

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE**

**№2
2026**

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)



ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE

3 (359)

JULY – SEPTEMBER 2026

**PUBLISHED SINCE JANUARY 1963
PUBLISHED 4 TIMES A YEAR**

ALMATY, NAS RK

Chief Editor:

MUTANOV Galimkair Mutanovich, doctor of technical sciences, professor, academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

EDITORIAL BOARD:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Advisor to the General Director of the Institute of Information and Computing Technologies of the CS MES RK, Head of the Laboratory (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

MAMYRBAEV Orken Zhumazhanovich, (Academic Secretary), PhD in Information Systems, Deputy Director for Science of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

BAIGUNCHEKOV Zhumadil Zhanabaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Cybernetics and Information Technologies, Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

WOICIK Waldemar, Doctor of Technical Sciences (Phys.-Math.), Professor of the Lublin University of Technology (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

SMOLARJ Andrej, Associate Professor Faculty of Electronics, Lublin polytechnic university (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

KEILAN Alimkhan, Doctor of Technical Sciences, Professor (Doctor of science (Japan)), chief researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

KHAIROVA Nina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

OTMAN Mohamed, PhD, Professor of Computer Science Department of Communication Technology and Networks, Putra University Malaysia (Selangor, Malaysia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

NYSANBAYEVA Saule Yerkebulanovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

USATOVA Olga Alexandrovna, PhD, Associate Professor, Chief Scientific Secretary of the Institute of Information and Computing Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

KAPALOVA Nursulu Aldazharovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory cybersecurity, Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

KOVALYOV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

MIKHALEVICH Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

TIGHINEANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

Certificate № KZ77VPY00121154 on the re-registration of the periodical printed and online publication of the information agency, issued on 05.06.2025 by the Republican State Institution «Information Committee» of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan

Subject area: *information and communication technologies*.

Currently: *included in the list of journals recommended by the CCSES MSHE RK in the direction of «Information and communication technologies»*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© «Central Asian Academic Research Center» LLP, 2026

БАС РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

КАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы, (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кеңесшісі, зертхана меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Өркен Жұмажанұлы (ғалым хатшы), Ақпараттық жүйелер саласындағы техника ғылымдарының (PhD) докторы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жұмаділ Жаңабайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Кибернетика және ақпараттық технологиялар институты, Қолданбалы механика және инженерлік графика кафедрасы, Сәтбаев университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, техника ғылымдарының докторы (физ-мат), Люблин технологиялық университетінің профессоры (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, Люблин политехникалық университетінің электроника факультетінің доценті (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Әлімхан, техника ғылымдарының докторы, профессор (ғылым докторы (Жапония)), ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохаммед, PhD, Информатика, Коммуникациялық технологиялар және желілер кафедрасының профессоры, Путра университеті Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

НЫСАНБАЕВА Сауле Еркебұланқызы, техника ғылымдарының докторы, доцент, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ "Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының" бас ғалым хатшысы (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нұрсұлу Алдажарқызы, техника ғылымдарының кандидаты, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты», Киберқауіпсіздік зертханасының меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина Ұлттық Ғылым академиясының академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь Ұлттық Ғылым академиясының академигі (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі **05.06.2025 ж.** берген **№ KZ77VPY00121154** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *ақпараттық-коммуникациялық технологиялар*

Қазіргі уақытта: *«ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» бағыты бойынша ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған журналдар тізіміне енді.*

Мерзімділігі: *жылына 4 рет.*

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 2026

Главный редактор:

МУТАНОВ Галимканр Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, советник генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК, заведующий лабораторией (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Оркен Жумажанович, (ученый секретарь), доктор философии (PhD) по специальности «Информационные системы», заместитель директора по науке РГП «Институт информационных и вычислительных технологий» Комитета науки МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жумадил Жанабаевич, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Институт кибернетики и информационных технологий, кафедра прикладной механики и инженерной графики, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, доктор технических наук (физ.-мат.), профессор Люблинского технологического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, доцент факультета электроники Люблинского политехнического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Алимхан, доктор технических наук, профессор (Doctor of science (Japan)), главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохамед, доктор философии, профессор компьютерных наук, Департамент коммуникационных технологий и сетей, Университет Путра Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

НЫСАНБАЕВА Сауле Еркебулановна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, ассоциированный профессор, Главный ученый секретарь «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нурсулу Алдажаровна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кибербезопасности РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: *ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).*

Свидетельство о постановке на переучет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № **KZ77VPY00121154**. Дата выдачи **05.06.2025**

Тематическая направленность: *информационно-коммуникационные технологии.*

В настоящее время: *вошел в список журналов, рекомендованных КОКШВО МНВО РК по направлению «информационно-коммуникационные технологии».*

Периодичность: *4 раза в год.*

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

CONTENTS

Akhmetova A.Zh., Kantureyeva M.A., Serimbetov B.A., Zhasuzakova M.Zh., Mustafayeva N.T. Identification of communities and active users in social networks.....	11
Akzhigitov D., Mukhtarkhanov M., Zhetpisbayeva A., Kulakayeva A., Zhetpisbayev K. Analysis of the mechanical structure of a 12U CubeSat nanosatellite and assessment of its mechanical stability.....	29
Alibekov A., Nurimanov A., Mukhametkali A., Kassym D., Varol H.A. Qolda-Math: a small vision-language model for mathematical reasoning in Kazakh.....	50
Alisheva S.S., Ospanova A.O., Shaimerdenova G.S., Shaimerdenova L., Zhidebayeva A.N. Detecting Kazakh language offensive comments in online content using deep learning algorithms.....	68
Askar G., Mutaikhan A., Aitkozhasyeva M., Nauryzbaikyzy G., Makhataeva Z. Retrieval beats fine-tuning: adapting a Kazakh small language model for historical question answering.....	86
Beissenova G.I., Shynzhigit B.B., Beisebayeva A.Zh., Kaldarova B.S., Lesbayev A.U. Deep neural network-based speaker authentication for secure access control systems.....	106
Bekenuly B., Baimakhanova A., Baiturganova V., Bolatbekova D. Comparison of CNN architectures for automated ACL injury classification from knee MRI.....	123
Bekbolat A., Razak A., Alimbayeva Z., Ozhikenova A. Multi-task deep learning for knee MRI pathology classification.....	139
Issakhov A., Akylbekkyzy A., Abylkassymova A. Predicting the spread of airborne viral infections in enclosed spaces.....	158
Kisseleva O., Abdramanov K., Naumenko V., Mukanova Z., Maintser D. Evaluation of serverless cold start optimization techniques.....	177
Koshkarov Ye.Zh., Amirgaliyev B.Ye., Mulesa O. Physics-aware masked pretraining for cross-basin well log foundation models.....	197
Kurmetkan T., Turysbek Zh., Mukhitova A., Nauryzbaeva A. Research on methods for reducing knowledge conflicts in large language models in Kazakh question-and-answer systems.....	214
Makatov Ye.K., Abdul Razaque, Ismukanova A.N., Salykova A.K., Glock E.S. Machine learning-based model for phishing URL detection in online social networks.....	233
Mimenbayeva A.B., Naizagarayeva A.A., Ospanova T.T., Koikelova D.K., Kudabayeva R.N. Spatial and climate data analysis for machine learning-based crop yield prediction in Northern Kazakhstan.....	255
Mukhamediev R.I., Abdoldina F.N., Gertsen Y.A. Economic opportunities and constraints of artificial intelligence adoption in Kazakhstan's resource-oriented economy.....	274

Mutanov G.M., Karyukin V.I., Ussatova O.A., Begimbayeva Y.Y., Baispay G.B. The assessment of blockchain readiness for academic document verification.....	289
Mussiraliyeva Sh., Bolatbek M., Baisylbayeva K. Classification of cyber-extremist ideologies in the Kazakh language considering multi-annotator disagreement.....	306
Omarov B.S., Sultan D.R., Rakhymberdiev D.S., Abibullayeva A.A., Toktarova A.B. Deformable attention-guided Transformer for brain tumor segmentation.....	326
Oralbekova D., Bekarystankyzy A., Yerimbetova A., Berzhanova U. Development of a streaming Kazakh speech recognition system using end-to-end models.....	346
Serek A., Shoiynbek A., Zheludkov M., Kuanyshbay D., Meraliyev B. Comparative analysis of machine learning methods for detecting fraud in text messages.....	365
Smakhanova A.K., Uskenbayeva R.K., Kassymova A.B., Kalpeyeva Zh.B., Konyrbaev N.B. Experimental research using models and methods of the university digital ecosystem.....	384
Sultanali A.E., Kazbekova G.N. Machine learning-based detection of AI-generated content in students' written works.....	401
Tashenova Zh., Yergazin A., Nurlybaeva E., Abdugulova Zh., Amanzholova Sh. Experimental evaluation of a hybrid IDPS with adaptive learning for low-latency 5G networks using edge computing.....	418
Telman D., Yerimbetova A., Daiyrbayeva E. Leakage-resistant fake news detection for Kazakh: temporal evaluation of lexical, Transformer and hybrid models.....	441
Zhanegizov A., Mamyrbayev O., Abdigappar M. Application of YOLO12 for road defect detection in GPR images.....	457

МАЗМҰНЫ

Ахметова А.Ж., Кантуреева М.А., Серимбетов Б.А., Жасұзақова М.Ж., Мұстафаева Н.Т. Әлеуметтік желілердегі қауымдастықтар мен белсенді қолданушыларды анықтау.....	11
Ақжігітов Д.Ж., Мұхтарханов М.О., Жетписбаева А.Т., Кулакаева А.Е., Жетписбаев К.У. 12U CubeSat үлгісіндегі наноспутниктің механикалық құрылымын талдау және оның механикалық орнықтылығын бағалау.....	29
Алибеков А., Нуриманов А., Мұхаметқали А., Қасым Д., Варол Х.А. Qolda-Math: қазақ тіліндегі математикалық пайымдауға арналған кіші көру-тілдік модель.....	50
Алишева С.С., Оспанова А.О., Шаймерденова Г.С., Шаймерденова Л., Жидебаева А.Н. Онлайн-контенттегі қазақ тіліндегі бейәдеп пікірлерді терең оқыту алгоритмдері арқылы анықтау.....	68
Асқар Ғ., Мұтайхан А., Айтқожаева М., Наурызбайқызы Г., Махатаева Ж. Retrieval fine-tuning-тен басым: тарихи сұрақтарға жауап беру үшін қазақша шағын тілдік модельді бейімдеу.....	86
Бейсенова Г.И., Шынжігіт Б.Б., Бейсебаева А.Ж., Қалдарова Б.С., Лесбаев А.У. Терең нейрондық желіге негізделген қауіпсіз басқару жүйелерінде сөйлеушіні аутентификациялау.....	106
Бекенұлы Б., Баймаханова А., Байтурганова В., Болатбекова Д. Алдыңғы крест тәрізді байлам жарақатын анықтауға арналған CNN архитектураларын салыстыру.....	123
Бекболат А., Разак А., Алимбаева Ж., Ожикенова А. Тізе MPT патологиясын жіктеуге арналған көп тапсырмалы терең оқыту.....	139
Исахов А.А., Ақылбекқызы А., Абылкасымова А. Шектеулі кеңістіктерде әуе тамшыларымен вирустық инфекцияның таралуын сандық модельдеу.....	158
Киселева О., Абдраманов Қ., Науменко В., Мұқанова Ж., Майнцер Д. Serverless жүйелеріндегі суық іске қосуды оңтайландыру әдістерін эксперименттік бағалау.....	177
Кошкарров Е.Ж., Амиргалиев Б.Е., Мүлеса О. Бассейнаралық ұңғымалық диаграммалардың іргелі модельдерін физикалық тұрғыдан негізделген масқаланған алдын ала оқыту.....	197
Құрметқан Т., Тұрысбек Ж., Мұхитова А., Наурызбаева А. Қазақ тіліндегі сұрақ-жауап жүйелерінде үлкен тілдік модельдердегі білім қайшылықтарын азайту әдістерін зерттеу.....	214
Мақатов Е.К., Abdul Razaque, Исмуканова А.Н., Салыкова А.К., Глюк Е.С. Онлайн әлеуметтік желілердегі фишингтік URL-дарды анықтауға арналған машиналық оқыту негізіндегі модель.....	233

Мименбаева А.Б., Найзағараева А.А., Оспанова Т.Т., Қойкелова Д.К., Қудабаева Р.Н. Солтүстік Қазақстандағы дақылдар өнімділігін машиналық оқыту арқылы болжауда кеңістіктік және климаттық деректерді талдау.....	255
Мухамедиев Р.И., Абдолдина Ф.Н., Герцен Е.А. Қазақстанның ресурстық бағытталған экономикасына жасанды интеллектті енгізудің экономикалық мүмкіндіктері мен шектеулері.....	274
Мутанов Г.М., Карюкин В.И., Усатова О.А., Бегимбаева Е.Е., Байспай Г.Б. Білім беру құжаттарының түпнұсқалығын тексеруге блокчейн технологиясының дайындығын бағалау.....	289
Мусиралиева Ш., Болатбек М., Байсылбаева К. Көпаннынотаторлы келіспеушілікті ескере отырып қазақ тіліндегі киберэкстремистік идеологияларды жіктеу.....	306
Омаров Б.С., Сұлтан Д.Р., Рахымбердиев Д.С., Абибуллаева А.А., Тоқтарова А.Б. Ми ісіктерін сегменттеуде деформацияланатын зейін механизміне негізделген мультимодальды трансформер.....	326
Оралбекова Д.О., Бекарыстанқызы А., Еримбетова А.С., Бержанова У.Г. Интегралды модельдерді қолдану арқылы қазақ тіліндегі ағындық сөйлеуді тану жүйесін әзірлеу.....	346
Серек А., Шойынбек А., Желудков М., Қуанышбай Д., Мералиев Б. Мәтіндік хабарламалардағы алаяқтықты анықтауға арналған машиналық оқыту әдістерінің салыстырмалы талдауы.....	365
Смаханова А.К., Ускенбаева Р.К., Касымова А.Б., Кальпеева Ж.Б., Қоңырбаев Н.Б. Университеттің цифрлық экожүйесінің модельдері мен әдістерін қолдана отырып жүргізілген эксперименттік зерттеу.....	384
Сұлтанәлі А.Е., Казбекова Г.Н. Білім алушылардың жазбаша жұмыстарындағы AI-контентті машиналық оқыту арқылы анықтау.....	401
Ташенова Ж.М., Ергазин Ә., Нұрлыбаева Ә.Н., Абдуғулова Ж.К., Аманжолова Ш.А. Edge Computing көмегімен төмен кідірісті 5G желілеріне арналған бейімделгіш оқытуы бар гибриді IDPS-ті эксперименттік бағалау.....	418
Тельман Д., Еримбетова А., Дайырбаева Ә. Қазақ тіліндегі жалған жаңалықтарды анықтау: лексикалық, трансформерлік және гибридті модельдерді уақыт бойынша бағалау.....	441
Жанегизов А.С., Мамырбаев Ә.Ж., Абдіғаппар М.Д. YOLO12 моделін георадар кескіндеріне қолдану.....	457

СОДЕРЖАНИЕ

Ахметова А.Ж., Кантуреева М.А., Серимбетов Б.А., Жасузакова М.Ж., Мустафаева Н.Т. Выявление сообществ и активных пользователей в социальных сетях.....	11
Акжигитов Д.Ж., Мухтарханов М.О., Жетписбаева А.Т., Кулакаева А.Е., Жетписбаев К.У. Анализ механической конструкции наноспутника модели 12U CubeSat и оценка его механической устойчивости.....	29
Алибеков А., Нуриманов А., Мухаметкали А., Касым Д., Варол Х.А. Qolda-Math: маленькая мультимодальная модель зрения и языка для математических рассуждений на казахском языке.....	50
Алишева С.С., Оспанова А.О., Шаймерденова Г.С., Шаймерденова Л., Жидебаева А.Н. Выявление оскорбительных комментариев на казахском языке в онлайн-контенте с помощью алгоритмов глубокого обучения.....	68
Аскар Г., Мутайхан А., Айткожаева М., Наурызбайкызы Г., Махатаева Ж. Retrieval эффективнее fine-tuning: адаптация малой языковой модели казахского языка для ответов на исторические вопросы.....	86
Бейсенова Г.И., Шынжигит Б.Б., Бейсебаева А.Ж., Калдарова Б.С., Лесбаев А.У. Аутентификация личности по голосу на основе глубокой нейронной сети для систем безопасного управления доступом.....	106
Бекенулы Б., Баймаханова А., Байтурганова В., Болатбекова Д. Сравнение архитектур сверточных нейронных сетей для автоматической классификации разрыва ПКС по МРТ коленного сустава.....	123
Бекболат А., Разак А., Алимбаева Ж., Ожикенова А. Многозадачное глубокое обучение для классификации патологий колена по МРТ.....	139
Исахов А.А., Акылбеккызы А., Абылкасымова А. Прогнозирование распространения вирусной инфекции воздушно-капельным путем в замкнутых помещениях.....	158
Киселева О., Абдраманов К., Науменко В., Муканова Ж., Майнцер Д. Экспериментальная оценка методов оптимизации холодного запуска в serverless-системах.....	177
Кошкарар Е.Ж., Амиргалиев Б.Е., Мулеса О. Физически-осознанное маскированное предобучение для межбассейновых фундаментальных моделей каротажных диаграмм.....	197
Курметкан Т., Турысбек Ж., Мухитова А., Наурызбаева А. Исследование методов снижения конфликтов знаний в больших языковых моделях казахских вопросно-ответных систем.....	214
Макатов Е.К., Abdul Razaque, Исмуканова А.Н., Салыкова А.К., Глок Е.С. Модель обнаружения фишинговых URL в онлайн-социальных сетях на основе машинного обучения.....	233

Мименбаева А.Б., Найзагараева А.А., Оспанова Т.Т., Койкелова Д.К., Кудабаяева Р.Н. Анализ климатических данных для прогнозирования урожайности пшеницы методами машинного обучения в Северном Казахстане.....	255
Мухамедиев Р.И., Абдолдина Ф.Н., Герцен Е.А. Экономические возможности и ограничения внедрения искусственного интеллекта в ресурсно-ориентированной экономике Казахстана.....	274
Мутанов Г.М., Карюкин В.И., Усатова О.А., Бегимбаева Е.Е., Байспай Г.Б. Оценка готовности технологии блокчейн к проверке подлинности документов об образовании.....	289
Мусиралиева Ш., Болатбек М., Байсылбаева К. Классификация киберэкстремистских идеологий на казахском языке с учетом разногласий нескольких аннотаторов.....	306
Омаров Б.С., Султан Д.Р., Рахымбердиев Д.С., Абибуллаева А.А., Токтарова А.Б. Мультимодальный трансформер на основе механизма деформируемого внимания для сегментации опухолей головного мозга.....	326
Оралбекова Д.О., Бекарыстанкызы А., Еримбетова А.С., Бержанова У.Г. Распознавание казахской речи с применением интегральных моделей.....	346
Серек А., Шойынбек А., Желудков М., Куанышбай Д., Мералиев Б. Сравнительный анализ методов машинного обучения для выявления мошенничества в текстовых сообщениях.....	365
Смаханова А.К., Ускенбаева Р.К., Касымова А.Б., Кальпеева Ж.Б., Конырбаев Н.Б. Экспериментальное исследование с использованием моделей и методов цифровой экосистемы университета.....	384
Султанали А.Е., Казбекова Г.Н. Обнаружение AI-контента в письменных работах обучающихся методами машинного обучения.....	401
Ташенова Ж.М., Ергазин А., Нурлыбаева Э.Н., Абдугулова Ж.К., Аманжолова Ш.А. Экспериментальная оценка гибридной системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDPS) с адаптивным обучением для сетей 5G с низкой задержкой с использованием граничных вычислений.....	418
Тельман Д., Еримбетова А., Дайырбаева Э. Обнаружение фейковых новостей на казахском языке: временная оценка лексических, трансформерных и гибридных моделей.....	441
Жанегизов А.С., Мамырбаев О.Ж., Абдигаппар М.Д. Применение модели YOLOv12 для анализа данных георадара.....	457

ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE
ISSN 1991-346X
Volume 3.
Number 359 (2026). 457–476

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.473>

IRSTI 06.81.23
UDC 004.8

© **Zhanegizov A.^{1*}, Mamyrbayev O.², Abdigappar M.¹, 2026.**

¹Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev,
Almaty, Kazakhstan;

²Institute of information and computational technologies, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz

APPLICATION OF YOLO12 FOR ROAD DEFECT DETECTION IN GPR IMAGES

Zhanegizov Ardan — PhD student at Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz, ORCID: 0009-0002-0090-5355;

Mamyrbayev Orken — PhD, professor, Institute of Information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: morkenj@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8318-3794;

Abdigappar Moldir — student at Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: moldir.abdigappar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9092-493X>.

Abstract. Timely detection of hidden subsurface defects in road pavement is a key factor in improving traffic safety and extending the service life of road infrastructure. Traditional inspection methods — visual survey, drilling, and local sampling — mainly reveal surface-level damage, require temporary traffic closures, and are costly. Ground-Penetrating Radar (GPR) combined with machine learning offers a faster and more accurate alternative, yet most existing studies rely on a single dataset and do not address the problem of merging heterogeneous GPR data to improve model robustness. This study combined three independent open GPR image datasets covering five defect classes: Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void, and Crack. To unify the data, preprocessing steps were applied, including bringing images to a common format and resolution, semi-automatic labeling of unannotated images, and targeted augmentation to reduce class imbalance. Defect detection and classification were performed using the YOLOv12-x model, an attention-centric architecture trained with the Adam optimizer. On the combined dataset, the model achieved an overall accuracy of 92%, showing an improvement of approximately 3% in classification and detection performance compared to training on individual datasets. The "No damage" class

was recognized most reliably, while the "Crack" and "Void" classes were frequently confused due to similar signal reflection characteristics; occasional confusion was also observed between "Loose" and "Interlayer bonding deficiency". The results enable automated diagnosis of hidden road-structure defects based on GPR data, allowing road maintenance services to allocate limited resources more efficiently and plan preventive repair work. The proposed approach to merging heterogeneous datasets is also applicable to monitoring the condition of bridges and railway trackbeds, and can support integration with GIS-based road-network monitoring systems.

Keywords: Ground-Penetrating Radar (GPR), road pavement defects, YOLOv12, data preprocessing, dataset fusion, data augmentation, attention mechanism

For citations: Zhanegizov A., Mamyrbayev O., Abdigappar M. Application of YOLO12 for road defect detection in GPR images. Academic Scientific Journal of Computer Science, 2026. — No.3. — P. 457–476. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.473>

© Жанегизов А.С.^{1*}, Мамырбаев Ө.Ж.², Абдігаппар М.Д.¹, 2026.

¹ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан;

² Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz

YOLO12 МОДЕЛІН ГЕОРАДАР КЕСКІНДЕРІНЕ ҚОЛДАНУ

Жанегизов Ардан — Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің PhD докторанты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz, <https://orcid.org/0009-0002-0090-5355>;

Мамырбаев Өркен — PhD, профессор, Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: morkenj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-3794>;

Абдігаппар Мөлдір — Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің студенті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: moldir.abdigappar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9092-493X>.

Аннотация. Жол жабынының төменгі қабаттарындағы жасырын дефектілерді уақтылы анықтау жол қозғалысы қауіпсіздігін арттырудың және жол инфрақұрылымының қызмет мерзімін ұзартудың негізгі факторларының бірі болып табылады. Дәстүрлі бақылау әдістері - визуалды тексеру, бұрғылау және жергілікті сынама алу - негізінен беткі ақауларды анықтайды, жол қозғалысын уақытша шектеуді талап етуі мүмкін және шығыны жоғары. Георадар (GPR) технологиясын машиналық оқыту

әдістерімен біріктіру жылдамырақ және дәлірек диагностика жүргізуге мүмкіндік береді, алайда қолданыстағы зерттеулердің көпшілігі бір ғана деректер жиынтығымен шектеліп, модельдің орнықтылығын арттыру үшін әртекті GPR деректерін біріктіру мәселесін жеткілікті деңгейде қарастырмайды. Зерттеуде бес класты қамтитын үш тәуелсіз ашық GPR кескіндер жинағы біріктірілді: Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void және Crack. Деректерді біріздендіру үшін кескіндерді бірыңғай формат пен ажыратымдылыққа келтіру, таңбаланбаған кескіндерді жартылай автоматты аннотациялау және кластар теңгерімсіздігін азайтуға бағытталған аугментация қолданылды. Дефектілерді анықтау және жіктеу үшін назар аудару механизмдеріне бағдарланған, 34 млн параметрі бар YOLOv12-х моделі Adam оңтайландырғышымен оқытылды. Біріктірілген деректер жиынтығында модель 92% жалпы дәлдікке қол жеткізіп, жеке деректер жиынтықтарында оқытумен салыстырғанда классификация және детекция көрсеткіштерін шамамен 3%-ға жақсартты. «No damage» класы ең сенімді анықталды, ал сигналдардың шағылысу сипаттамалары ұқсас болғандықтан «Crack» және «Void» кластары арасында жиі шатасу байқалды. Сонымен қатар «Loose» және «Interlayer bonding deficiency» кластары арасында жекелеген қате жіктеу жағдайлары кездесті. Алынған нәтижелер GPR деректері негізінде жол құрылымдарындағы жасырын дефектілерді автоматты түрде диагностикалауға, жол қызметтерінің шектеулі ресурстарын тиімді бөлуге және профилактикалық жөндеу жұмыстарын жоспарлауға мүмкіндік береді. Әртекті деректер жиынтықтарын біріктірудің ұсынылған тәсілін көпірлер мен теміржол төсемдерінің жай-күйін бақылауда да қолдануға болады.

Түйін сөздер: георадар (GPR); жол жабынының дефектілері; YOLOv12; деректерді алдын ала өңдеу; деректер жиынтықтарын біріктіру; деректер аугментациясы; назар аудару механизмі

© **Жанегизов А.С.^{1*}, Мамырбаев О.Ж.², Абдигаппар М.Д.¹, 2026.**

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

² Институт информационных и вычислительных технологий,
Алматы, Казахстан.

E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ YOLOV12 ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЕОРАДАРА

Жанегизов Ардан — PhD докторант Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
E-mail: ardan.zhanegiz@mail.kz, <https://orcid.org/0009-0002-0090-5355>;

Мамырбаев Оркен — PhD, профессор, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан,
E-mail: morkenj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-3794>;

Абдиганнар Молдир — студент Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
E-mail: moldir.abdigappar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9092-493X>.

Аннотация. Своевременное выявление скрытых дефектов в нижних слоях дорожного покрытия является одним из ключевых факторов повышения безопасности дорожного движения и продления срока службы дорожной инфраструктуры. Традиционные методы контроля, включая визуальный осмотр, бурение и локальный отбор проб, преимущественно выявляют поверхностные повреждения, могут требовать временного ограничения движения и связаны со значительными затратами. Применение георадара (GPR) в сочетании с методами машинного обучения открывает возможности для более быстрой и точной диагностики. Вместе с тем большинство существующих исследований ограничивается одним набором данных и недостаточно рассматривает объединение разнородных GPR-данных для повышения устойчивости модели. В исследовании объединены три независимых открытых набора GPR-изображений, охватывающих пять классов: Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void и Crack. Для унификации данных выполнялись предварительная обработка, приведение изображений к единому формату и разрешению, полуавтоматическая разметка ранее неаннотированных изображений и целевая аугментация для уменьшения дисбаланса классов. Для обнаружения и классификации дефектов использовалась модель YOLOv12-x с архитектурой, ориентированной на механизмы внимания, обученная с помощью оптимизатора Adam. На объединенном наборе данных модель достигла общей точности 92%, что соответствует улучшению показателей классификации и детекции примерно на 3% по сравнению с обучением на отдельных наборах данных. Класс «No damage» распознавался наиболее надежно, тогда как классы «Crack» и «Void» чаще смешивались вследствие сходных характеристик отражения сигнала. Отдельные случаи ошибочной классификации также наблюдались между классами «Loose» и «Interlayer bonding deficiency». Полученные результаты подтверждают возможность автоматизации диагностики скрытых дефектов дорожных конструкций на основе GPR-данных, более эффективного распределения ограниченных ресурсов дорожных служб и планирования профилактических ремонтных работ. Предлагаемый подход к объединению разнородных наборов данных может также применяться для мониторинга состояния мостов и железнодорожного полотна.

Ключевые слова: георадар (GPR); дефекты дорожного покрытия; YOLOv12; предварительная обработка данных; объединение наборов данных; аугментация данных; механизм внимания

Кіріспе. Георадар (Ground Penetrating Radar, GPR) - жер беті астындағы құрылымдарды және материалдардағы ақауларды электрлік сипаттамалар

арқылы анықтауға арналған жерүсті-үңгісі радиолокациялық жүйе. GPR импульстік радиотолқындарды жіберіп, олардың әртүрлі материалдардағы шағылысуы мен жұтуын тіркейді; алынған рефлектограммалар арқылы жол жабынының, негіз қабаттарының және құрылымдық элементтердің ішкі құрылымы туралы ақпарат алынады. GPR-дің артықшылығы - материалдарды зақымдамай тексеру, тереңдікті және кеңістіктегі өзгерістерді жоғары дәлдікпен көру мүмкіндігі.

Жол астындағы дефектілер мен ақаулықтар қатарына келесі негізгі класстар жатады: босаңсу (Loose), қабатаралық байланыстың жеткіліксіздігі (Interlayer bonding deficiency), зақым жоқ (No damage), қуыс (Void), жарық (Crack). Бұл ақаулықтар жолдың қызмет мерзіміне, қауіпсіздігіне және жөндеу шығындарының өсуіне тікелей әсер етеді. Зерттеуде қолданылған үш деректер қорынан жиналған финалдық класстар және олардың үлестері: Loose (14,700), Interlayer bonding deficiency (14,140), No damage (12,940), Void (13,937), Crack (13,327).

Yolov12 - объектілерді анықтау мен классификацияға арналған соңғы ұрпақтағы жылдам және дәл нейрондық желілердің бірі. Ол алдыңғы YOLO серияларының жетістіктеріне негізделіп, нақты уақытта детекция жасауға оңтайландырылған архитектура және жоғалту функциялары, сондай-ақ кіші модельдердің өнімділігін арттырушы оптимизацияларды ұсынады.

Yolov12 кең ауқымды визуалды тапсырмаларда (қазіргі уақыттағы детекция) қолданылады және әдетте жылдамдық пен дәлдіктің тиімді балансын береді. Осы жұмыста Yolov12 моделі GPR кескіндеріндегі жер асты қабаттарының ақаулықтарын классификациялау және детекциялау мақсатында қолданылды. Зерттеудегі негізгі тезис - үш тәуелсіз GPR деректер қорынан алынған суреттерді жинап, аннотациялап және алдын ала өңдеуден өткізу арқылы жаңа модельді енгізу жолымен классификация және детекция дәлдігін айтарлықтай (шамамен 3% ұлғайту) жақсартуға мүмкіндік береді. Ғылыми жаңалық ретінде ұсынылатын жайттар: үлкен көлемді, теңдестірілген емес адрестелген (heterogeneous) GPR деректерін біріктіру әдісі, Yolov12-ні GPR-ге арнайы бейімдеу (деректерді алдын ала өңдеу мен аннотациялық) және осы тәсілдің нақты жоғары дәлдікке әкелетін тиімділігі.

Жол жабының ұзақ мерзімді пайдалану сапасы мемлекеттік көлік инфрақұрылымының негізгі көрсеткіштерінің бірі болып табылады, сондықтан жол бетінің астыңғы қабаттарындағы жасырын ақаулықтарды уақытылы анықтау жол қауіпсіздігін арттырудың және жол қорының қызмет мерзімін ұзартудың маңызды факторы болып саналады. Дәстүрлі бақылау әдістері - көзбен шолу, бұрғылау арқылы үлгі алу немесе жергілікті сынама алу - көбінесе беткі ақауларды ғана анықтайды және құрылымның терең қабаттарындағы жасырын зақымдарды уақтылы табуға мүмкіндік бермейді, әрі олар жол қозғалысын уақытша тоқтатуды талап ететін, шығыны жоғары процедуралар болып табылады. Осыған байланысты, георадар технологиясы мен машиналық оқыту әдістерін біріктіру жол мониторингінің дәлдігі

мен жылдамдығын арттырудың перспективалы бағыты болып отыр. Осы жұмыстың құрылымы келесідей: 2-бөлімде георадар технологиясы мен жол астындағы дефектілерге қатысты әдеби шолу және YOLOv12 моделінің теориялық негіздері келтіріледі; 3-бөлімде зерттеудің мақсаты мен міндеттері тұжырымдалады; 4-бөлімде қолданылған материалдар, деректер қорлары және әдістеме сипатталады; 5-бөлімде эксперименттер нәтижелері ұсынылады; 6-бөлімде алынған нәтижелер талқыланады; ал 7-бөлімде зерттеудің қорытындысы мен болашақ бағыттары келтіріледі.

Әдеби шолу. Жолдың төменгі қабаттарындағы ақаулықтарды анықтауда жерүсті-үңгісірадиолокациясы (Ground-Penetrating Radar, GPR) технологиясы маңызды орын алады. GPR беттен көрінбейтін ішкі ақаулықтарды анықтай алатын артықшылықтарға ие (Yu et.al., 2024: 1). Ол электромагниттік толқындарды қолдана отырып жабынының құрылымы туралы ақпарат береді. Соңғы зерттеулер GPR деректерінен нақтырақ диагноз қою үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануды көрсетті. Мысалы, (Sui et.al., 2023: 4) ішкі ақаулықтарды анықтаудағы машиналық оқыту әдістерін шолып шықса, (Li et.al., 2021: 121949) жасырын жарықтарды анықтауға арналған терең оқу алгоритмдеріне назар аударған. GPR-дің үшөлшемді қайта құрылымдау мүмкіндігі (Liu et.al., 2021: 8305) және (Wang et.al., 2024: 162) жұмыстарында көрсетілген, бұл құрылымдық ақауларды анықтаудағы оның тиімділігін дәлелдейді. Сондай-ақ, (Li et.al., 2022: 104516) зерттеуі GPR-дің жол төменгі қабаттарындағы ақаулықтарды анықтауда дәстүрлі әдістерді толықтыратынын көрсетті. Қосымша ретінде (Wang et.al., 2024b: 6757) жұмысы назар аудару механизмдерін біріктіру арқылы идентификация алгоритмдерін жақсарту тәсілдерін зерттейді. Соңғы зерттеулерде YOLOv11-SAFM (Li et.al., 2025: 141907) сияқты назар механизмдері бар YOLO нұсқалары GPR кескіндеріндегі жасырын дефектілерді анықтауда жоғары нәтиже көрсетті; (Zhu et.al., 2024: 19) оңтайландырылған YOLO негізіндегі әдісті ұсынды.

Жолдың төменгі қабаттарындағы ақаулықтарды анықтауда Жерүсті-үңгісі радиолокациясы (Ground-Penetrating Radar, GPR) технологиясы маңызды орын алады. GPR беттен көрінбейтін ішкі ақаулықтарды анықтай алатын артықшылықтарға ие (Yu et.al., 2024: 1). Ол электромагниттік толқындарды қолдана отырып жабынының құрылымы туралы ақпарат береді. Соңғы зерттеулер GPR деректерінен нақтырақ диагноз қою үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануды көрсетті. Мысалы, (Sui et.al., 2023: 4) ішкі ақаулықтарды анықтаудағы машиналық оқыту әдістерін шолып шықса, (Li et.al., 2021: 121949) жасырын жарықтарды анықтауға арналған терең оқу алгоритмдеріне назар аударған. GPR-дің үшөлшемді қайта құрылымдау мүмкіндігі (Liu et.al., 2021: 8305) және Wang (Wang et.al., 2024: 162) жұмыстарында көрсетілген, бұл құрылымдық ақауларды анықтаудағы оның тиімділігін дәлелдейді. Сондай-ақ, (Li et.al., 2022: 104516) зерттеуі GPR-дің жол төменгі қабаттарындағы ақаулықтарды анықтауда дәстүрлі

әдістерді толықтыратынын көрсетті. Қосымша ретінде (Wang et.al., 2024b: 6757) жұмысы назар аудару механизмдерін біріктіру арқылы идентификация алгоритмдерін жақсарту тәсілдерін зерттейді.

Жалпы алғанда, келтірілген зерттеулер георадар технологиясының жол құрылымдарын бұзбай тексерудегі әлеуетін көрсеткенімен, олардың басым бөлігі жеке деректер қорларымен шектеліп, әртүрлі өлшеу жағдайларында алынған гетерогенді деректерді біріктіру мәселесін толық қарастырмайды. Атап айтқанда, (Sui et.al., 2023: 4) жүргізген шолу жұмыстарында машиналық оқыту әдістерінің тиімділігі көрсетілгенімен, деректердің шектеулі көлемі мен сыныптардың теңгерімсіздігі нақты өндірістік жағдайда модельдің жалпылау қабілетін төмендететіні атап өтіледі. Қолданыстағы жұмыстар негізінен бір ғана деректер көзіне бейімделген модельдерді ұсынады, ал көптеген тәуелсіз дереккөздерді біріктіру арқылы модельдің тұрақтылығын арттыру мәселесі әлі де жеткілікті зерттелмеген. Дәл осы олқылық ағымдағы зерттеудің негізгі себептерінің бірі болып табылады.

Жолдың төменгі қабаттарындағы дефектілерге қатысты зерттеулер бұл ақаулықтардың пайда болу себептері, диагностика әдістері және әсері туралы кешенді деректер береді. Төменде берілген негізгі класстарға қатысты әдебиет шолуында маңызды тұстар көрсетілген.

- Босаңсу (Loose): Қаптаманың немесе негіз материалының тығыздығының төмендеуі нәтижесінде пайда болатын механикалық беріктіліктің азаюы. Teltayev et.al. зерттеулері материалдардың пайда болу механизмдерін, босаңсудың жол қызметіне әсерін талқылайды (Teltayev et.al., 2024: 1089). Бұл дефекті анықтау үшін GPR-дан алынған сигналдардың амплитудасы мен фазалық өзгерістерін пайдалану тиімді екені көрсетілген.

- Қабатаралық байланыстың жеткіліксіздігі (Interlayer bonding deficiency): Қабаттар арасындағы адгезияның әлсіреуі жол жабынының ерте зақымдануына әкеледі. Kairanbayeva және әріптестерінің жұмыстары қабатаралық байланыстың физикасын, оның термальдық және механикалық факторларға тәуелділігін және болжау модельдерін қарастырады (Kairanbayeva et.al., 2024: 1081). GPR сигналдарының уақытша және кеңістік сипаттамаларын талдау арқылы осындай ақаулықтарды сенімді анықтауға болатыны айтылады.

- Зақым жоқ (No damage): Бұл класс үлгілердің қалыпты, қызмет жағдайына сай екенін білдіреді. Салыстырмалы талдаулар мен модельдердің сенімділігі осы «No damage» сыныбын дұрыс тану қабілетіне тәуелді. Ragnoli және әріптестерінің зерттеулері диагностикалық алгоритмдердің жалған он/теріс табуды қалай азайтатынын және сау үлгілерді бөлу әдістерін сипаттайды (Ragnoli et.al., 2018: 58).

- Қуыс (Void): Негізде немесе қабаттар арасындағы бос аймақтар, олар жүктеме кезінде айтарлықтай құрылымдық әлсіреуге әкелуі мүмкін. Қуыстардың GPR-да анықталуы көбінесе төменгі энергиялы шағылысулар және уақыттың ішінде фазалық ерекшеліктер арқылы жүзеге асады; бұл

туралы итеративті инверсия және сигнал өңдеу әдістерін сипаттаған зерттеулерде баяндалған (Sui et.al., 2023; Teltayev et.al., 2024).

- Жарықшақ (Crack): Жүктеме, созылу немесе материалдың шаршауынан пайда болған үзінділер. Li және басқа авторлардың жұмыстары (жоғарыда көрсетілген әдебиеттерге балама көздерде) жарықтарды анықтауда GPR сигналының жоғары жиілік компоненттері мен локализациялаудың қалыпты емес шабуылдарын пайдалану тиімді екенін көрсетеді; сонымен қатар машиналық оқыту әдістерінің жарық пен басқа ақаулықтарды ажыратуда маңызды екенін растайды (Ragnoli et.al., 2018: 58; Sui et.al., 2023).

Жоғарыда сипатталған бес дефект класы (Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void, Crack) өзара физикалық табиғаты жағынан айтарлықтай ерекшеленгенімен, GPR сигналында олардың кейбіреуі ұқсас шағылысу үлгілерін көрсетуі мүмкін. Мәселен, қуыс пен жарық арасындағы ажырату көбінесе ауа қуысының геометриялық пішініне және шағылысқан толқынның фазалық ауысуына байланысты жүзеге асады, ал бұл ерекшеліктерді дәстүрлі шекті мәнге негізделген (threshold-based) әдістермен сенімді түрде анықтау қиынға соғады. Дәл осындай жағдайларда терең оқыту әдістерінің, атап айтқанда конволюциялық және назар аудару механизмдеріне негізделген архитектуралардың артықшылығы айқын көрінеді, өйткені олар кескіндегі жергілікті текстуралық ерекшеліктермен қатар кеңірек контекстік ақпаратты да есепке ала алады.

YOLOv12 - назар (attention)-орталықты, нақты уақытта жұмыс істейтін объектілерді анықтау архитектурасы ретінде 2025 жылы ұсынылған модель (Tian et.al., 2025; Ultralytics, 2025). YOLO сериясының алдыңғы нұсқаларынан айырмашылығы, YOLOv12 үлкенірек контексті өңдеу үшін тиімді назар механизмдерін енгізеді және арнайы оңтайландырудар арқылы жылдамдық пен дәлдіктің балансына қол жеткізеді. Ол детекция, классификация, сегментация және басқа да компьютерлік көру тапсырмалары үшін қолданылады; көптеген зерттеу және өндірістік жүйелерде нақты уақытта объектілерді анықтау үшін таңдалады (sunsmarterjie, 2025; Tian et.al., 2025: 1). YOLOv12-нің негізгі артықшылықтары мен сипаттары:

- Назарға негізделген блоктар арқылы кең қабылдау өрістерін тиімді модельдеу және локаль/глобаль контексті біріктіру (Tian et.al., 2025: 1).

- Флэш-назар (FlashAttention) сияқты оптимизацияларды пайдалану арқылы жеделдетілген есептеу өнімділігі (Ultralytics, 2025).

- Әртүрлі масштабтағы модель конфигурациялары (nano, small, medium, large, x) арқылы ресурстарға байланысты таңдау мүмкіндігі (Ultralytics, 2025).

GPR кескіндерін өңдеуде YOLOv12-ні қолданудың негіздемесі - модельдің детекция және классификация бойынша жоғары дәлдігі мен нақты уақытта жұмыс істеу қабілеті. Бұл жұмыста YOLOv12 GPR суреттеріндегі жол астындағы дефектілерді (Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void, Crack) және олардың локализациясын анықтау үшін бейімделіп қолданылды;

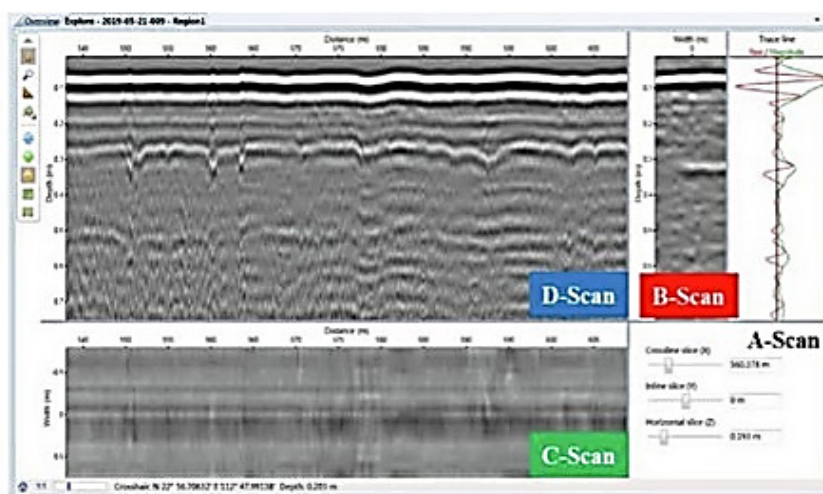
модельді детекция және сыныптау үшін екі тапсырмада пайдалану арқылы белгіленген ақаулықтарды автоматты түрде табу мен жіктеу жүзеге асырылды. YOLOсериясыныңалдыңғынұсқалары(мысалы,YOLOv5,YOLOv8)негізінен конволюциялық магистральдарға (backbone) сүйенетін, ал YOLOv12 назар аудару блоктарын тиімді конволюциялық компоненттермен біріктіру арқылы есептеу шығынын арттырмай контекстік ақпаратты жақсырақ пайдалануға мүмкіндік береді (Tian et.al., 2025; Ultralytics, 2025). Бұл ерекшелік әсіресе GPR кескіндері сияқты, ақаулықтардың шекарасы бұлыңғыр және фондық шудан нашар ажыратылатын мәліметтер үшін маңызды, себебі назар механизмдері модельге кескіннің диагностикалық маңызы бар аймақтарына басымдық беруге көмектеседі. Сондықтан осы жұмыста жеңіл папо немесе small нұсқалардың орнына, күрделі құрылымдық ерекшеліктерді жақсырақ ұстап тұратын YOLOv12-х конфигурациясы таңдалды.

Зерттеудің негізгі мақсаты - GPR (Ground Penetrating Radar) кескіндерінен Yolov12 моделін пайдаланып жолдың төменгі қабаттарындағы дефектілерді (Loose, Interlayer bonding deficiency, No damage, Void, Crack) автоматты түрде анықтау және локализациялау арқылы классификация және детекция дәлдігін арттыру. Осы мақсатқа жету үшін бірнеше міндет орындалды: үш тәуелсіз GPR деректер қорынан суреттер жиналып біріктіріледі және бес классқа сәйкес аннотацияланады; алдын ала өңдеу процедуралары (масштабтау және деректерді өрістету) әзірленеді; Yolov12 архитектурасы GPR кескіндеріне бейімделіп, архитектуралық параметрлер, жоғалту функциялары және назар блоктары конфигурацияланады; оқыту–валидация–тестілеу схемасы құрылады, онда деректердің бөлінуі, теңестіру және кросс-валидация стратегиялары қолданылады; өнімділікті бағалау үшін precision, recall, F1, mAP және класстар бойынша локализация дәлдігі сияқты метрикалар анықталып есептеледі; алынған модельдің нәтижелері бұрынғы әдістермен салыстырылады; соңында нәтижелер талданып, жүйенің жетістіктері мен шектеулері сипатталып, қателердің түрлері мен нақты жол жағдайларында қолдану мүмкіндігі бағаланып, болашақ зерттеулер мен практикалық енгізулерге ұсыныстар жасалады. Осы міндеттердің әрқайсысы зерттеудің жалпы мақсатына жетуге бағытталған кезеңдес құрылымды қалыптастырады: деректерді жинау мен біріктіру кезеңі модельдің оқыту базасын кеңейтуге, алдын ала өңдеу мен аннотациялау кезеңі деректердің сапасы мен сәйкестігін қамтамасыз етуге, ал модельді бейімдеу мен бағалау кезеңдері алынған нәтижелердің ғылыми және практикалық маңыздылығын растауға қызмет етеді. Зерттеу барысында алынған тәжірибелік нәтижелер тек модельдің дәлдігін бағалаумен шектелмей, сонымен қатар нақты жол жағдайларында туындауы мүмкін шектеулерді анықтауға да бағытталды.

Материалдар мен негізгі әдістер. Бұл зерттеуде жол жабынының астындағы дефектілерді анықтау үшін үш тәуелсіз GPR деректер қоры пайдаланылды. Деректер алдын ала өңдеуден өткізіліп, қажетті аугментация әдістері қолданылды. Дефектілерді анықтау және локализациялау міндетін

орындау үшін YOLOv12-х моделі таңдалып, біріктірілген деректер жиынтығында оқытылды. Зерттеу барысында деректерді дайындау, аннотациялау, модельді оқыту және нәтижелерді бағалау кезеңдері жүзеге асырылды.

Зерттеуде үш ашық және жария деректер қоры пайдаланылды: TIGPR (Қытай, 2025) - төрт класты (crack: 1224, interlayer debonding: 2020, loose: 2100, void: 305) қамтитын көпкөріністі GPR кескіндерінің жинағы (Liu et.al., 2025: 111665) ; бұл жинақ B-scan және C-scan кескіндерін қамтамасыз етіп (сурет 1), нүктелік «bounding box» аннотациялары жоқ жұпталған классификациялық тапсырмаларға арналған; GPR_Data (Марокко, 2019–2024) - деректерді жасанды түрде ұлғайтып алынған кескіндерден тұратын жинақ, екі классқа (void: 553, underground utility: 786) бөлінген және әрбір объект үшін bounding box аннотациялары бар (LCSkhalid, 2019–2024); Radar (Қытай, 2024) - төрт класты (Disengaging: 23, No damage: 200, crack: 296, void: 173) қамтитын жинақ, мұнда да bounding box аннотациялары жоқ немесе шектеулі (zhouchunpong, 2024).



Сурет 1 — GPR кескіндер мысалы

Осы үш дерекқор бірлесіп әртүрлі көздерден алынған GPR сигналдарының вариативтілігін береді: аннотацияланған және аннотацияланбаған кескіндер, әртүрлі масштабтар мен рұқсаттар, сондай-ақ әртүрлі класстардың теңесімсіздігі; бұл тәжірибе Yolov12 моделін классификациялау мен детекцияға бір мезгілде бейімдеу үшін қажет шынайы жағдайларды қамтамасыз етеді. Үш деректер қорының сипаттамаларын салыстыра отырып атап өткен жөн: TIGPR жинағы негізінен бақыланатын жағдайда алынған жоғары ажыратымдылықты кескіндерден тұрса, GPR_Data нақты жол учаскелерінен жиналған, ал Radar қоры өнеркәсіптік мониторинг

жүйелерінің сигналдарын қамтиды. Осындай әртүрлілік деректер қорларының статистикалық сипаттамаларының (сигнал-шу қатынасы, кескін ажыратымдылығы, класстар үлесі) айтарлықтай ерекшеленуіне алып келді, бұл модельді оқыту алдында деректерді біріздендіру (нормализациялау және масштабтау) қажеттілігін туындатты.

Yolov12 алгоритм сипаттамасы. Зерттеуде 34 миллион параметрі бар YOLOv12-х моделі қолданылды (Tian et.al., 2025: 1). Бұл модельдің негізгі ерекшелігі - назар аудару (attention-centric) механизміне негізделген архитектурасы, ол кескіндегі локальді және глобалды контекстті тиімді біріктіруге мүмкіндік береді (Kairanbayeva et.al., 2024: 1081).

Төменгі деңгейдегі есептеулерді жеделдету үшін FlashAttention сияқты оңтайландыру әдістері пайдаланылды, бұл GPR кескіндерін нақты уақыт режимінде өңдеуге мүмкіндік береді (Kairanbayeva et.al., 2024: 1081). Модельдің кіріс қабаты 640×640 пиксель өлшеміндегі кескіндерді қабылдауға бейімделді, ал магистраль (backbone) бөлігінде назар аудару блоктары әр деңгейде локальді және глобалды ерекшеліктерді бөлек өңдейтіндей етіп конфигурацияланды. Жоғалту функциясы ретінде box, classification және distribution focal loss компоненттерінің салмақталған қосындысы қолданылды, бұл модельдің детекция мен классификация тапсырмаларын бір мезгілде тиімді орындауына мүмкіндік берді. Гиперпараметрлерді таңдау кезінде алдын ала жүргізілген валидациялық эксперименттер негізге алынды. Үш деректер қорын біріктіру үшін келесі өңдеу шаралары жүзеге асырылды:

- TIGPR деректері: «Void» (қуыс) класы үшін деректерді молайту (augmentation) мақсатында горизонталды бұру әдісі қолданылып, үлгілер саны 610-ға дейін жеткізілді (Tian et.al., 2025: 1).

- Radar деректері: Геометриялық трансформациялар (айналдыру, масштабтау), кездейсоқ шу қосу және спектрлік ығысу әдістері арқылы «Void» және «Crack» кластарының саны айтарлықтай арттырылды (Li et.al., 2021: 121949).

- Финалдық біріктіру: TIGPR, GPR_Data және Radar деректері біріктіріліп, саны аз болғандықтан «Disengaging» және «Utilities» кластары алынып тасталды. Нәтижесінде бес негізгі класс қалды: Loose (14700), Interlayer bonding deficiency (14140), No damage (12940), Void (13937) және Crack (13327) (Li et.al., 2022: 104516).

GPR_Data деректер қорында бастапқы bounding box аннотациялары болған, ал TIGPR және Radar деректер қорларында аннотациялар болмаған немесе толық берілмеген. Сондықтан TIGPR және Radar кескіндері үшін алдын ала оқытылған модель негізінде псевдоаннотациялау жүргізілді. Алынған аннотациялар автоматты түрде тексеріліп, күмәнді жағдайлар іріктеп қаралды. Осыған байланысты TIGPR және Radar деректер қорларындағы бағалау нәтижелері толық тәуелсіз эталондық разметкаға негізделмейді және модельдің псевдоаннотациялармен сәйкестігін де көрсетеді. Бұл жағдай зерттеудің негізгі шектеулерінің бірі болып табылады. Модельдің

нақты детекция қабілетін неғұрлым объективті бағалау үшін болашақта аталған деректер қорларының тәуелсіз сарапшылар тарапынан толық қайта аннотациялануы қажет. Модельді оқыту «Adam» оптимизаторын қолдану арқылы жүргізілді. TIGPR деректерінде 105 эпоха, ал біріктірілген деректер қорында 111 эпоха бойы оқыту жүргізілді (Liu et.al., 2021: 8305). Деректердің 95%-ы оқытуға, ал 5%-ы валидацияға бөлінді (Tian et.al., 2025: 1).

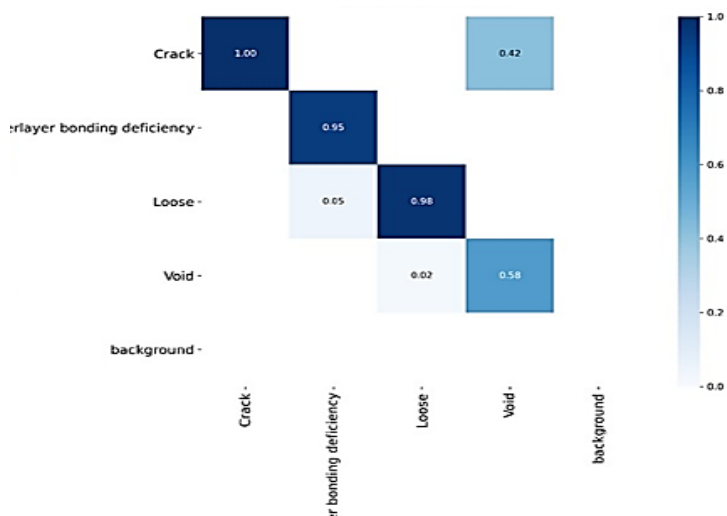
Оқыту барысында барлық кескіндер 640×640 пиксель өлшеміне келтірілді. Модельді оқыту кезінде бастапқы үйрену жылдамдығы (learning rate) кезең сайын төмендетіліп отырды. Артық үйренудің (overfitting) алдын алу үшін ерте тоқтату (early stopping) механизмі және деректерді аугментациялау әдістері қолданылды. Модель өнімділігі әр эпохадан кейін validation жиынтығында бағаланып, ең жақсы салмақтар сақталды. Барлық эксперименттер NVIDIA графикалық процессорында жүргізілді. Модельдің өнімділігін бағалау үшін қолданылған негізгі метрикалар келесідей анықталды: precision - дұрыс анықталған оң нәтижелердің барлық оң деп танылған нәтижелерге қатынасы; recall - дұрыс анықталған оң нәтижелердің нақты оң мысалдар санына қатынасы; F1-score - precision пен recall-дың гармоникалық ортасы; ал mAP (mean Average Precision) - барлық класстар бойынша орташаланған дәлдік-толықтық қисығының астындағы аудан. Бұл метрикалар модельдің детекция сапасын әртүрлі қырынан бағалауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер. Зерттеу барысында үш негізгі деректер қоры (TIGPR, GPR_Data, Radar) біріктірілді. Модельдің сапасын арттыру үшін «Void» (қуыс) класы бойынша TIGPR-ден 610 кескін көлденең айналдыру (horizontal flip) арқылы көбейтілді. Radar деректеріне спектрлік ығысу (spectral shifting), геометриялық трансформациялар және кездейсоқ шу қосу әдістері қолданылды (Liu et.al., 2025: 111665). Финалдық біріктірілген деректер қорында кескін саны бойынша келесідей үлестірім жасалды: Loose (14700), Interlayer bonding deficiency (14140), No damage (12940), Void (13937) және Crack (13327). Аугментация процедураларының нәтижесінде теңгерімсіз кластар арасындағы айырмашылық айтарлықтай төмендеді, бұл модельдің оқыту кезінде барлық дефект түрлерін бірдей деңгейде «көруіне» мүмкіндік берді. Дегенмен, синтетикалық түрде көбейтілген үлгілер нақты өлшеу жағдайларының толық вариативтілігін қамтымайтындықтан, бұл тәсіл деректер тапшылығы мәселесін толығымен шеше алмайды, тек оның әсерін ішінара жеңілдетеді. YOLOv12-х моделінің әр деректер қоры бойынша көрсеткіштері №1-кестеде берілген.

Кесте 1 — YOLOv12-х моделінің әртүрлі деректер жиынтығындағы дәлдігі

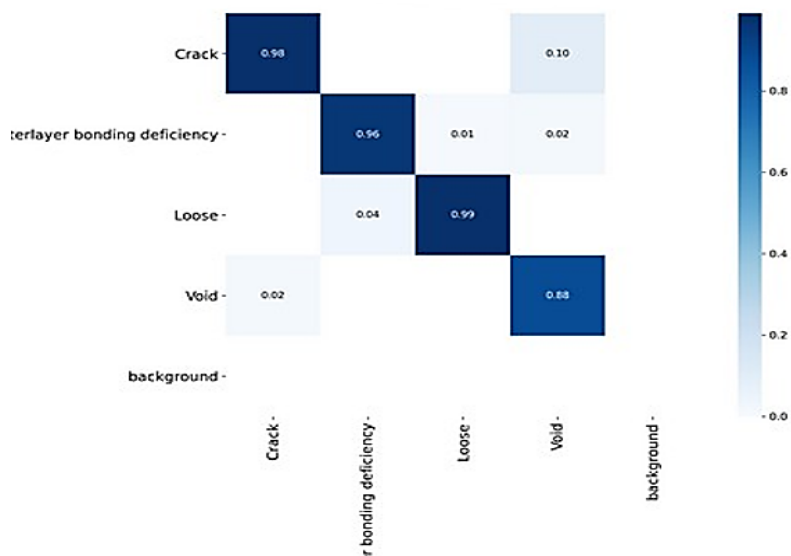
Деректер қоры	Дәлдік	F1-score	Негізгі мәселе
TIGPR	93.3%	89.0%	'Void' суреттері аз (305)
GPR_Data	96.0%	95.0%	'Void' суреттері +30% артты
Radar	94.7%	87.0%	'Disengaging' класын тану қиын

TIGPR деректерінде модель «Debonding» класын 100% толықтықпен анықтағанымен, №2 суретте көрсетілгендей «Void» класын тануда қиындықтар туындады (Recall 58%).



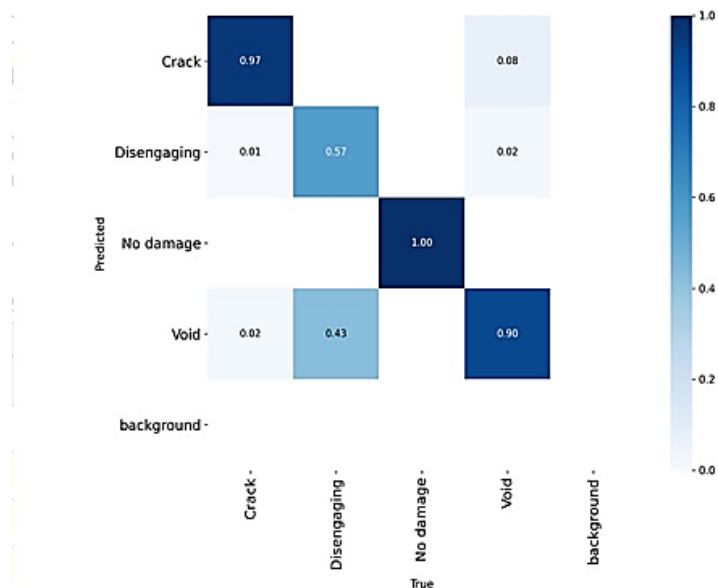
Сурет 2 — TIGPR қорының қателіктер матрицасы

Алайда, №3 суретте көрсетілгендей GPR_Data деректерімен фаинтюнинг жасағаннан кейін «Void» класының 'Recall' метрикасы 88%-ға дейін жақсарды.



Сурет 3 — GPR_Data қорының қателіктер матрицасы

Ал №4 суретте көрсетілгендей, 'Radar' деректер қорында «Disengaging» класының 'F1-score' метрикасы төмен болды (62%).



Сурет 4 — Radar қорының қателіктер матрицасы

Жеке деректер қорлары бойынша алынған нәтижелерді салыстыру модельдің әрбір дереккөздің ерекшеліктеріне қаншалықты сезімтал екенін көрсетті. Атап айтқанда, GPR_Data қорындағы жоғары дәлдік (96%) осы жинақтың салыстырмалы түрде біртекті жиналу жағдайларымен түсіндірілсе, ал TIGPR мен Radar қорларындағы төмендеу негізінен сирек кездесетін класстардың (Void, Disengaging) жеткіліксіз үлгі санымен байланысты болды. Бұл нәтиже деректерді біріктірудің қажеттілігін тағы да растайды.

Біріктірілген деректер қорында оқытылған модель әртүрлі көздерден алынған GPR сигналдарының ерекшеліктерін тиімді меңгере алды. Бұл нәтиже деректердің гетерогенділігі модельдің жалпылау қабілетін арттыратынын көрсетеді. Әсіресе "No Damage" класы жоғары дәлдікпен анықталды, себебі бұл кластың сигналдық құрылымы басқа ақауларға қарағанда тұрақты және біркелкі болды. Ал "Void" және "Crack" кластарының ұқсас шағылысу сипаттамалары олардың өзара шатасуына себеп болды.

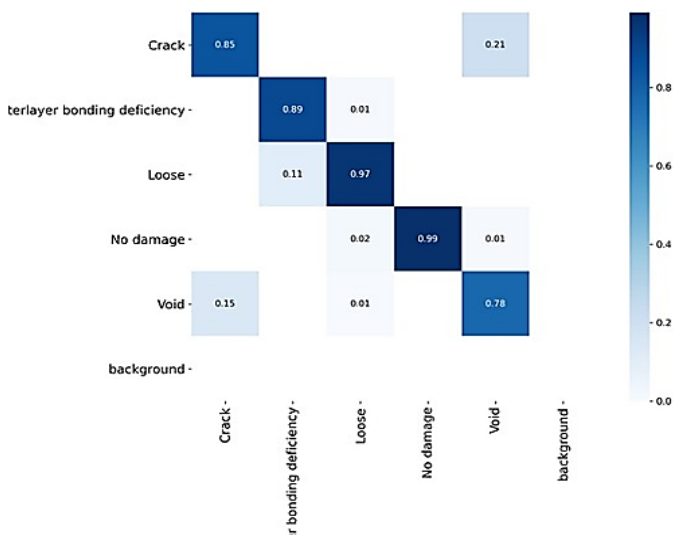
YOLOv12-x моделі TIGPR және GPR_Data деректер қоры бойынша бинарлы классификация нәтижелерін көрсетті. Атап айтқанда, Crack және Void сынды сыныптарды анықтауда модельдің тиімділігі байқалды. №2 кестеде көрсетілгендей, біріктірілген деректерінде модель Crack және Void кластарын тануда барлық метрикалар бойынша 90% нәтиже алды.

Кесте 2 — YOLOv12-х моделінің Crack және Void кластарын тануда метрикалары

Класс	Дәлдік	Precision	Recall	F1-score
Crack	92.6%	91.0%	95.0%	93.0%
Void	92.6%	95.0%	90.0%	92.0%

Осы кестеден көрінетіндей, Crack және Void кластары бойынша алынған дәлдік, precision, recall және F1-score көрсеткіштері бір-біріне жақын, бұл екі класстың біріктірілген деректе де ұқсас деңгейде танылатынын көрсетеді. Дегенмен, бұл класстар арасындағы физикалық ұқсастық толықтай жойылмағанын келесі бөлімдегі қателіктер матрицасының нәтижелері растайды.

Үш деректер қорын біріктіріп оқытқанда, модельдің жалпы дәлдігі 92%-ды құрады. Ең жоғары нәтиже «No damage» класында байқалды (F1-score 99%), ал «Void» және «Crack» кластары 85% көрсеткішін көрсетті. №5 суретте модельдің біріктірілген деректер қорының валидация бөлігінде жасалынған қателіктер матрицасын көруге болады.



Сурет 5 — Біріктірілген деректер қорының қателіктер матрицасы

Біріктірілген деректер қорында алынған нәтижелер жеке қорлармен салыстырғанда тұрақтырақ болды, өйткені модель әртүрлі дереккөздердің ортақ құрылымдық белгілерін меңгеруге мәжбүр болды. Бұл, өз кезегінде, модельдің жаңа, бұрын көрмеген деректерге де жақсырақ бейімделу қабілетін (generalization) арттырды деп тұжырымдауға негіз береді.

Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, 34 млн параметрі бар YOLOv12-х моделі біріктірілген деректерде 92% жалпы дәлдікке қол жеткізді. Жекелеген деректер қоры бойынша көрсеткіштер:

- TIGPR: Accuracy 93.3%, F1 89.0%. «Crack» класы бойынша Recall 100% болса, «Void» класында бұл көрсеткіш бар болғаны 58%-ды құрады.

- GPR_Data: Accuracy 96%-ға дейін өсті. Бұл «Void» класының Recall көрсеткішін 30%-ға жақсартуға мүмкіндік берді.

- Radar: Accuracy 94.7%. «No damage» класы 100% дәлдікпен анықталды.

Класстар бойынша алынған көрсеткіштерді талдау Void класының детекциясы бойынша қордан қорға айтарлықтай ауытқу байқалатынын көрсетті, бұл көбінесе аталған класстың GPR сигналында төмен энергиялы, шудан нашар ажыратылатын шағылысу үлгісімен байланысты. Ал No damage класы барлық үш деректер қорында тұрақты жоғары көрсеткішке қол жеткізді, себебі бұл класс үшін сигналдың біртекті, ерекшелік көрсетпейтін сипаты тән.

YOLOv12-х моделінің нәтижелері CNN, Faster R-CNN және YOLOv8 архитектуралары қолданылған бұрынғы зерттеулердің әдеби деректерімен салыстырылды. Сонымен қатар, Zhu et.al. (2024: 19) және Li et.al. (2025: 141907) еңбектерінде ұсынылған YOLO негізіндегі GPR детекция әдістері қарастырылды. Алайда аталған архитектуралар бойынша осы зерттеу аясында жеке эксперименттер жүргізілген жоқ, сондықтан олардың көрсеткіштерімен тікелей сандық салыстыру жасалмады. Әдеби деректерде CNN модельдерінің көбіне классификация міндеттеріне бағытталатыны, Faster R-CNN архитектурасының жоғары есептеу шығындарын қажет ететіні, ал YOLO негізіндегі модельдердің нақты уақыттағы детекцияға бейімділігі көрсетіледі. Осы зерттеуде YOLOv12-х біріктірілген GPR деректер қорында 92% жалпы дәлдік көрсетті. Бұл нәтиже модельдің қолданылған деректер жағдайында тиімді жұмыс істей алатынын көрсетеді. Дегенмен, YOLOv12-х моделінің басқа архитектуралардан нақты артықшылығын растау үшін болашақта оларды бірдей деректер қоры мен бірдей эксперименттік параметрлер жағдайында салыстырып тексеру қажет.

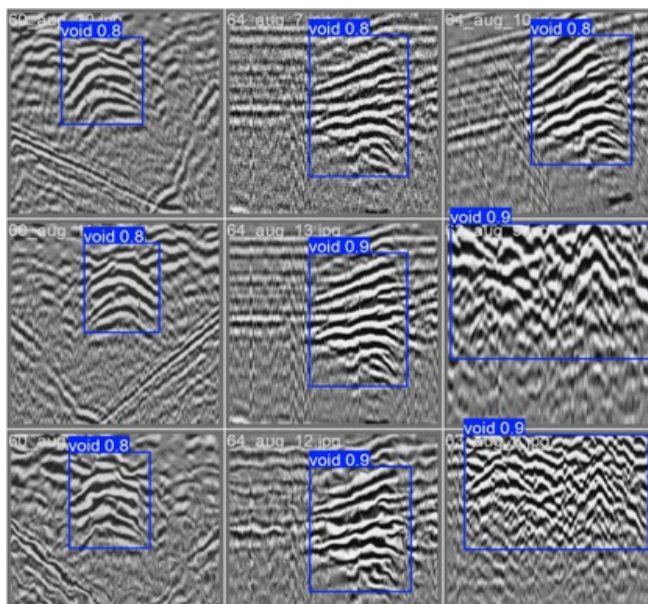
Зерттеудің негізгі шектеулерінің бірі — кейбір кластардағы деректер санының жеткіліксіздігі. Әсіресе Void және Crack кластарында ұқсас сигналдық сипаттамалар байқалды, бұл модельдің кей жағдайларда қате классификация жасауына әсер етті. Сонымен қатар, пайдаланылған деректер қорлары әртүрлі құрылғылар мен өлшеу жағдайларында жиналғандықтан, сигналдардың біркелкі еместігі байқалды. Болашақта үлкен көлемді аннотацияланған деректерді пайдалану және қосымша домендік бейімдеу әдістерін енгізу модель өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Осы шектеулерге қосымша, зерттеу барысында қолданылған деректер қорларының географиялық және климаттық шарттар бойынша алуан түрлілігі шектеулі болғандығын атап өткен жөн. Бұл модельдің басқа климаттық аймақтарда немесе басқа жол құрылымдарында қаншалықты тұрақты жұмыс істейтінін толық растауға мүмкіндік бермейді, сондықтан алынған нәтижелерді жалпылау кезінде осы фактор ескерілуі тиіс. TIGPR және Radar деректер қорларында тәуелсіз толық bounding box-разметканың болмауы зерттеу нәтижелерінің объективтілігін

шектейді, себебі бағалау көрсеткіштері ішінара модель көмегімен жасалған псевдоаннотацияларға негізделді.

Талқылаулар. Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, YOLOv12-х моделі GPR кескіндеріндегі ақауларды жоғары дәлдікпен жіктей алады. Дегенмен, қателіктер матрицасы кейбір кластардың өзара ауысып кететінін көрсетті:

- «Crack» жиі «Void» класымен шатастырылады.
- «Loose» (босаңсу) кейде «Interlayer bonding deficiency» (қабатаралық байланыс жеткіліксіздігі) ретінде қабылданады.
- Төмен сенімділікпен (low confidence) анықталған 61 «Void» кескіні модельдің аннотацияланбаған деректерде әлі де жетілдіруді қажет ететінін білдіреді.

Модельдің ақауларды қалай табатынын (bounding boxes) №6 суретте көрсетілген.

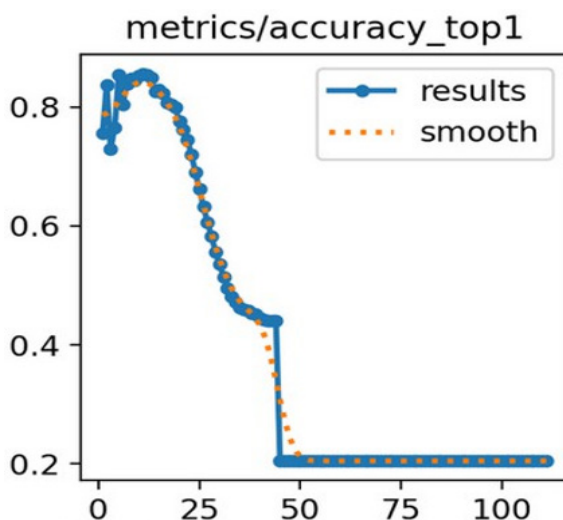


Сурет 6 — «Bounding boxes» тіктөртбұрыштарындағы ақаулықтар

Эксперимент барысында анықталғандай, модель кейбір ұқсас дефектілерді шатастырады. Қателер матрицасы «Crack» және «Void» арасында, сондай-ақ «Loose» және «Interlayer bonding deficiency» арасында белгілі бір деңгейде шатасулар бар екенін көрсетті. Атап айтқанда, аннотациясы жоқ TIGPR суреттерінде детекция жүргізгенде, 610 кескіннің ішінен 396-сы жоғары сенімділікпен табылды, ал 153 кескінде детекция жасалмады.

Сондай-ақ, 10 000 итерация кезінде модель дәлдігінің күрт төмендеуі байқалды (сурет 7). Бұл құбылыс модельдің осы кезеңде тұрақсыз

оқытылғанын көрсетуі мүмкін. Оның ықтимал себептеріне оқыту жылдамдығының жоғары болуы, модельдің жекелеген кластарға шамадан тыс бейімделуі, деректер теңгерімсіздігі және аннотация сапасының біркелкі болмауы жатады. Әсіресе «Void» және «Crack» кластарының сигналдық ұқсастығы модельдің жалпылау қабілетіне әсер етуі мүмкін. Сондықтан оқыту процесін тұрақтандыру үшін learning rate мәнін қайта баптау, ерте тоқтату механизмін қолдану, деректер балансын тексеру және валидациялық көрсеткіштерді әр итерация кезеңінде бақылау қажет. Аталған нәтиже модель параметрлерін қосымша оңтайландыру қажеттігін көрсетеді.



Сурет 7 — 10,000 итерацияға оқыту кезіндегі мәселе

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, YOLOv12-х архитектурасындағы назар аудару механизмдері GPR кескіндеріндегі әлсіз құрылымдық ерекшеліктерді анықтауға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе жолдың ішкі қабаттарындағы шағын көлемді ақауларды локализациялау кезінде байқалды. Сонымен қатар, модельдің өнімділігі қолданылған аннотациялардың сапасына тікелей тәуелді екендігі анықталды. Аннотация дәлдігі жоғарылаған сайын локализация нәтижелері де жақсарды. Алынған нәтижелер георадар негізіндегі жол диагностикасы жүйелерін автоматтандыру бағытында практикалық маңызға ие. Атап айтқанда, ұсынылған тәсіл жол қызметтерінің шектеулі адами және уақыттық ресурстарын неғұрлым тиімді бөлуге, сол арқылы алдын алу сипатындағы жөндеу жұмыстарын жоспарлауға негіз бола алады. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері гетерогенді деректерді біріктіру тәсілінің көлік инфрақұрылымын бақылаудың басқа да салаларында, мысалы көпірлер мен темір жол төсемдерінің диагностикасында да қолданылу әлеуетін көрсетеді.

Қорытынды. Бұл жұмыста YOLOv12-х архитектурасы негізінде

дайындалған модель GPR кескіндеріндегі жол жабындысының дефектілерін локализациялау және классификациялау міндетінде тиімділігі көрсетілді. Біріктірілген деректер жиынтығында модель 92% жалпы дәлдікке жетіп, «No damage» класы $F1 \approx 99\%$ көрсеткішімен тұрақты дәлдікпен анықталды; ал «Crack» пен «Void» кластарында физикалық және шағылысу сипаттамаларының ұқсастығынан туындаған араласу нәтижесінде $F1$ шамамен 85% деңгейінде қалды. Деректердің гетерогенділігі модельдің жалпы жалпылау қабілетін арттырғанымен, кейбір сыныптардағы (Void, Crack) аннотациялардың аздығы мен сапасының төмендігі өнімділікті шектеді және анықтаудағы қатенің үлесін жоғарылатты. Сонымен қатар, әртүрлі құрылғылар мен өлшеу шарттарының вариациясы сигналдарда домендік ауытқулар туындатты, бұл модельдің тұрақтылығына әсер етті; оқу процесінде 10,000 итерацияда байқалған кенет төмендеу гиперпараметрлер мен деректер балансын қайта қарауды талап етеді. Зерттеу нәтижелері назар механизмдері бар YOLOv12-х архитектурасының шағын көлемді параметрлерімен нақты уақытқа жақын өңдеу мүмкіндігін сақтай отырып, GPR кескіндеріндегі әлсіз құрылымдық ерекшеліктерді анықтауға қабілетті екенін көрсетті, бұл оны практикалық мониторинг жүйелеріне ықтималды үміткер етеді. Алдағы жұмыс деректер жиынтығының көлемі мен аннотация сапасын ұлғайтуға, домендік бейімдеу және деректерді физика-бағдарланған синтездеу арқылы шатасатын кластар үшін арнайы аугментация әдістерін енгізуге, сондай-ақ гиперпараметр оптимизациясы мен оқыту тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін жүйелі кросс-валидация жүргізуге бағытталуы тиіс. Бұл қадамдар модельдің локализация және классификация дәлдігін айтарлықтай жақсартып, оны өндірістік қолдануларға интеграциялауға мүмкіндік береді. Практикалық тұрғыдан алғанда, әзірленген модельді нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін мобильді GPR жүйелерімен интеграциялау болашақ зерттеулердің маңызды бағыттарының бірі болып саналады. Сондай-ақ, модельдің нәтижелерін геоақпараттық жүйелермен (GIS) байланыстыру арқылы жол желісінің цифрлық картасын құру және ақаулықтардың кеңістіктік таралуын бақылау мүмкіндігін қарастыру ұсынылады. Осындай интеграция жол қызметтерінің шешім қабылдау процесін деректерге негізделген тәсілге көшіруге ықпал етеді.

References

- Kairanbayeva A., Zhantayev Z., Nurakynov S., Nurtas M., Nurpeissova G., Panyukova D., Mitkov A., Talgarbayeva D., Kudaibergenov M. (2024) Predictive system for road condition monitoring based on open climate and remote sensing data – a case study with mountain roads. *Engineered Science*. – Vol. 28. – P. 1081. <https://doi.org/10.30919/es1081> (in Eng.)
- LCSkhalid (2019–2024) GPR_Data [Data set]. GitHub. Available online: https://github.com/LCSkhalid/GPR_Data (in Eng.)
- Li S., Gu X., Xu X., Xu D., Zhang T., Liu Z., Dong Q. (2021) Detection of concealed cracks from ground penetrating radar images based on deep learning algorithm. *Construction and Building Materials*. – Vol. 273, 121949. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121949> (in Eng.)

Li Y., Liu C., Yue G., Gao Q., Du Y. (2022) Deep learning-based pavement subsurface distress detection via ground penetrating radar data. *Automation in Construction*. – Vol. 142, 104516. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104516> (in Eng.)

Li Y., Zhang W., Lv S., Yu J., Ge D., Guo J., Li L. (2025) YOLOv11-CAFM model in ground penetrating radar image for pavement distress detection and optimization study. *Construction and Building Materials*. – Vol. 485, 141907. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141907> (in Eng.)

Liu B., Ren Y., Liu H., Xu H., Wang Z., Cohn A.G., Jiang P. (2021) GPRinvNet: deep learning-based ground-penetrating radar data inversion for tunnel linings. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – Vol. 59(10). – P. 8305-8325. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3046454> (in Eng.)

Liu Z., Cui B., Gu X. (2025) TIGPR: a multi-view ground penetrating radar detection data for damage assessment of transportation infrastructure. *Data in Brief*. – Vol. 60, 111665. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111665> (in Eng.)

Ragnoli A., De Blasiis M.R., Di Benedetto A. (2018) Pavement distress detection methods: a review. *Infrastructures*. – Vol. 3(4). – P. 58. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058> (in Eng.)

Sui X., Leng Z., Wang S. (2023) Machine learning-based detection of transportation infrastructure internal defects using ground-penetrating radar: a state-of-the-art review. *Intelligent Transportation Infrastructure*. – Vol. 2, liad004. <https://doi.org/10.1093/iti/liad004> (in Eng.)

sunsmarterjie (2025) yolov12 [Computer software]. GitHub. Available online: <https://github.com/sunsmarterjie/yolov12> (in Eng.)

Teltayev B., Massanov A., Aitbayev Y., Zhaisanbayev A. (2024) Performance of a semi-rigid pavement: a North Kazakhstan case study. *Engineered Science*. – Vol. 29. – P. 1089. <https://doi.org/10.30919/es1089> (in Eng.)

Tian Y., Ye Q., Doermann D. (2025) YOLOv12: attention-centric real-time object detectors. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.12524> (in Eng.)

Ultralytics (2025) YOLO12: attention-centric object detection — documentation. Available online: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo12/> (in Eng.)

Wang L., Liu Z., Gu X., Wang D. (2024) Three-dimensional reconstruction of road structural defects using GPR investigation and back-projection algorithm. *Sensors*. – Vol. 25(1), 162. <https://doi.org/10.3390/s25010162> (in Eng.)

Wang Y., Yan S., Xi C., Yu Z., Zhou C., Chi F., Wei J. (2024) Research on road internal disease identification algorithm based on attention fusion mechanisms. *Sensors*. – Vol. 24(20), 6757. <https://doi.org/10.3390/s24206757> (in Eng.)

Yu B., Wang Y., Chen Q., Chen X., Zhang Y., Luan K., Ren X. (2024) A review of road 3D modeling based on light detection and ranging point clouds. *Journal of Road Engineering*. – Vol. 4(4). – P. 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.04.009> (in Eng.)

Zhu J., Zhao D., Luo X. (2024) Evaluating the optimised YOLO-based defect detection method for subsurface diagnosis with ground penetrating radar. *Road Materials and Pavement Design*. – Vol. 25(1). – P. 186-203. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2199880> (in Eng.)

zhouchunpong (2024) multi-view-3DGPR [Data set]. GitHub. Available online: <https://github.com/zhouchunpong/multi-view-3DGPR> (in Eng.)

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The Central Asian Academic Research Center LLP follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP will monitor and safeguard publishing ethics.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

www.nauka-nanrk.kz

<http://physics-mathematics.kz/index.php/en/archive>

ISSN2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Managing Editor: *A.Shormakova*

Editors: *D.S. Alenov, T. Apendiev*

Computer layout: *G.D. Zhadyranova*

Signed for print: September 30, 2026

Format: 70×90 1/16. 26.5 printed sheets. Order No. 3.