

Мақала
GTAMP: 28.23.37

**Көпдеңгейлі белгілерді біріктіру және кеңістіктік назар модуліне
негізделген терең оқыту модельдері арқылы жеке қорғаныс құралдарын
анықтау**

Н. Амангелді¹, А.Б.Барлыбаев², Н.А.Турсынова³,
^{1,2,3} *Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көшесі 2, 010008, Астана,*
Қазақстан
E-mail: amangeldi_n_3@enu.kz

Аннотация. Ұсынылып отырған зерттеу жұмысында түрлі өндіріс жұмыс орындарында кездесетін күрделі орталарда жеке қорғаныс құралдарын автоматты түрде тануға арналған терең оқыту модельдерінің тиімділігі қарастырылды. Жеке қорғаныс құралдары түрлі жарақаттар мен қауіпті әсерлерден сақтандыруға арналған, ал оларды қолдануды заманауи терең оқыту модельдерінің көмегімен бақылау маңызды әрі қажетті шешім болып табылады. Аталған зияндардың көп түрлілігіне орай, қорғаныс құралдарын толық қамту үшін көпклассты құрылымнан тұратын, әртүрлі көріністерді қамтыған, толық аннотацияланған заманауи, әлі зерделеніп үлгермеген деректер жиынын YOLOv11 терең оқыту желісімен оқытылып, олардың сенімділігі мен нақты қолданбалардағы әлеуеті бағаланды. Нәтижелер көрсеткендей, архитектуралық жағынан жетілдірілген модельдер күрделі және теңгерімсіз деректермен де тиімді жұмыс істей алады. Сонымен қатар, зерттеу барысында YOLOv8 және YOLOv10 модельдерімен салыстырмалы талдау жүргізіліп, әр архитектураның нұсқалары бойынша талдау жасалды. Бұл зерттеу өндірістік қауіпсіздік саласындағы интеллектуалды жүйелерді дамытуға үлес қосып, қызметкердің жұмыс орнындағы қауіпсіздік ережелерін сақтауын бақылау, сол арқылы өмірін сақтап қалу тұрғысынан практикалық қолдануға жарамды шешім ұсынады.

Түйін сөздер: терең оқыту, жеке қорғаныс құралы, өндірістік қауіпсіздік, интеллектуалды жүйе, компьютерлік көру.

DOI: <https://doi.org/10.32523/bulmathenu.2025/2.2>

2000 Mathematics Subject Classification: 68T07

Негізгі белгілер мен анықтамалар

Белгі / Термин	Анықтамасы
ЖКҚ (PPE)	Жеке қорғаныс құралдары – жұмысшыларды зиянды өндірістік факторлардан қорғауға арналған арнайы құралдар жиынтығы.
YOLO	You Only Look Once – бір кезеңді нысан детекциясына арналған нейрондық желі архитектурасы.
YOLOv8 / v10 / v11	YOLO модельдерінің әртүрлі буындары; олар дәлдік, жылдамдық және архитектуралық күрделілік бойынша ерекшеленеді.
SH17	17 түрлі ЖКҚ класын қамтитын ашық деректер жиынтығы, нақты өндірістік ортадан алынған кескіндермен аннотацияланған.
Precision	Дәлдік – модель тапқан объектілердің ішінде қаншасы шынайы дұрыс екенін көрсететін көрсеткіш.
Recall	Қамту – барлық шынайы объектілердің қаншасын модель дұрыс тапқанын сипаттайды.
mAP@50	Mean Average Precision, $IoU \geq 0.50$ жағдайындағы орташа дәлдік көрсеткіші.
mAP@50–95	IoU 0.50-ден 0.95-ке дейінгі аралықта алынған орташа дәлдік көрсеткіші (нақтырақ бағалау).
FPS	Frames Per Second – модельдің нақты уақыттағы өңдеу жылдамдығы (бір секундта өңделетін кадр саны).
SPFF	Spatial Pyramid Feature Fusion – әртүрлі масштабтағы белгілерді біріктіретін архитектуралық блок.
C2PSA	Cross-Channel Partial Spatial Attention – маңызды аймақтарға назар аударуға мүмкіндік беретін модуль.
Anchor-free	Алдын ала белгіленген якорь қораптарын пайдаланбай, нысандарды детекциялау тәсілі.
Overfitting	Модельдің оқыту деректеріне шамадан тыс бейімделіп, жаңа деректерге нашар жалпылау қабілеті.
Instance	Аннотацияланған нақты бір объект (мысалы, бір қолғап = 1 instance).

1. Кіріспе

Соңғы бес жылда Қазақстан Республикасында өндірістік жарақат алу жағдайлары өзектілігін жоғалтқан жоқ. Жалпы жұмыс орнындағы төтенше жағдайлар саны біршама азайғанымен [1], ауыр жарақаттар мен адам өліміне әкелген оқиғалар жиі кездеседі. Бұл жағдай әсіресе өнеркәсіптік қауіпсіздік талаптарының орындалмауына және жеке қорғаныс құралдарын (ЖКҚ) қолдануға немқұрайлықпен қарау немесе дұрыс пайдаланбауға байланысты туындайды. Мәселен, 2022 жылы елде 2 449 адам өндірістік жазатайым оқиғаға ұшырап, оның 202-сі қайтыс болса [2], 2023 жылы зардап шеккендер саны 2 670-ке жетті [3]. Олардың үштен бірінен астамында себеп – жұмыс процесінің дұрыс ұйымдастырылмауы, соның ішінде жұмысшыларға қажетті қорғаныс құралдарының берілмеуі немесе оларды қолданбауы болды. Ал 2025 жылдың алғашқы тоқсанында 293 адам зардап шегіп, 40 [4].

Бұл көрсеткіштер азайғанымен, ауыр жарақаттар мен қайғылы жағдайлар әлі де жиі тіркеліп отыр, әсіресе қауіпті саналатын салаларда (тау-кен өндірісі, құрылыс).

Аталған мәселелерді шешу үшін ЖҚҚ қолдануды бақылайтын заманауи шешімдер қажет [5, 6, 7], өз кезегінде аталмыш қорғаныс құралдары түрлі жарақаттар мен қауіпті әсерлерден сақтандыруға арналған негізгі құралдар болып табылады. Олар жұмысшыны қол-аяқтың сынуынан [8], көру немесе тыныс алу органдарының зақымдануынан, термиялық күйіктен, уланудан және химиялық заттардың зиянды әсерінен қорғауға көмектеседі. Ал еліміздегі түрлі статистикалық мәліметтер [1, 2, 3, 4] өндіріс орнында ЖҚҚ қолдануды қадағалайтын жүйелердің ескіруі немесе мүлде болмауының бірден-бір көрсеткіші екенін ескеріп, ал қолданыстағы бақылау жүйелері көп жағдайда қолмен тексеруге, адам факторына тәуелді және реактивті сипатта (яғни, жазатайым оқиғадан кейінгі әрекет) болып келеді.

Жасанды интеллект кеңінен дамып келе жатқан заманда ЖҚҚ қолдануды бақылауға бағытталған инновациялық ғылыми шешімдерді әзірлеу, түрлі өндірістік орталарда қызметкерлердің қауіпсіздік талаптарын орындауын бақылауды қамтамасыз ету арқылы, өндірістік жарақат алу жағдайларын алдын-алуға елеулі үлес қосады. Ұсынылып отырған зерттеудің мақсаты - ұсақ, бір-бірімен қабаттасқан және визуалды күрделі ЖҚҚ нысандарын неғұрлым сенімді әрі тұрақты түрде тани алатын сенімді шешім ұсыну.

Қойылған мақсатқа жету үшін YOLO (You Only Look Once) модельдер отбасына жататын заманауи YOLOv10 және YOLOv11 архитектуралары таңдалды,

2. Отандық және әлемдік ғылыми шешімдерге шолу

Соңғы уақытта ЖҚҚ-ны анықтауға бағытталған YOLO архитектураларына негізделген терең оқыту модельдерінің тиімділігі әртүрлі зерттеулерде дәлелденді. Мысалы, López және әріптестері [5] өндірістік ортадағы ЖҚҚ сәйкестігін бақылауға арналған автоматтандырылған жүйені визуалды позаны бағалау әдісімен толықтыра отырып ұсынған. Ferdous өз жұмысында [6] құрылыс алаңдарында каска, қолғап және қауіпсіздік кеудешесін анықтауға арналған YOLO-ға негізделген арнайы архитектура әзірлеген. Kim мен Xiong [7] нақты биіктіктегі жұмыстарда қолдануға арналған жақсартылған YOLOv8 модельдерін енгізіп, нақты уақыттағы edge құрылғыларға бейімделген шешім ұсынған. Қазақстандық зерттеушілердің еңбектерінде [8] YOLOv8 және YOLOv10 модельдері арнайы дайындалған деректерде салыстырылып, YOLOv11 архитектурасының әлеуеті бағаланған. Сонымен қатар, GBSA-YOLOv8n моделі визуалды күрделі өндірістік ортада ЖҚҚ танудың дәлдігін арттыру мақсатында ұсынылған [9], ал YoloGA [10] алгоритмі эволюциялық есептеу әдістерін қолданып бейімделгіш тану механизмін қамтамасыз еткен. Сондай-ақ, Bento және әріптестері [11] YOLOv8–YOLOv11 модельдерін салыстырып, олардың тиімділігін арнайы таңбалауы бар деректерде (құжаттағы штамптарды тану) бағалаған. Бұл жұмыстар ЖҚҚ-ны тануға арналған заманауи архитектуралардың тәжірибелік маңыздылығын айғақтайды.

ЖҚҚ дәйекті және дұрыс пайдалануды қамтамасыз ету еңбек қауіпсіздігінің негізгі аспектісі болып табылады [12]. Әсіресе құрылыс алаңдары [13], өнеркәсіптік зауыттар [14] және денсаулық сақтау нысандары [15] сияқты қауіпті орталарда. Қолмен тексеруге немесе ретроспективті бейне талдауға негізделген ЖҚҚ сәйкестігін бақылаудың дәстүрлі әдістері көбінесе тиімсіз [16]. Мұндай әдістер адам қателігіне ұшырайды және нақты уақыт режимінде кері байланысты қамтамасыз ете алмайды. Осы мағынада ЖҚҚ қолдануды анықтау мен бағалауды автоматтандырудың перспективті шешімі ретінде компьютерлік көру технологиялары пайда болды [17]. Заманауи тәсілдер арасында YOLO (You Only Look once) нысанды анықтау модельдерінің [18] тобы өзінің жылдамдығы мен дәлдігіне байланысты нақты уақыттағы қолданбалар үшін әсіресе қолайлы.

Chen және т.б. [19] YOLOv7-WFD, жетілдірілген конволюциялық нейрондық желі моделін ұсынды. Бұл модель қауіптілігі жоғары жұмыс орындарында қауіпсіздік каскаларын анықтау үшін арнайы әзірленген. Кәдімгі үлгілерде табылған Precision мәні пен жалпылау шектеулерін қарастыра отырып, YOLOv7-WFD үш инновациялық құрамдас бөлікті біріктіреді: бейімді мүмкіндіктерді шығаруға арналған деформацияланатын Batch-SiLU модулі, мазмұнды

ескеретін іріктеуге арналған CARAFE модулі және төмен сапалы оқыту үлгілерінің әсерін азайту үшін Wise-IoU жоғалту функциясы. Түрлі жарықтандыру және окклюзия жағдайында 5000-нан астам аннотацияланған кескіндерді қамтитын SHEL5K деректер жинағында бағаланған кезде, модель орташа precision мәніне (mAP) 92,6% және нақты уақытта 79,3 кадр/с анықтау жылдамдығына қол жеткізді. Басқа YOLOv7 нұсқаларымен салыстырмалы эксперименттер ЖКҚ-ға қатысты алты санаттың барлығында өнімділіктің дәйекті жақсаруын көрсетті, бұл бетті анықтау дәлдігінің айтарлықтай жоғарылауына әкелді.

Elesaoui және т.б. [20] құрылыс секторындағы ЖКҚ анықтау үшін YOLO негізіндегі архитектуралардың, әсіресе YOLOv5 және YOLOv8 нұсқаларының өнімділігін жан-жақты салыстыруды жүргізді. Алты ЖКҚ класын (адам, кеудеше және төрт каска түсі) қамтитын 1330 нақты суреттен тұратын CHV деректер жинағын пайдалана отырып, зерттеу Precision мәні, Recall, F1, mAP, секундына кадрлар (FPS) және есептеу құнын қоса алғанда, негізгі көрсеткіштер бойынша он бес YOLO үлгісін бағалады. Модельдер арасында YOLOv8m ең жоғары mAP50-95 (92%), Precision мәні (0,92) және F1 ұпайын (0,88) көрсетті, бұл оны Precision мәні пен анықтау жылдамдығы бойынша ең теңдестірілген модельге айналдырды. YOLOv5x6 және YOLOv5l6 да бәсекеге қабілетті өнімділік көрсетті, әсіресе Precision мәні пен recall ерекше. Авторлар YOLOv8 сериясы анықтау дәлдігі мен қорытындының тиімділігі бойынша алдыңғы нұсқалардан асып түскенін, бұл модельдердің құрылыс алаңдарында нақты уақыттағы қауіпсіздікті бақылау үшін өміршеңдігін растайтынын атап өтті.

Өз жұмыстарында Kwon және т.б. [21] бас киім киетін құрылыс жұмысшылары мен кимейтіндерді ажырату тапсырмасына арналған терең нейрондық желінің өнімділігіне оқыту деректерінің сипаттамаларының әсерін зерттейді. Зерттеу терең нейрондық желіні үйрету үшін пайдаланылатын деректер жиынындағы вариациялар немесе сипаттар құрылыс жұмысшыларын қатты қалпақтарды пайдалану негізінде дәл анықтауда оның өнімділігіне қалай әсер ететінін зерттей отырып, оқу деректеріне қатысты сезімталдық талдауын арнайы жүргізеді.

Otgonbold және т.б. [22] өз зерттеулерінде SHD деректер жиынтығының айтарлықтай жақсартылған нұсқасы болып табылатын SHEL5K деректер жинағын ұсынды. Деректер жинағы жақсартылған деректер сапасы мен аннотация мәліметтері арқылы касканы анықтауды жақсарту үшін әзірленген. Деректер жинағы алты класс бойынша 75 000-нан астам мұқият таңбаланған даналары бар 5 000 кескінді қамтиды: каска, бас, каска киген бас, каска киген адам, каска кимеген адам және бет. Бұл деректер жиыны толық емес белгілер және шектеулі класс әртүрлілігі сияқты бар деректер жиынындағы маңызды шектеулерді қарастырады. Авторлар YOLOv3-SPP, YOLOv5(s,m,x), YOLOv4, YOLOR және Inception V2 бар Faster R-CNN қоса алғанда, әртүрлі заманауи нысанды анықтау үлгілерін пайдаланып SHEL5K салыстырды. Олардың ішінде YOLOR моделі Precision мәні (0,9322), recall(0,8066) және F1 ұпайлары (0,8637) арасындағы күшті тепе-теңдікпен ең жоғары mAP (0,8828) қол жеткізді. Салыстырмалы нәтижелер көрсеткендей, SHEL5K-де оқытылған модельдер SHD, NHW және Hardhat сияқты басқа жалпы деректер жинақтарында оқытылғандардан, әсіресе «каскасыз адам» және «бет» сияқты аз ұсынылған класстарды анықтауда жақсы нәтиже көрсетті.

Samma және т.б. [23] визуалды түрде ұқсас объектілердің жіктелу өнімділігін жақсарту үшін контрастты оқытуды қамтитын ЖКҚ анықтауға арналған жақсартылған YOLOv7 архитектурасын ұсынды. Көзілдіріксіз, көзілдіріксіз немесе қолғапсыз және қолғапсыз, әсіресе қиын нақты өмір жағдайында ЖКҚ элементтерін ажыратудағы стандартты нысан детекторларының шектеулерін мойындай отырып, авторлар YOLOv7 құрылымына контрастты жоғалту тармағын енгізді. Бұл түрлендіру желіге ендіру кеңістігінде семантикалық тұрғыдан әр түрлі класстарды жақсырақ бөлуге көмектеседі. Модель 12 ЖКҚ санаттары бар аннотацияланған CHV деректер жиынының кеңейтілген нұсқасында оқытылды және бағаланды және одан әрі жаңа ішкі деректер жиынында (JRCAI) сынақтан өтті. Эксперименттік нәтижелер контраст негізіндегі YOLOv7 моделінің негізгі YOLOv7 үлгісінен және YOLOv8, Faster-RCNN және DAB-DETR сияқты басқа үлгілерден CHV деректер

жинағындағы mAP@0,5 2%-ға және JRCAl деректер жинағында 4%-дан астам жақсаруымен жоғары екенін көрсетті.

Wang т.б. [24] нақты құрылыс орталарында орналастыруға бағытталған әртүрлі YOLO негізіндегі терең оқыту үлгілерін пайдалана отырып, жылдам және дәл ЖҚҚ анықтау бойынша жүйелі зерттеуді ұсынды. Авторлар ЖҚҚ-ға қатысты алты класста (адам, кеудеше және төрт түсті каска), позаны, қашықтықты және жарықтандыруды қоса алғанда, 9200-ден астам аннотацияланған даналары бар 1330 жоғары сапалы кескіндерден тұратын CHV деректер жинағын жасады. Олар YOLOv3, YOLOv4 және YOLOv5 салыстырды. Авторлар әртүрлі жағдайларда өнімділікті бағалады, соның ішінде қабат тереңдігі, кіріс кескінінің ажыратымдылығы, үлгі өлшемі және бұлыңғыр бет кескіндері. YOLOv5x нақты уақыттағы өңдеу жылдамдығын сақтай отырып (GPU-да 19,14 мс/сурет) mAP 86,55% ең өнімді модель болды. Бұған қоса, зерттеу модельдің құпиялылықты сақтайтын бұлыңғыр бет деректеріне беріктігін бірегей түрде бағалады, касканы анықтау mAP50 7% қысқарды, бірақ кеудешеге немесе адам класстарына әсер етпеді. Сыртқы деректер жиынындағы (Pictor-v3, GDUT-HWD) басқа заманауи детекторлармен салыстырмалы бағалау YOLOv5x моделінің тамаша дәлдігі мен бейімделгіштігін растап, оны өнеркәсіптік қондырғыларда нақты уақыттағы қауіпсіздік талаптарын бақылау үшін өте өміршең шешім ретінде орналастырады.

3. Әдіснама мен деректер

3.1. Эксперимент деректері

Өндіріс орнында ЖҚҚ қолдануды автоматты түрде анықтайтын модель [25, 26, 27] әзірлеу үшін, қолданылатын деректер жиынтығы мен қамтылған класстардың күрделілігі мен әртүрлілігі аса маңызды рөл атқарады. Датасет неғұрлым шынайы өндірістік жағдайларды, әртүрлі қорғаныс құралдарын, жұмысшылардың түрлі кейіптерін, объектінің түрлі қашықтықта орналасуын, объекті орналасқан ортадағы визуалды өзгерістерді, яғни түрлі жарықтық деңгейін қамтыса, соғұрлым модель нақты өмірлік жағдайларда сенімді және икемді жұмыс істей алады [28, 29, 30]. Сонымен қатар, ЖҚҚ-ның бірнеше түрін бір мезетте тануға арналған көпклассты құрылым, аннотацияланған объектілер санының (instances) көлемді болуы модельдің практикалық қолдану аясын кеңейтеді. Осылайша, күрделі әрі жан-жақты таңбаланған датасетке негізделген шешімдер өнеркәсіптік қауіпсіздік жүйелерінде тиімді түрде қолдануға бейім болады.

Осы мақсатта, көпклассты құрылымнан тұратын, әртүрлі көріністерді қамтыған, толық аннотацияланған (Сурет 1. а) SH17 заманауи және күрделі бейнелер жиынтығы таңдалды [31].

Мысалы, SH17 деректер жиынтығында каскалар әртүрлі ракурста, қашықтықта және жарық жағдайында бейнелеу факторы модель үшін нақты визуалды күрделілікті тудырады, бірақ сонымен қатар оны шынайы ортаға бейімдеуге көмектеседі. Сурет 1. а -ға келетін болсақ, каска толық, анық көрінеді, түсі, текстурасы, формасы айқын және бетперде, көзілдірік, қолғап сияқты басқа да ЖҚҚ бір кадрда қамтылған. Ал сурет 1. б - суретте жұмысшылар орта қашықтықта тұрғанда түсірілген, каскалар бас формасы мен дене контурынан ерекшеленіп тұр. Түсірілу ракурсы биік болғандықтан касканы жоғарғы жағынан тануға мүмкіндік ашылады. Сурет 1. с - суретіндегі адамдар мен каскалар өте кішкентай, фоны күрделі.

Эксперименттер қолданған SH17 деректер жиынында ЖҚҚ класстары бойынша бейнелер мен аннотацияланған нысандар санының таралуы өте күрделі, яғни кескіндер мен кескіндегі инстанстар санының арасында қандай да бір заңдылықтар жоқ (Кесте - 1). 17 түрлі класс бойынша аннотацияланған, әртүрлі жеке қорғаныс пен адам денесінің бөліктерін қамтитын ашық әрі көпшілікке қолжетімді деректер жиынтығы, сонымен қатар сирек кездесетін қосымша категорияларды да қамтиды.

Датасеттің еркін таралуы және заманауи шынайы көріністерден тұруы, бұл жиынтықты ғылыми зерттеулерде қайталанатын эксперименттер жүргізу және салыстырмалы талдау



Сурет 1 – Жеке қорғаныс құралдарын тануға арналған өндірістік көріністерден құралған күрделі бейнелер жиынтығы. а) ЖҚҚ (каска, бетперде, қолғап) жақын ракурста толық әрі анық көрінген кадр; б) Кішкентай масштабтағы жұмысшылар мен каскалар, күрделі фон жағдайында; с)Орта қашықтықтағы кадр: каска дене контурынан ерекшеленіп, биіктен түсірілген.

Кесте 1 – SH17 деректер ЖҚҚ класстары бойынша бейнелер мен аннотацияланған нысандар санының таралуы)

Class (EN)	Класс (KZ)	Images	Instances
all	Барлығы	1620	15358
Helmet	Каска	1515	2734
Mask	Маска	987	1612
Safety Vest	Қауіпсіздік мешпеті	38	49
Gloves	Қолғаптар	1155	1855
Safety Glasses	Қауіпсіздік көзілдірігі	23	24
Boots	Қауіпсіздік аяқ киімі	75	151
Ear Protection	Құлаққап	64	149
Harness	Қауіпсіздік белбеуі	455	923
Coveralls	Арнайы жұмыс киімі	323	398
Respirator	Респиратор	254	529
Hard Hat	Қатты каска	93	154
Face Shield	Бетқорғағыш	1284	3212
Safety Belt	Қауіпсіздік белдігі	1314	2427
Knee Pads	Тізеқорғағыш	30	43
Reflective Tape	Жарық шағылыстырғыш лента	320	956
Goggles	Қорғаныс көзілдірігі	28	45
Other PPE	Басқа ЖҚҚ	45	97

жасау үшін тиімді етеді де модельдің әлсіз тұстарын айқындап, оның жалпылау қабілетін бағалауға мүмкіндік береді.

3.2. Әдіснама

Осындай күрделі деректер жиынтығының негізінде жасалған модельдер [5, 6, 7, 8, 9, 10] күрделі өндірістік және медициналық ортада қауіпсіздік талаптарының сақталуын автоматты түрде талдау үшін тиімді құрал бола алады.

Модельдің қандай объектілерді жиі кездестіріп үйренетінін және қандай нысандар сирек кездесетінін түсіну үшін ұсынылған бірінші кестеде (кесте 1) 8099 кескіні болғанымен, әр класс

бойынша инстанция (instance) саны берілген. Көп кездесетін класстар модельді тұрақты түрде оқытуға көмектессе, сирек кездесетіндер класстар көмегімен модельдің жалпылау қабілетін тексеруге болады.



Сурет 2 – YOLOv11 архитектурасымен оқыту сызбасы.

Сурет- 2-де YOLOv11 архитектурасы негізінде модельді оқыту процесінің негізгі кезеңдері бірізділікпен көрсетілген. Процестің негізгі қадамдары келесідей:

1-қадам: Кескінді қабылдау

Модель кіріс RGB форматындағы кескінді X қабылдайды. Бұл – үш арналы (қызыл, жасыл, көк) түсті стандартты сурет, яғни R.- әр пиксель үшін 3 түсті мәні бар, Yolo8 -11 YOLOv11 архитектуралары жағдайында, 640x640 өлшемді RGB сурет.

$$X \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3}$$

Мұндағы H – биіктік, W – ен, 3 – RGB арналары.

2-қадам: Ерекшеліктерді шығару (C3K2 блогы)

C3k2 блогы F_{conv} конволюциялық қабаттар арқылы шеттер, бұрыштар мен текстуралар сияқты маңызды белгілерді шығарып, ақпараттың жүктемесін азайта отырып, маңызды белгілерді сақтауға мүмкіндік беретін bottleneck құрылымымен өңдейді. Аталмыш құрылым YOLOv11 сияқты заманауи архитектуралардың негізгі компоненті болып саналады. Бұл модельдің көріністегі маңызды мазмұнды (контур, текстура) ажыратуына мүмкіндік береді.

$$F_{conv} = \text{SiLU}(\text{BN}(W_1 * X + b_1)), \quad \text{SiLU}(x) = x \cdot \sigma(x)$$

Алдымен кескінге белгілі өлшемдегі салмақтар матрицасы W_1 фильтри қолданылады, яғни конволюциялық ядро, одан соң алынған нәтижеге b_1 деп аталатын ығысу мәні (bias) қосылады. Мұнда b_1 – тұрақты шама, ол модельдің икемділігін арттырып, әрбір нейронның шығысын дәл баптауға мүмкіндік береді. Артынша бұл мәндер BN арқылы нормализацияланып, соңында бейсызықтық енгізу үшін SiLU активация функциясы қолданылып, модель өңдеуге қажетті белгілер жиынын қалыптастырады.

3-қадам: Нысандардың өлшемдерін талдау (SPFF модулі)

SPFF модулі суретті бірнеше масштабта талдайды. Модель үлкен (адам), орташа (каска) және ұсақ (көзілдірік) нысандарды тану үшін әртүрлі көлемдегі белгілерді біріктіреді (матрица өлшемдері ұсақ 20×20 , орташа 40×40 және үлкен 80×80).

$$F_{\text{SPFF}} = \text{Concat}(\text{MaxPool}_{20}(F_{conv}), \text{MaxPool}_{40}(F_{conv}), \text{MaxPool}_{80}(F_{conv}))$$

Нысандарды әртүрлі масштабта тану үшін модель бірнеше деңгейдегі белгілерді біріктіреді. Процесс SPFF (Spatial Pyramid Feature Fusion) модулінде іске асырылады. Кіріс белгілері F_{conv} әртүрлі өлшемдегі max pooling операцияларынан өтеді. Әрбір масштаб бойынша алынған белгілер тензорлары біріктіріліп (конкатенация арқылы), нәтижесінде F_{SPFF} — кеңістіктік пирамидадан алынған, байытылған көпдеңгейлі белгілер жиыны пайда болады.

4-қадам: Кеңістіктік назар аудару (C2PSA блогы)

C2PSA блогы – кеңістіктік назар модулі. Бұл кезеңде модель маңызды аймақтарға (мысалы, адамның беті, қолы, ЖКҚ элементтері) назар аударып, маңызсыз фондық ақпаратты елемей, детекцияны нақтылайды.

$$A = \sigma(\text{Conv}_{1 \times 1}(F_{\text{SPFF}}))$$

Берілген формула *SPFF* модулінен шыққан F_{SPFF} белгілерге (feature map) 1×1 ядросы бар конволюциялық қабат қолданылғанын көрсетіп, σ активациясы арқылы әрбір белгінің қаншалықты маңызды екенін анықтайтын маңыздылық картасы A (attention map) алынады.

Ары қарай маңызды белгілер F_{SPFF} бастапқы белгілермен көбейту арқылы күшейтіліп, маңызы аз белгілер әлсіретіледі.

$$F_{\text{att}} = A \odot F_{\text{SPFF}}$$

5-қадам: Нысандарды болжау (Detection Head)

Модельдің нысанды болжау кезеңінде әрбір табылған нысан үшін кескін ішіндегі орны ретінде координаталары мен өлшемдері — яғни x, y, w және биіктігі h анықталады. Екіншіден, осы нысанның шынымен бар-жоғын анықтайтын ықтималдық мәні p_{obj} және нысанның қандай сыныпқа жататыны туралы болжам p_c жасалып, әртүрлі сыныптарға (мысалы, каска, қолғап, көзілдірік) қатысты ықтималдықтар векторы ретінде беріледі. Алынған мәліметтер модельдің шығуында біріктіріліп, нысан туралы толық сипаттама береді.

$$\hat{Y} = \text{DetectionHead}(F_{\text{att}}) = \{(x, y, w, h), p_{\text{obj}}, \vec{p}_c\}$$

6-қадам: Модельдің жалпы шығын функциясы үш негізгі компоненттен тұрады: нысан шекарасының дәлдігін бағалау $\mathcal{L}_{\text{IoU}}$, нысанның бар-жоғын анықтау үшін бинарлық кросс-энтропия $\mathcal{L}_{\text{BCE}}$ және нысанды дұрыс сыныпқа жатқызу үшін көпкласстық энтропия $\mathcal{L}_{\text{CE}}$. Берілген компоненттер төмендегі формула арқылы қосылады:

$$\mathcal{L} = \lambda_{\text{box}} \cdot L_{\text{IoU}}(\hat{B}, B^*) + \lambda_{\text{obj}} \cdot L_{\text{BCE}}(p_{\text{obj}}, p_{\text{obj}}^*) + \lambda_{\text{cls}} \cdot L_{\text{CE}}(\vec{p}_c, \vec{p}_c^*)$$

$\hat{B}, B^*$ — болжанған және нақты шекаралар, ал $p_{\text{obj}}, p_{\text{obj}}^*$ нысанның бар немесе жоқтығының шынайы және ықтималдық мәні.

7-қадам. Модель есептелген шығын $\mathcal{L}$ негізінде өзінің параметрлерін (салмақтарын) жаңартып, градиенттік төмендеу әдісі арқылы жүзеге асады. Қателік желінің соңғы қабатынан бастап бастапқы қабаттарға қарай таратылады, ал әрбір қадамда параметрлер келесі формула бойынша жаңартылады:

$$\theta \leftarrow \theta - \eta \cdot \nabla_{\theta} \mathcal{L}$$

Мұндағы η — оқу жылдамдығы, ал $\nabla_{\theta} \mathcal{L}$ — шығын функциясының градиенті.

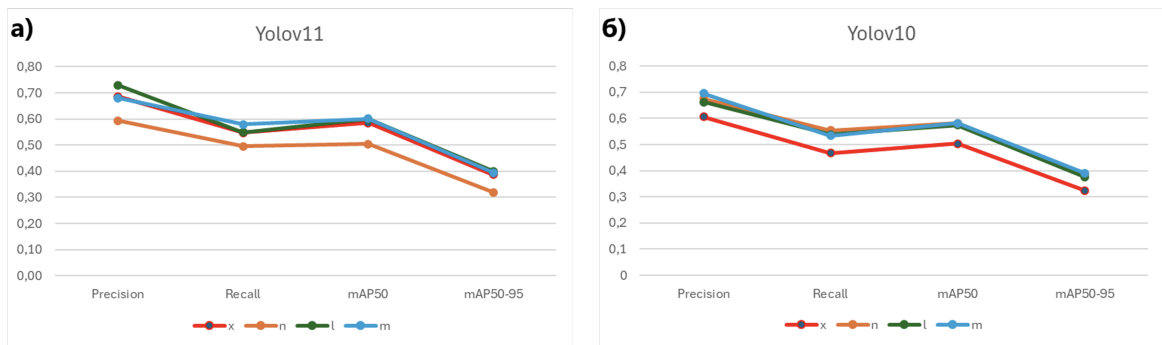
8-қадам: Келесі суретке көшу және қайталау.

Оқу үдерісі келесі кескінмен жалғасады. Мыңдаған кескіннен кейін модель нақты және сенімді тану қабілетіне ие болады.

Зерттеу барысында ұсынылып отырған YOLOv11 архитектурасымен қатар, оның алдындағы YOLOv8 және YOLOv10 модельдері де SH17 деректер жиыны негізінде оқытылып, салыстырмалы бағалау жүргізілді. YOLOv8 моделі — жылдамдық пен жеңілдікке бағытталған бір сатылы (one-stage) детектор, онда деректерді өңдеу жеңілдетілген C2f блогы қолданылса, YOLOv10 архитектурасы SPPCSPC және RepConv одан әрі жетілдірілген және оңтайландырылған модульдерді қолдана отырып, анықтау дәлдігін арттырып, есептеу тиімділігін қамтамасыз етеді. YOLOv10-нұсқалары өнімділік пен жылдамдықтың теңгерімін сақтай отырып, әртүрлі күрделілік деңгейлерінде (n, s, m, l, x) зерттелді.

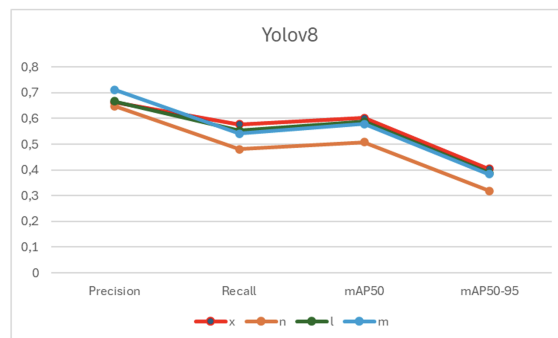
4. Нәтижелер

Осы зерттеуде YOLOv11, YOLOv10 және YOLOv8 архитектуралары нақты өндірістік ортаны имитациялайтын жеке қорғаныс құралдары бейнелерінен құралған деректер жиынында сынау арқылы әр модельдің өнімділігі mAP@50, mAP@50-95, Precision және Recall метрикалары бойынша жалпы 17 класс бойынша орта есебі бағаланды.



Сурет 3 – а) YOLOv11 архитектурасының әртүрлі нұсқалары (n, m, l, x) бойынша Precision, Recall, mAP@50 және mAP@50–95 метрикалары нәтижелері; б) YOLOv10 архитектурасының әртүрлі нұсқалары (n, m, l, x) бойынша Precision, Recall, mAP@50 және mAP@50–95 метрикалары нәтижелері.

YOLOv11 архитектурасы өзінен бұрынғы YOLOv8 және YOLOv10 модельдерімен салыстырғанда барлық негізгі көрсеткіштер бойынша жақсы нәтиже көрсетті. Әсіресе сурет 3. YOLOv11 l және x нұсқалары жоғары Precision мәні және жалпыланған сапа бойынша алда тұр, яғни қорғаныс құралдарын анықтау жүйелерінде қолдану дұрыс шешім болады. YOLOv10 моделінде l және m нұсқалары орташа және жақсы нәтижелерге қол жеткізсе, x нұсқасы кейбір метрикаларда төмен нәтиже көрсетіп, қорғаныс құралдарын анықтау барысында модельдің күрделілігі мен оптимизация арасындағы тепе-теңдіктің сақталмағанын көрсетеді.



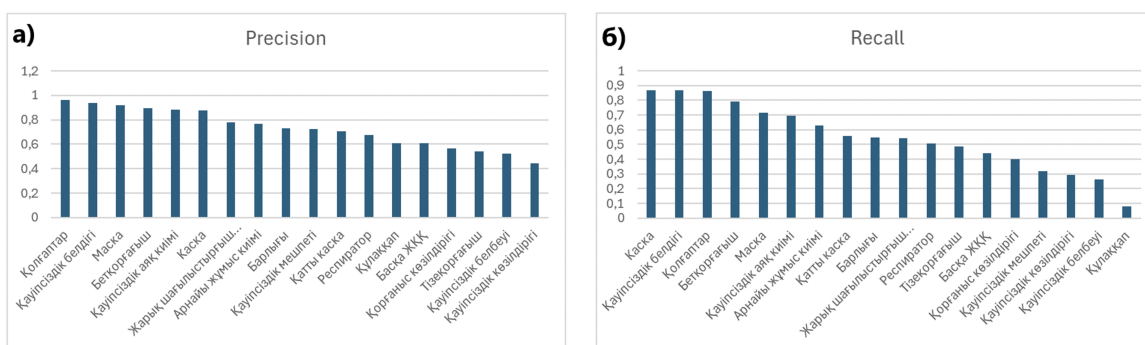
Сурет 4 – YOLOv8 модель нұсқаларының негізгі сапа көрсеткіштері бойынша салыстырмалы нәтижелері.

Сурет 4-те YOLOv8 архитектурасында x нұсқасы барлық көрсеткіштер бойынша тұрақты түрде жақсы нәтиже көрсетуі аталымыш архитектура соңғы версияларына қарамастан әлі де бәсекеге қабілетті модель бола алатынын көрсетеді.

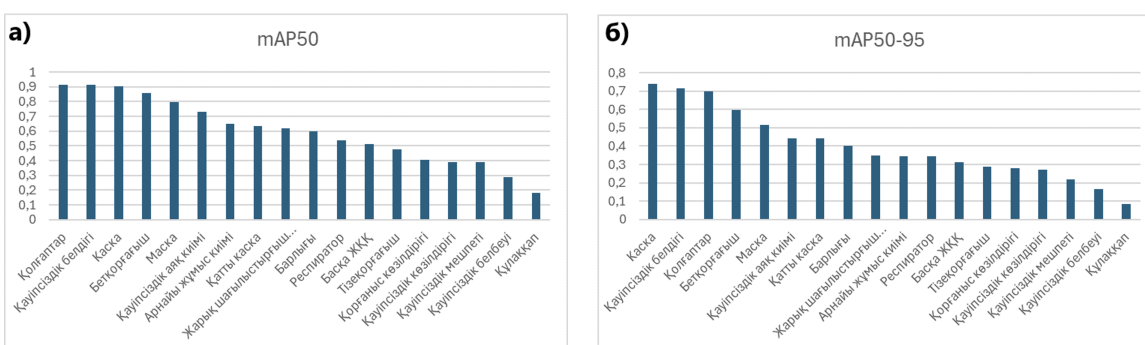
YOLOv11l моделінің ішкі класстар (сурет 5) бойынша нәтижелерін талдау кезінде қолғаптар, каска және қауіпсіздік белдігі сияқты ЖҚҚ түрлерінің жоғары precision мәні, Recall және mAP көрсеткіштеріне ие болғаны анықталды. Класстарда үлгілер саны жеткілікті және визуалды пішіні нақты болғандықтан, модель оларды сенімді тануға қабілетті. Мәселен, қолғаптарда Precision мәні 0.96-дан жоғары, ал каска мен бетқорғағыштарда mAP@50-95 көрсеткіші тиісінше 0.90 және 0.86 шамасында болды.

Керісінше, құлаққап, қауіпсіздік белбеуі және қорғаныс көзілдірігі сияқты класстарда визуалды ерекшеліктердің әлсіздігімен, аннотация санының аздығымен және нысанның кадрда толық көрінбеуімен байланыс көрсеткіштер айтарлықтай төмен. Класстарда Recall және mAP@50-95 мәндері 0.2 - 0.3 аралығында қалып отыр (сурет 6), модельдің оларды дұрыс тану қабілетінің шектеулі екенін көрсетеді.

Ал төмендегі графиктер бойынша YOLOv11l моделі үшін кейбір ЖҚҚ класстарында Precision пен деректер саны (images, instances) арасында белгілі бір байланыс байқалады.

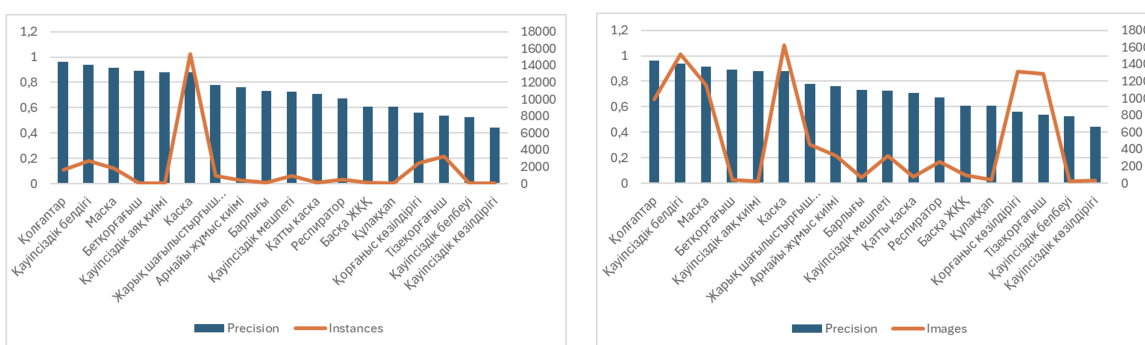


Сурет 5 – а) YOLOv11 моделі бойынша жеке қорғаныс құралдары класстарының Precision мәндері; б) YOLOv11 моделі бойынша жеке қорғаныс құралдары класстарының Recall мәндері.



Сурет 6 – YOLOv11 моделі бойынша жеке қорғаныс құралдары класстарының mAP@50 мәндері; б) YOLOv11 моделі бойынша жеке қорғаныс құралдары класстарының mAP@50–95 мәндері

Мысалы, қолғаптар, маска, қауіпсіздік белдігі сияқты класстарда бейнелер мен инстанстар саны көп және Precision мәні жоғары, модельдің оларды сенімді тануға үйренгенін көрсетеді. Керісінше, құлаққап, белбеу, қауіпсіздік көзілдірігі сияқты аз кездесетін және визуалды күрделі нысандарда Precision мәні те төмен, себебі дерек жеткіліксіз және нысанды анықтау қиын.



Сурет 7 – а) YOLOv11 моделі бойынша әр ЖҚҚ сыныбының дәлдігі (Precision) мен аннотацияланған нысандар саны (Instances) арасындағы өзара байланыс; б) Сурет 10 – YOLOv11 моделі бойынша әр ЖҚҚ сыныбының дәлдігі (Precision) мен кескіндер саны (Images) арасындағы өзара байланыс.

Алайда, қасқа сияқты класста инстанстар саны өте көп болғанымен (15 000-нан астам), Precision мәні басқа класстарға қарағанда төмендеу (≈ 0.71). Мұндай жағдайда модель асқын оқытуға (overfitting) ұшырауы мүмкін — яғни, ол осы классқа шамадан тыс бейімделіп, басқа нысандармен шатастырып тануы ықтимал.

Модельдерге жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижелері YOLOv11 архитектурасының тиімділігін жоғары Precision мәні пен жалпыланған сапа көрсеткіштері бойынша алда тұрып, оны нақты өндірістік жағдайларда ЖҚҚ тануға арналған сенімді шешім ретінде ұсынуға негіз береді. Аталған модельдің жоғары жылдамдықта және нақты уақытта жұмыс істеу қабілетіне келетін болсақ, бір кескінді өңдеуге орта есеппен 9.7 миллисекунд жұмсады, оның ішінде 0.5 мс - алдын ала өңдеу, 5.3 мс - инференс, 3.9 мс - постпроцесс, яғни шамамен 103 кадр/сек (FPS) өнімділік көрсете алды. Сәйкесінше, өндірістік ортада нақты уақыт режимінде қолдануға толық жарамды деп тұжырымдауға болады.

5. Талқылау

Отандық және әлемдік ғылыми шешімдерге шолу барысындағы [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24] жұмыстардың көпшілігі ЖҚҚ тану міндетін шешуде түрлі YOLO нұсқаларының тиімділігін көрсетті, алайда олар негізінен шектеулі класс санын (мысалы, каска, кеудеше, адам) ғана қамтыған. Көптеген зерттеулер CHV [20, 21, 22, 23] немесе SHEL5K [19, 20, 21, 22] сияқты деректер жиындарын пайдалана отырып, нақты бір немесе бірнеше ЖҚҚ түрлеріне (мысалы, каска немесе кеудеше) бағытталған [6], ал толық 17 немесе одан да көп классты қамтитын детекция модельдері сирек кездеседі. Көптеген шешімдер нақты өндірістік ортада кездестірілетін күрделі жағдайлар мен көп объектілі бейнелер үшін шектеулі болып келеді.

Бұл зерттеуде YOLOv10 және YOLOv11 модельдеріне негізделген тәсіл ұсынылып, ол бұрынғы зерттеулермен салыстырғанда 17 ЖҚҚ классын қамтуымен, сондай-ақ ұсақ және визуалды күрделі нысандарды танудағы нәтижелілігімен ерекшеленеді. Алайда бұл шешімнің де өзіндік шектеулері бар, олардың қатарында деректер құрылымы мен визуалды факторларға байланысты тану сапасының әртүрлі болуын атап өту керек.

Шектеулердің болуына бірнеше себеп бар, біріншіден, инстанстар санының аздығы модельдің осы класстар бойынша жеткілікті жалпылау қабілетін қалыптастыруына кедергі келтіреді. Қолғаптар сыныбында 1855 нысан болса, құлаққаптарда небәрі 149 ғана аннотация бар (кесте 1). Екіншіден, объектілердің өлшемі өте кіші және жиі кадр шетінде немесе шолақ көріністе орналасады, үшіншіден, визуалды ұқсастық пен қабаттасу жағдайлары жиі кездеседі. Құлаққаптар каска немесе шашпен бір визуалды фонға сіңісіп кетуі мүмкін, ал қорғаныс көзілдіріктері кейде бетқорғағышпен шатастырылады.

Бұған қоса, шолуда келтірілген жұмыстардың басым бөлігі деректердің теңгерімсіздігі [9, 10, 19], сирек кездесетін класстар (мысалы, құлаққап, тізеқорғағыш, қауіпсіздік белбеуі) немесе визуалды түрде шатастыратын нысандар (мысалы, көзілдірік пен бетқорғағыш) жағдайында модельдің қабілетін жеткілікті терең талдамаған. YOLOv7 [19] немесе YOLOv8 [8, 11, 20] негізіндегі модельдер көбінесе орташа көрсеткіштерге (мысалы, орташа mAP немесе F1) сүйене отырып бағаланып, нақты класстар бойынша әлсіз жақтары немесе модельдің жалпылау қабілеті егжей-тегжейлі қарастырылмаған.

Осы тұрғыдан алғанда, осы жұмыс YOLOv11 архитектурасын ЖҚҚ 17 сыныбы бойынша бағалай отырып, әрбір класстың нақты нәтижелері мен шектеулерін (мысалы, overfitting, деректер тапшылығы немесе визуалды шатастыру) жүйелі түрде талдайды. YOLOv11-дің жетілдірілген құрылымы күрделі ортада нақты қауіпсіздік элементтерін тануда анағұрлым тиімді екеніне көз жеткізу мақсатында YOLOv8 және YOLOv10 модельдерімен салыстыра отырып, дәлелденді. Осылайша, бұл зерттеу ЖҚҚ-ны автоматты анықтау саласындағы деректердің күрделілігі мен архитектуралық ерекшеліктердің модельдің жұмысына әсерін тереңірек ашуға үлес қосады.

6. Қорытынды

Бұл зерттеудің ғылыми жаңалығы YOLOv8, YOLOv10 және YOLOv11 модельдерінің SH17 деректер жиынында алғаш рет салыстырмалы түрде кешенді бағалануы болып табылады. Бұған дейін бұл архитектуралар дәл осы деректер базасында арнайы зерттелмеген және YOLOv11-дің тиімділігі YOLOv8 және YOLOv10 модельдерімен тікелей салыстырылмаған.

Зерттеу аясында әр архитектураның кемінде 4–5 нұсқасы (барлығы 15-ке жуық модель) сыналып, олардың өнімділігі күрделі және теңгерімсіз деректер жағдайында, нақты өндірістік ортаны бейнелейтін ортада бағаланды.

YOLOv11 архитектурасының l (large) нұсқасы визуалды жағынан ұқсас және қабаттасқан 17 түрлі ЖҚҚ класстарын сенімді тануда ерекше тиімділік көрсетті. Бұл модельдің SPFF және C2PSA сияқты құрылымдық ерекшеліктері ұсақ және сирек кездесетін объектілерді анықтау қабілетін арттырып, визуалды шу мен деректер теңгерімсіздігіне төзімділік танытты. YOLOv11-l нұсқасы Precision = 0.858, Recall = 0.874, mAP@50-95 = 0.727 нәтижелерімен тәжірибелік есептің талаптарына толық сай келді. Қолғаптар мен қауіпсіздік белдігі сияқты жиі кездесетін және визуалды тұрғыдан нақты объектілерде Precision көрсеткіші өте жоғары болса, керісінше, инстанстар саны көп болғанымен, каска класында Precision төменірек болып, модельдің асқын оқытуға бейімделуі қауіпін көрсетті.

7. Зерттеу перспективалары

Авторлар жоба аясында қазіргі уақытта отандық деректер жиынтығын әзірлеу жұмыстарын жүргізіп жатыр. Бүгінгі таңда Қазақстанда жеке қорғаныс құралдарын тануға арналған, құрылымы толық әрі сапалы аннотацияланған ашық деректер жиынтығы жоқ. Ол алдағы уақытта отандық мәліметтермен толықтырылып, Қазақстанның өндірістік салаларына бейімделген нақты міндеттерге икемделе алады.

Авторлардың қосқан үлесі:

Нұрзада Амангелді — зерттеу жұмысының идея авторы және жетекшісі; ғылыми міндетті тұжырымдап, модель архитектураларын іріктеу, эксперименттер жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың негізгі мазмұнын жазу, ғылыми жаңалық пен қорытындыларды әзірлеу жұмыстарын атқарды.

Алибек Барлыбаев — әдеби шолуды дайындап, ғылыми көзқарастар мен тәсілдерді талдады, алынған нәтижелерді верификациялау және түсіндіру бойынша жұмыс жүргізді.

Назерке Турсынова — мақала мәтінін журнал талаптарына сай техникалық және тілдік тұрғыдан ресімдеп, құрылымдық үйлесімділікті қамтамасыз етті; кестелер, суреттер және әдебиеттер тізімінің дұрыс рәсімделуіне жауап берді.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Қазақстандағы өндірістік жарақаттану деңгейі 4,5%-ға азайған [Электронды ресурс]. - URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/enbek/press/news/details/924686?lang=ru> (Қаралған күні: 09.06.2025).
- 2 Статистика бойынша медициналық көрсеткіштер – 2022 жыл [Электронды ресурс]. - URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/6411/> (Қаралған күні: 09.06.2025).
- 3 Статистика бойынша медициналық көрсеткіштер – 2023 жыл [Электронды ресурс]. - URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/158509/> (Қаралған күні: 09.06.2025).
- 4 2025 жылдың басынан бері Қазақстанда өндірісте 40 адам қайтыс болған [Электронды ресурс]. - URL: <https://24.kz/ru/news/social/705980-40-pogibshikh-na-proizvodstve-v-kazakhstane-s-nachala-goda> (Қаралған күні: 09.06.2025).
- 5 Barlybayev A., Amangeldy N., Kurmetbek B., Krak I., Razakhova B., Tursynova N., Turebayeva R. Personal protective equipment detection using YOLOv8 architecture on object detection benchmark datasets: a comparative study, Cogent Engineering. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – P. 2333209. – <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2333209>.
- 6 López L., Suárez-Ramírez J., Alemán-Flores M., Monzón N. Automated PPE compliance monitoring in industrial environments using deep learning-based detection and pose estimation, SSRN [Preprint]. – 2024 Nov 28. – <https://doi.org/10.2139/ssrn.5037705>.
- 7 Ferdous M., Ahsan S.M. PPE detector: a YOLO-based architecture to detect personal protective equipment (PPE) for construction sites, PeerJ Comput. Sci. – 2022. – Vol. 8. – Article e999. – <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.999>.
- 8 Kim D., Xiong S. Enhancing worker safety: real-time automated detection of personal protective equipment to prevent falls from heights at construction sites using improved YOLOv8 and edge devices, J. Constr. Eng. Manag. – 2025. – Vol. 151, No. 1. – P. 04024187. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002418).

- 9 Amangeldy N., Barlybayev A., Gazizova N., Kurmetbek B. Evaluation of YOLOv8 and YOLOv10 models in PPE recognition tasks, *J. Electr. Syst.* – 2024. – Vol. 20, No. 10. – P. 8141–8148. – Available from: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/7051>.
- 10 Shi C., Zhu D., Shen J., Zheng Y., Zhou C. GBSG-YOLOv8n: a model for enhanced personal protective equipment detection in industrial environments, *Electronics.* – 2023. – Vol. 12, No. 22. – P. 4628. – <https://doi.org/10.3390/electronics12224628>.
- 11 Majumder A., Chatterjee S. YoloGA: an evolutionary computation based YOLO algorithm to detect personal protective equipment, *J. Intell. Fuzzy Syst.* – 2025 May 15. – [Epub ahead of print].
- 12 Bento J., Paixão T., Alvarez A.B. Performance evaluation of YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10, and YOLOv11 for stamp detection in scanned documents, *Appl. Sci.* – 2025. – Vol. 15, No. 6. – P. 3154. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15063154>.
- 13 Barro-Torres S., Fernández-Caramés T.M., Pérez-Iglesias H.J., Escudero C.J. Real-time personal protective equipment monitoring system, *Comput. Commun.* – 2012. – Vol. 36, No. 1. – P. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.01.005>.
- 14 Nikulin A., Ikonnikov D., Dolzhikov I. Smart personal protective equipment in the coal mining industry, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 852–863.
- 15 Park S.H. Personal protective equipment for healthcare workers during the COVID-19 pandemic, *Infect. Chemother.* – 2020. – Vol. 52, No. 2. – P. 165. DOI: <https://doi.org/10.3947/ic.2020.52.2.165>.
- 16 Wong T.K.M., Man S.S., Chan A.H.S. Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers, *Saf. Sci.* – 2020. – Vol. 126. – Article 104663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104663>.
- 17 Zhang H., Mu C., Ma X., Guo X., Hu C. MEAG-YOLO: A novel approach for the accurate detection of personal protective equipment in substations, *Appl. Sci.* – 2024. – Vol. 14, No. 11. – P. 4766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114766>.
- 18 Ragab M.G., Abdulkader S.J., Muneer A., et al. A comprehensive systematic review of YOLO for medical object detection (2018 to 2023), *IEEE Access.* – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3386826>.
- 19 Chen J., Zhu J., Li Z., Yang X. YOLOv7-WFD: A novel convolutional neural network model for helmet detection in high-risk workplaces, *IEEE Access.* – 2023. – Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3323588>.
- 20 Elesawy A., Abdulkader E.M., Osman H. A detailed comparative analysis of You Only Look Once-based architectures for the detection of personal protective equipment on construction sites, *Eng.* – 2024. – Vol. 5, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng5010019>.
- 21 Kwon Y.H., Park S., Minh Luan T., Oh S., Heo J. Training data sensitivity analysis of deep neural network for differentiating construction laborers with/without safety helmets, *Computing in Civil Engineering 2023*, ASCE. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784485248.062>.
- 22 Otgonbold M.E., Gochoo M., Alnajjar F., et al. SHEL5K: An extended dataset and benchmarking for safety helmet detection, *Sensors.* – 2022. – Vol. 22, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22062315>.
- 23 Samma H., Al-Azani S., Luqman H., Alfarraj M. Contrastive-based YOLOv7 for personal protective equipment detection, *Neural Comput. Appl.* – 2024. – Vol. 36, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09212-6>.
- 24 Wang Z., Wu Y., Yang L., et al. Fast personal protective equipment detection for real construction sites using deep learning approaches, *Sensors.* – 2021. – Vol. 21, No. 10. – Article 3478. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21103478>.
- 25 Nguyen N.T., Tran Q., Dao C.H., et al. Automatic detection of personal protective equipment in construction sites using metaheuristic optimized YOLOv5, *Arab J. Sci. Eng.* – 2024. – Vol. 49, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08700-0>.
- 26 Zhang Q., Pei Z., Guo R., et al. An automated detection approach of protective equipment donning for medical staff under COVID-19 using deep learning, *Comput. Model. Eng. Sci.* – 2022. – Vol. 132, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2022.019085>.
- 27 Alateeq M.M., Fathimathul F.R., Ali M.A.S. Construction site hazards identification using deep learning and computer vision, *Sustainability.* – 2023. – Vol. 15, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032358>.
- 28 Wang Z., Cai Z., Wu Y. An improved YOLOX approach for low-light and small object detection: PPE on tunnel construction sites, *J. Comput. Des. Eng.* – 2023. – Vol. 10, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad042>.
- 29 Ahmad H.M., Rahimi A. SH17: A dataset for human safety and personal protective equipment detection in manufacturing industry, *J. Saf. Sci. Resil.* – 2024. – Vol. 6, No. 2. – P. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.09.002>.
- 30 Nath N.D., Behzadan A.H., Paal S.G. Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment, *Automation in Construction.* – 2020. – Vol. 112. – Article 103085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103085>.
- 31 SH17 dataset for PPE detection [Electronic resource] / Mughees Ahmad. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/mugheesahmad/sh17-dataset-for-ppe-detection>, free. – Accessed: 26.06.2025.

Обнаружение средств индивидуальной защиты с помощью моделей глубокого обучения на основе многоуровневого объединения признаков и пространственного внимания

Н. Амангелді, А.Б.Барлыбаев, Н.А.Турсынова

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Сатпаева, 2, Астана, 010008, Казахстан

Аннотация. В предлагаемой исследовательской работе рассматривается эффективность моделей глубокого обучения для автоматического распознавания средств индивидуальной защиты в сложных условиях, встречающихся на различных промышленных рабочих местах. Поскольку средства индивидуальной защиты предназначены для защиты работников от различных травм и опасных воздействий, мониторинг их использования с применением современных моделей глубокого обучения является важным решением. Учитывая разнообразие этих опасностей, современный, но неисследованный набор данных с многоклассовой структурой, содержащий различные сцены и полностью аннотированный, был обучен на сети глубокого обучения YOLOv11 для оценки их надежности и потенциала в реальных приложениях. Результаты показывают, что архитектурно улучшенные модели могут эффективно работать даже со сложными и несбалансированными данными. Кроме того, в ходе исследования был проведен сравнительный анализ с моделями YOLOv8 и YOLOv10, а также был выполнен анализ для каждого варианта архитектуры. Данное исследование вносит вклад в развитие интеллектуальных систем в области промышленной безопасности и предлагает практическое решение для контроля соблюдения работниками правил безопасности на рабочем месте, тем самым спасая жизни.

Ключевые слова: глубокое обучение, средства индивидуальной защиты, промышленная безопасность, интеллектуальная система, компьютерное зрение.

Multilevel Feature Fusion and Spatial Attention-Based Deep Learning Models for Personal Protective Equipment Detection

N. Amangeldi, A.B. Barlybayev, N.A. Tursynova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Astana, 010008, Kazakhstan

Abstract. The proposed research work examines the effectiveness of deep learning models for the automatic recognition of personal protective equipment (PPE) in complex environments encountered in various industrial workplaces. Since PPE is designed to protect workers from multiple injuries and hazards. Monitoring their use using state-of-the-art deep learning models is an important solution. Given the diversity of these hazards, a state-of-the-art but unexplored multi-class dataset containing diverse scenes and fully annotated was trained on the YOLOv11 deep learning network to evaluate their robustness and potential in real-world applications. The results show that the architecturally improved models can effectively handle complex and imbalanced data. In addition, the study conducted a comparative analysis with YOLOv8 and YOLOv10 models and performed an analysis for each architecture variant. This research contributes to the understanding of the topic by providing new insights and perspectives on the development of intelligent systems in the field of industrial safety, offering a practical solution to monitor workers' compliance with safety rules in the workplace and thereby saving lives.

Keywords: deep learning, personal protective equipment, industrial safety, intelligent system, computer vision.

References

- 1 Kazakhstandayy ondiristik zharakattanu dengei 4.5%-ga azaigan [Kazakhstan's level of occupational injuries has decreased by 4.5%] [Electronic resource]. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/enbek/press/news/details/924686?lang=ru> (Accessed: 09.06.2025).
- 2 Statistika boiynsha meditsinalyk korsetkishter – 2022 zhyl [Medical indicators according to statistics – year 2022] [Electronic resource]. URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/6411/> (Accessed: 09.06.2025).
- 3 Statistika boiynsha meditsinalyk korsetkishter – 2023 zhyl [Medical indicators according to statistics – year 2023] [Electronic resource]. URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/158509/> (Accessed: 09.06.2025).
- 4 2025 zhyl basynan beri Kazakhstanda ondiriste 40 adam kaitys bolgan [Since the beginning of 2025, 40 people have died in industrial accidents in Kazakhstan] [Electronic resource]. URL: <https://24.kz/ru/news/social/705980-40-pogibshikh-na-proizvodstve-v-kazakhstane-s-nachala-goda> (Accessed: 09.06.2025).
- 5 Barlybayev A., Amangeldy N., Kurmetbek B., Krak I., Razakhova B., Tursynova N., Turebayeva R. Personal protective equipment detection using YOLOv8 architecture on object detection benchmark datasets: a comparative study, *Cogent Engineering*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 2333209. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2333209>.
- 6 López L., Suárez-Ramírez J., Alemán-Flores M., Monzón N. Automated PPE compliance monitoring in industrial environments using deep learning-based detection and pose estimation, *SSRN [Preprint]*. 2024 Nov 28. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5037705>.
- 7 Ferdous M., Ahsan S.M. PPE detector: a YOLO-based architecture to detect personal protective equipment (PPE) for construction sites, *PeerJ Comput. Sci.* 2022. Vol. 8. Article e999. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.999>.
- 8 Kim D., Xiong S. Enhancing worker safety: real-time automated detection of personal protective equipment to prevent falls from heights at construction sites using improved YOLOv8 and edge devices, *J. Constr. Eng. Manag.* 2025. Vol. 151, No. 1. P. 04024187. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002418).
- 9 Amangeldy N., Barlybayev A., Gazizova N., Kurmetbek B. Evaluation of YOLOv8 and YOLOv10 models in PPE recognition tasks, *J. Electr. Syst.* 2024. Vol. 20, No. 10. P. 8141–8148. URL: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/7051>.
- 10 Shi C., Zhu D., Shen J., Zheng Y., Zhou C. GBSG-YOLOv8n: a model for enhanced personal protective equipment detection in industrial environments, *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 22. P. 4628. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12224628>.
- 11 Majumder A., Chatterjee S. YoloGA: an evolutionary computation based YOLO algorithm to detect personal protective equipment, *J. Intell. Fuzzy Syst.* 2025 May 15. [Epub ahead of print].
- 12 Bento J., Paixão T., Alvarez A.B. Performance evaluation of YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10, and YOLOv11 for stamp detection in scanned documents, *Appl. Sci.* 2025. Vol. 15, No. 6. P. 3154. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15063154>.
- 13 Barro-Torres S., Fernández-Caramés T.M., Pérez-Iglesias H.J., Escudero C.J. Real-time personal protective equipment monitoring system, *Comput. Commun.* 2012. Vol. 36, No. 1. P. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.01.005>.
- 14 Nikulin A., Ikonnikov D., Dolzhikov I. Smart personal protective equipment in the coal mining industry, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2019. Vol. 10, No. 4. P. 852–863.
- 15 Park S.H. Personal protective equipment for healthcare workers during the COVID-19 pandemic, *Infect. Chemother.* 2020. Vol. 52, No. 2. P. 165. DOI: <https://doi.org/10.3947/ic.2020.52.2.165>.
- 16 Wong T.K.M., Man S.S., Chan A.H.S. Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers, *Saf. Sci.* 2020. Vol. 126. Article 104663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104663>.
- 17 Zhang H., Mu C., Ma X., Guo X., Hu C. MEAG-YOLO: A novel approach for the accurate detection of personal protective equipment in substations, *Appl. Sci.* 2024. Vol. 14, No. 11. P. 4766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114766>.
- 18 Ragab M.G., Abdulkader S.J., Muneer A., et al. A comprehensive systematic review of YOLO for medical object detection (2018 to 2023), *IEEE Access*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3386826>.
- 19 Chen J., Zhu J., Li Z., Yang X. YOLOv7-WFD: A novel convolutional neural network model for helmet detection in high-risk workplaces, *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3323588>.
- 20 Elesawy A., Abdelkader E.M., Osman H. A detailed comparative analysis of You Only Look Once-based architectures for the detection of personal protective equipment on construction sites, *Eng.* 2024. Vol. 5, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng5010019>.
- 21 Kwon Y.H., Park S., Minh Luan T., Oh S., Heo J. Training data sensitivity analysis of deep neural network for differentiating construction laborers with/without safety helmets, *Computing in Civil Engineering 2023, ASCE*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784485248.062>.
- 22 Otgonbold M.E., Gochoo M., Alnajjar F., et al. SHEL5K: An extended dataset and benchmarking for safety helmet detection, *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22062315>.

- 23 Samma H., Al-Azani S., Luqman H., Alfarraj M. Contrastive-based YOLOv7 for personal protective equipment detection, Neural Comput. Appl. 2024. Vol. 36, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09212-6>.
- 24 Wang Z., Wu Y., Yang L., et al. Fast personal protective equipment detection for real construction sites using deep learning approaches, Sensors. 2021. Vol. 21, No. 10. Article 3478. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21103478>.
- 25 Nguyen N.T., Tran Q., Dao C.H., et al. Automatic detection of personal protective equipment in construction sites using metaheuristic optimized YOLOv5, Arab J. Sci. Eng. 2024. Vol. 49, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08700-0>.
- 26 Zhang Q., Pei Z., Guo R., et al. An automated detection approach of protective equipment donning for medical staff under COVID-19 using deep learning, Comput. Model. Eng. Sci. 2022. Vol. 132, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmesci.2022.019085>.
- 27 Alateeq M.M., Fathimathul F.R., Ali M.A.S. Construction site hazards identification using deep learning and computer vision, Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032358>.
- 28 Wang Z., Cai Z., Wu Y. An improved YOLOX approach for low-light and small object detection: PPE on tunnel construction sites, J. Comput. Des. Eng. 2023. Vol. 10, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad042>.
- 29 Ahmad H.M., Rahimi A. SH17: A dataset for human safety and personal protective equipment detection in manufacturing industry, J. Saf. Sci. Resil. 2024. Vol. 6, No. 2. P. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.09.002>.
- 30 Nath N.D., Behzadan A.H., Paal S.G. Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment, Automation in Construction. 2020. Vol. 112. Article 103085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103085>.
- 31 SH17 dataset for PPE detection [Electronic resource] / Mughees Ahmad. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/mugheesahmad/sh17-dataset-for-ppe-detection>, free. Accessed: 26.06.2025.

Авторлар туралы мәлімет:

Амангелді Нұрзада – байланыс үшін автор, PhD докторы, жасанды интеллект технологиялары кафедрасының зерттеушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев, 2, Астана, 010008, Қазақстан.

Барлыбаев Аликбек Бактыбаевич – PhD докторы, жасанды интеллект технологиялары кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев, 2, Астана, 010008, Қазақстан.

Турсынова Назира Абдизаппаровна – «8D06112- Жасанды интеллект» БББ докторанты, жасанды интеллект технологиялары кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев, 2, Астана, 010008, Қазақстан.

Nurzada Amangeldy – Corresponding author, PhD, Researcher, Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev Str. 2, Astana, 010008, Kazakhstan.

Alibek Baktybayevich Barlybayev – Corresponding author, PhD, Researcher, Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev Str. 2, Astana, 010008, Kazakhstan.

Nazira Abdizhapparovna Tursynova – Corresponding author, PhD student in the educational program "8D06112 – Artificial Intelligence", Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev Str. 2, Astana, 010008, Kazakhstan.

Қабылданған күні: 09.06.2025. Өңдеуден кейін: 26.06.2025.

Мақұлданған күні: 27.06.2025. Онлайн қолжетімді: 30.06.2025.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).