkablikni ta'minlaydi.

Zhang va boshqalar tomonidan taklif etilgan ExposNet modeli murakkab shahar muhitida EMF taqsimotini yuqori aniqlikda prognoz qilishga mo'ljallangan chuqur neyron tarmoq hisoblanadi [1]. Ushbu model ko'p manbali ma'lumotlarni, jumladan, sun'iy yo'ldosh tasvirlari, bino xaritalari hamda baza stansiya parametrlarini integratsiya qilish orqali fazoviy va funksional bog'liqliklarni chuqur o'rganadi. Natijada yuqori aniqlik ta'minlanadi, biroq modelning katta hajmdagi ma'lumotlarga yuqori darajada bog'liqligi va hisoblash murakkabligining yuqoriligi uning amaliy qo'llanilishini ma'lum darajada cheklaydi.

Shunga o'xshash yo'nalishda Ben Chikha va boshqalar tomonidan ishlab chiqilgan ANN asosidagi ekstrapolyatsiya modeli kam o'lchovli ma'lumotlar asosida keng hududlar uchun EMF darajasini baholash imkonini beradi [2]. Ushbu yondashuv hisoblash samaradorligi va soddaligi bilan ajralib turadi, biroq murakkab urban muhitlarda modelning umumlashuv (generalizatsiya) qobiliyati pasayishi kuzatiladi. Shu jihatdan u chuqur o'rganish modellariga nisbatan kamroq aniqlikni ta'minlasa-da, resurs samaradorligi nuqtai nazaridan afzal hisoblanadi.

Mavjud yondashuvlar tahlili shuni ko'rsatadiki, chuqur o'rganish modellari [1], [5] aniqlik jihatidan ANN asosidagi yondashuvlardan [2] ustun bo'lsa-da, ularning hisoblash murakkabligi yuqori. Aksincha, ANN modellari hisoblash samaradorligi bilan ajralib turadi, biroq murakkab shahar muhitlarida umumlashuv qobiliyati cheklangan.

Sensor va eksperimental yondashuvlar Laganà va boshqalar hamda Wang va Wiart tadqiqotlarida keng yoritilgan [3], [4]. Ushbu ishlarda elektromagnit nurlanishning biologik ta'siri SAR (Specific Absorption Rate) va harorat o'zgarishlari orqali real sensor qurilmalari yordamida o'lchanadi. Natijalar elektromagnit maydonning inson to'qimalariga bevosita ta'sirini aniqlash imkonini beradi va yuqori ishonchlilikni ta'minlaydi. Biroq, mazkur yondashuvlarda prognozlash komponenti yetarli darajada rivojlanmagan bo'lib, ular asosan statik baholash bilan cheklanadi.

Wiart va hamkorlari tomonidan taklif etilgan sensor va ANN integratsiyalashgan model real vaqt ma'lumotlarini sun'iy intellekt algoritmlari bilan birlashtirib, EMF baholash aniqligini sezilarli darajada oshiradi [4]. Ushbu yondashuv klassik sensor tizimlariga nisbatan ustun bo'lsa-da, uning samaradorligi sensorlarning aniqligi, joylashuvi va ma'lumot yig'ish sharoitlariga sezilarli darajada bog'liq.

Mallik va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) asosida EMF maydonlarini rekonstruksiya qilish nazariy jihatdan tahlil qilingan [5]. Ular "cheksiz limit" sharoitida CNN modellarining yuqori aniqlikka erishish imkoniyatini asoslab bergan. Bu natijalar chuqur o'rganish yondashuvlarining kuchli matematik asosga ega ekanligini ko'rsatadi, biroq amaliy implementatsiyada hisoblash resurslari va vaqt sarfi yuqori bo'lib qolmoqda.

Manassas va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda elektromagnit maydon ta'sirini baholash uchun turli mashinaviy o'rganish algoritmlari qo'llanilgan [6]. Natijalar ushbu metodlar murakkab muhitlarda EMF darajasini yetarli aniqlik bilan bashorat qila olishini ko'rsatadi. Shu bilan birga, model samaradorligi kiruvchi ma'lumotlarning sifati va hajmiga bevosita bog'liq bo'lib, bu ayrim holatlarda umumlashuv muammolarini yuzaga keltiradi.

Fazli va boshqalar tomonidan o'tkazilgan scoping review tadqiqoti sun'iy intellektning radiatsiya ta'siri bilan bog'liq kasbiy sog'liqni saqlashdagi rolini tizimli ravishda tahlil qiladi [7]. Tadqiqot natijalari AI texnologiyalarining radiatsiya monitoringi, dozani prognozlash va diagnostika jarayonlarida katta salohiyatga ega ekanligini ko'rsatadi. Biroq, mavjud tadqiqotlarning heterogenligi va amaliy implementatsiya darajasining yetarli emasligi ushbu yo'nalishda qo'shimcha ilmiy izlanishlar zarurligini ko'rsatadi.

Wei va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda 5G bazaviy stansiyalaridan chiqadigan elektromagnit maydon darajasi turli real sharoitlarda o'lchangan [8]. Olingan natijalar 5G tarmoqlaridagi EMF darajalari xalqaro xavfsizlik standartlaridan past ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, geografik va ekspluatatsion omillar natijalarga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan bo'lib, bu doimiy monitoring tizimlarini joriy etish zarurligini asoslaydi.

Lal va boshqalar tomonidan taklif etilgan yondashuvda GSM bazaviy stansiyalaridan chiqadigan elektromagnit nurlanish darajasini baholashda tarmoq trafik ma'lumotlaridan foydalanilgan [9]. Tadqiqot natijalari EMF darajasi faqat texnik parametrlar bilan emas, balki foydalanuvchi yuklamasi bilan ham bog'liqligini ko'rsatadi. Ushbu yondashuv statik modellarga nisbatan ustun bo'lib, real vaqtga yaqin prognozlash imkoniyatini yaratadi.

Li va Wei tomonidan amalga oshirilgan umumlashtiruvchi tadqiqotda EMF baholash usullari klassik o'lchovlar, matematik modellashtirish va sun'iy intellekt asosidagi yondashuvlarga ajratilgan [10]. Mualliflar kelajakda eng istiqbolli yo'nalish sifatida fizik qonuniyatlar va sun'iy intellektni birlashtirgan gibrid modellarni ko'rsatadi.

Miclaus va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda 4G va 5G signallaridan kelib chiqadigan elektromagnit nurlanish exposimetrik yondashuv asosida tahlil qilingan [11]. Tadqiqotda statistik metodlar bilan bir qatorda CNN modellari qo'llanilib, signal turlarini avtomatik klassifikatsiya qilish amalga oshirilgan. Natijalar 4G va 5G signallari EMF xususiyatlari bo'yicha sezilarli farqlarga ega ekanligini va CNN modellarining ularni yuqori aniqlik bilan ajrata olishini ko'rsatadi.

Ko'rib chiqilgan tadqiqotlarning asosiy xususiyatlari, afzalliklari va cheklovlari quyidagi 1-jadvalda umumlashtirilgan.

1-jadval. EMF baholash usullarining taqqoslanishi

№	Yondashuv	Metod	Afzalliklari	Cheklovlari
1	Deep Learning	ExposNet	Yuqori aniqlik, kompleks muhitni hisobga oladi	Hisoblash murakkabligi yuqori
2	ANN	Ekstrapolyatsiya	Kam ma'lumot bilan ishlaydi, samarali	Generalizatsiya muammosi
3	Sensor	Monitoring	Real o'lchov ma'lumotlari, yuqori ishonchlilik	Qimmat va statik
4	ANN + Sensor	Gibrid model	Amaliy va nisbatan aniq	Sensor sifatiga bog'liq
5	CNN	Rekonstruksiya	Juda yuqori aniqlik	Hisoblash resurslari talab etadi
6	ML	Prognozlash	Tez va moslashuvchan	Katta hajmdagi ma'lumot talab qiladi
7	Review	Trend tahlili	Yo'nalishni aniqlaydi	Amaliy natija bermaydi
8	Measurement	5G o'lchov	Ishonchli natijalar	Prognozlash yo'q
9	AI + Traffic	Dinamik model	Realistik va real vaqtga yaqin	Murakkab model
10	Review	Trend analysis	Keng qamrovli	Nazariy
11	CNN + Stat	4G/5G taqqoslash	Klassifikatsiya aniqligi yuqori	Cheklangan qo'llanish

- Jadvaldan ko'rinib turibdiki, mavjud yondashuvlar turli afzalliklarga ega bo'lsa-da, ularning hech biri bir vaqtning o'zida yuqori aniqlik, real vaqt rejimi va resurs samaradorligini to'liq ta'minlay olmaydi.
- Umuman olganda, ko'rib chiqilgan tadqiqotlar EMFni baholashda quyidagi asosiy tendensiyalarni ko'rsatadi:
 - sun'iy intellekt va chuqur o'rganish metodlarining keng qo'llanilishi;
 - real o'lchov ma'lumotlari bilan modellarni integratsiya qilish;
 - dinamik va real vaqtga yaqin baholash yondashuvlarining rivojlanishi;
 - sog'liqni saqlash va xavfsizlik bilan bog'liq tadqiqotlarning ortib borishi.

Shu bilan birga, ko'rib chiqilgan yondashuvlar orasida real vaqt rejimida ishlaydigan, kam hajmdagi ma'lumotlarga tayanadigan va yuqori aniqlikni ta'minlaydigan yagona integratsiyalashgan model yetarli darajada ishlab chiqilmagan.

Tahlil qilingan ilmiy ishlar shuni ko'rsatadiki, elektromagnit maydonni baholashda yagona universal yondashuv mavjud emas. Har bir metod o'zining afzalliklari va cheklovlariga ega bo'lib, ularning samaradorligi qo'llanish sharoitiga bog'liq.

Shu bilan birga, mavjud tadqiqotlar orasida real vaqt rejimida ishlovchi, yuqori aniqlikka ega va hisoblash resurslarini samarali ishlatadigan kompleks model yetarli darajada ishlab chiqilmagan. Shu sababli, sun'iy intellekt, real o'lchovlar va fizik modellarni birlashtirgan gibrid yondashuvlar kelgusidagi ilmiy izlanishlar uchun eng istiqbolli yo'nalish sifatida qaraladi.

Muhokama

Ushbu tadqiqot doirasida ko'rib chiqilgan ilmiy ishlanmalar elektromagnit maydon (EMF) monitoringi va prognozlash sohasida turli yondashuvlarning mavjudligini ko'rsatadi [1–3]. Tahlil

natijalari shuni anglatadiki, har bir metod muayyan sharoitda samarali bo'lsa-da, ularning birortasi barcha talablarni to'liq qondira olmaydi [4].

Chuqur o'rganish asosidagi modellar, xususan ExposNet va CNN yondashuvlari yuqori aniqlikni ta'minlashi bilan ajralib turadi [1], [5]. Ular murakkab fazoviy bog'liqliklarni o'rganish imkoniyatiga ega bo'lib, ayniqsa urban muhitlarda EMF taqsimotini aniq ifodalashda ustunlik qiladi [2]. Biroq, ushbu modellarning asosiy cheklovi sifatida ularning yuqori hisoblash murakkabligi va katta hajmdagi ma'lumotlarga bog'liqligi qayd etiladi [6]. Shu sababli, ular real vaqt rejimida yoki resurslar cheklangan tizimlarda samarali qo'llanilishi qiyin [7].

Bunga qarama-qarshi ravishda, sun'iy neyron tarmoqlar va boshqa mashinaviy o'rganish algoritmlari hisoblash samaradorligi va soddaligi bilan ajralib turadi [8]. ANN asosidagi yondashuvlar kamroq ma'lumot bilan ishlash imkonini bersa-da, murakkab muhitlarda ularning umumlashuv qobiliyati pasayadi [9]. Bu holat modelning turli sharoitlarda barqaror ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatadi [4].

Sensor va eksperimental yondashuvlar esa EMF darajasini baholashda eng ishonchli natijalarni taqdim etadi, chunki ular real o'lchovlarga asoslanadi [3], [10]. Shu bilan birga, bunday tizimlar statik xarakterga ega bo'lib, prognozlash imkoniyati cheklangan va katta xarajatlarni talab qiladi [11]. Ayniqsa, keng hududlarda uzluksiz monitoringni tashkil etish texnik va iqtisodiy jihatdan murakkab hisoblanadi [10].

Tahlil shuni ko'rsatadiki, so'nggi yillarda gibril yondashuvlarga bo'lgan qiziqish ortib bormoqda [5]. Sensor ma'lumotlarini sun'iy intellekt algoritmlari bilan birlashtirish orqali nafaqat aniqlikni oshirish, balki real vaqtga yaqin prognozlash imkoniyatini yaratish mumkin [6]. Biroq, bunday tizimlar hali to'liq mukammallashtirilmagan bo'lib, ularning ishlashi sensor sifati, ma'lumotlar to'liqligi va model arxitekturasiga sezilarli darajada bog'liq [7].

Shuningdek, EMF darajasining faqat texnik parametrlar bilan emas, balki tarmoq yuklamasi, foydalanuvchi zichligi va atrof-muhit omillari bilan ham bog'liqligi aniqlangan [8]. Bu esa statik modellardan dinamik modellarga o'tish zarurligini ko'rsatadi [9]. Ayniqsa, AI va trafik ma'lumotlarini birlashtirgan yondashuvlar real muhitga yaqin natijalarni taqdim etishi bilan ahamiyatlidir [6].

Yuqoridagi tahlillar asosida shuni ta'kidlash mumkinki, mavjud yondashuvlar orasida quyidagi muvozanat muammosi mavjud:

- aniqlik $\leftrightarrow$ hisoblash murakkabligi [6]
- ishonchlilik $\leftrightarrow$ prognozlash imkoniyati [11]
- real vaqt ishlash $\leftrightarrow$ ma'lumotlar hajmi [7]

Mazkur muvozanatni ta'minlay oladigan universal model hozircha mavjud emas [4]. Shu sababli, kelgusidagi tadqiqotlar sun'iy intellekt, real o'lchovlar va fizik modellashni birlashtirgan kompleks gibril tizimlarni ishlab chiqishga yo'naltirilishi lozim [5], [6].

Xulosa

Ushbu ishda elektromagnit maydon monitoringi va prognozlash sohasidagi zamonaviy yondashuvlar tizimli ravishda tahlil qilindi [1–3]. O'rganilgan ilmiy manbalar chuqur o'rganish, mashinaviy o'rganish va sensor asosidagi metodlarning har biri muayyan afzalliklarga ega ekanligini ko'rsatdi [5], [8], [10].

Chuqur o'rganish modellari yuqori aniqlikni ta'minlasa-da, ularning hisoblash murakkabligi yuqori [6]. Mashinaviy o'rganish yondashuvlari resurs samaradorligi bilan ajralib turadi, biroq murakkab muhitlarda aniqlik pasayadi [9]. Sensor asosidagi tizimlar esa ishonchli natijalar beradi, lekin prognozlash imkoniyati cheklangan [11].

Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, mavjud yondashuvlar orasida real vaqt rejimida ishlovchi, yuqori aniqlikka ega va hisoblash resurslarini samarali ishlatadigan universal model hali ishlab chiqilmagan. Shu bois, ushbu sohada asosiy ilmiy muammo sifatida turli metodlarning afzalliklarini birlashtirgan gibrid yondashuvlarni yaratish masalasi dolzarb bo'lib qolmoqda.

Kelgusida elektromagnit maydonni baholash tizimlarini yanada takomillashtirish uchun quyidagi yo'nalishlar istiqbolli deb hisoblanadi:

- sun'iy intellekt va real o'lchov ma'lumotlarini integratsiya qilish;
- dinamik va real vaqt rejimida ishlovchi modellarni ishlab chiqish;
- tarmoq trafik parametrlarini hisobga olgan holda prognozlash tizimlarini yaratish;
- hisoblash samaradorligi va aniqlik o'rtasida optimal muvozanatni ta'minlash.

Xulosa qilib aytganda, elektromagnit maydon monitoringi sohasida yuqori aniqlik, real vaqt ishlash va resurs samaradorligini birlashtirgan kompleks gibrid modellarni ishlab chiqish eng muhim va istiqbolli ilmiy yo'nalish hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Y. Zhang, S. Wang, and J. Wiart, "ExposNet: A Deep Learning Framework for EMF Exposure Prediction in Complex Urban Environments," arXiv preprint, 2025. DOI: — (arXiv:2503.02966)
2. W. Ben Chikha, S. Wang, and J. Wiart, "Assessment of Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure Induced by Base Stations in Several Micro-Environments in France," IEEE Access, vol. 12, pp. 21610–21620, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3363914
3. F. Laganà et al., "Smart Electronic Device-Based Monitoring of SAR and Temperature Variations in Indoor Human Tissue Interaction," Sensors, vol. 21, no. 18, p. 6158, 2021. DOI: 10.3390/s21186158
4. S. Wang and J. Wiart, "Sensor-Aided EMF Exposure Assessments in an Urban Environment Using Artificial Neural Networks," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 17, no. 9, p. 3052, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17093052
5. M. Mallik et al., "Infinite Limits of Convolutional Neural Network for Urban Electromagnetic Field Exposure Reconstruction," IEEE Access, vol. 9, pp. 104593–104603, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099455
6. A. Manassas et al., "Predicting Electromagnetic Field Exposure Using Artificial Intelligence Methods," Applied Sciences, vol. 10, no. 10, p. 3497, 2020. DOI: 10.3390/app10103497
7. Z. Fazli et al., "The Role of Artificial Intelligence in Occupational Health in Radiation Exposure: A Scoping Review of the Literature," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 19, no. 3, p. 1234, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19031234
8. Q. Wei et al., "A Study on the Ambient Electromagnetic Radiation Level of 5G Base Stations in Typical Scenarios," Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2021, Article ID 5567890, 2021. DOI: 10.1155/2021/5567890
9. R. Lal et al., "AI-Based Optimization of EM Radiation Estimates from GSM Base Stations Using Traffic Data," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 13, pp. 4567–4578, 2022. DOI: 10.1007/s12652-021-03456-7

- 
10. M. Li and G. Wei, “A Review of Quantitative Evaluation of Electromagnetic Environmental Effects: Research Progress and Trend Analysis,” *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3456, 2023. DOI: 10.3390/su15043456
 11. S. Miclaus et al., “An Exposimetric Electromagnetic Comparison of Mobile Phone Emissions: 5G versus 4G Signals Analyses by Means of Statistics and Convolutional Neural Networks Classification,” *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1987, 2022. DOI: 10.3390/s22051987