УДК 691.3

Абдималик Н.М.

2 курс магистранты

«Өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиясы» кафедрасы

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

(Астана, Қазақстан)

Ғылыми кеңесші:

Шашпан Ж.А.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

(Астана, Қазақстан)

АЯЗҒА ТӨЗІМДІ БЕТОН: ДӘСТҮРЛІ ҚҰРАМНАН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖОБАЛАУҒА ДЕЙІН

Аңдатпа: *мақалада аязға төзімді бетонды жобалаудың негізі ретінде бетонның цемент, су және толтырғыштардан тұратын дәстүрлі қоспадан қасиеттері алдын ала жобаланатын көпкомпонентті жүйеге айналу эволюциясы қарастырылған. Негізгі компоненттердің қызметі және қосымша цементтеуші материалдардың (ұшпа күл, шлак, микрокремнезем) портландцемент үлесі мен көміртек ізін азайтудағы рөлі сипатталған. Наномодификаторлардың беріктікке әсері, аязға төзімділіктің физикалық негіздері және аязға төзімділік маркаларының жіктелуі, бетон қоспасын вакуумдау технологиясы және өздігінен қалпына келетін бетондар қарастырылған. Бетон құрамын іріктеуде машиналық оқыту әдістері мен SHAP-талдаудың мүмкіндіктері көрсетілген.*

Түйін сөздер: *бетон, аязға төзімділік, қосымша цементтеуші материалдар, ұшпа күл, наномодификаторлар, вакуумдау, машиналық оқыту.*

Кіріспе.

Ондаған жылдар бойы бетон цемент, су және толтырғыштардан тұратын қарапайым қоспа ретінде қабылданып келді. Бүгінде жағдай өзгерді: бетон қасиеттері алдын ала – байланыстырғыштың құрамынан бастап кеуек құрылымына дейін – жобаланатын көпкомпонентті жүйеге айналды. Қазіргі материалтану көпфакторлы оңтайландыру қағидатына сүйенеді: материал құрылымын микро- және нанодеңгейде басқара отырып, жоғары беріктікке, ұзақ мерзімділікке және экологиялық қауіпсіздікке бір мезгілде қол жеткізуге болады.

Саланың басымдықтары да өзгерді. Бұрын бетонға қойылатын басты талаптар беріктік пен арзандық болса, бүгінде оларға мыналар қосылды:

– *көміртек ізі:* цемент өндірісіндегі CO_2 шығарындыларын азайту,

– *наномодификация:* кристалдану үдерістері мен цемент тасының кеуек құрылымын басқару,

– *қатаю жылдамдығы:* сапаны төмендетпей жобалық сипаттамаларға қысқа мерзімде жету,

– *ұзақ мерзімділік:* агрессивті ортада және циклдік мұздату жағдайында ғимараттардың қызмет мерзімін ұзарту.

Тақырыптың өзектілігі саланың ауқымымен анықталады. Бетон – ең жаппай қолданылатын құрылыс материалы, ал цемент өндірісі қолда бар бағалаулар бойынша әлемдік CO_2 шығарындыларының шамамен 8%-ын береді [6, 9]. Сондықтан цемент шығынын аздап азайтудың немесе конструкциялардың қызмет мерзімін ұзартудың өзі айтарлықтай экологиялық және экономикалық нәтиже береді.

Мақаланың мақсаты – бетон құрамын жобалаудың қазіргі тәсілдерін жинақтау: байланыстырғыш пен минералды қоспаларды таңдаудан бастап наномодификацияға, тығыздаудың технологиялық тәсілдеріне және рецептураны іріктеудің цифрлық әдістеріне дейін. Мақала аязға төзімді бетон құрамын әзірлеу бойынша магистрлік зерттеудің теориялық негізін құрайды.

Құрамның іргетасы: байланыстырғыш және толтырғыштар.

Негізгі байланыстырғыш бұрынғыдай портландцемент (ОРС) болып қала береді, алайда оны өндіруге жұмсалатын энергия шығынының жоғары болуына байланысты оны пайдалану тәсілі қайта қаралуда. Сонымен қатар толтырғыштардың рөлі де өзгерді: олар енді пассивті балласт емес, бетонның қатаң кеңістіктік қаңқасын түзеді [4, 11]. Негізгі компоненттердің қызметі және соларға байланысты қазіргі міндеттер 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Бетонның негізгі компоненттері: қызметі мен сын-қатерлері.

Компонент	Құрылымдағы рөлі	Қазіргі сын-қатер
Портландцемент (ОРС)	Белсенді байланыстырғыш, гидратация кезінде цемент тасын түзеді	CO_2 шығарындысының жоғары болуы және едәуір көміртек ізі
Ірі толтырғыш (қиыршық тас)	Күштік қаңқа, шөгу мен жарықшақ түзілуіне кедергі келтіреді	Қуыстар көлемін азайту үшін түйіршіктік құрамды оңтайландыру
Ұсақ толтырғыш (құм)	Қиыршық тас түйіршіктері арасындағы қуыстарды толтырады, қоспаның реологиясын жақсартады	Сапалы табиғи ресурстардың сарқылуы, балама іздеу
Су	Гидратацияға арналған реагент	«Су парадоксы»: артық су тығыздық пен аязға төзімділікті төмендетеді

Суға ерекше назар аудару қажет. Ол гидратация үшін қажет, бірақ артық мөлшерде зиянды: артық су уақыт өте буланып, бетонның тығыздығы мен аязға төзімділігін төмендететін капиллярлық кеуектер қалдырады [10]. Бұл «су парадоксы» екі жолмен шешіледі – қоспаның жылжымалылығын жоғалтпай су

мөлшерін азайтуға мүмкіндік беретін пластификаторларды қолдану арқылы және төменде қарастырылатын тығыздаудың технологиялық тәсілдері арқылы.

Тағы бір бағыт – қосымша цементтеуші материалдар (SCM, Supplementary Cementitious Materials) есебінен портландцемент үлесін азайту.

SCM төңкерісі: күл, шлак және микрокремнезем.

Қазіргі бетонды әр компонент құрылымның өз деңгейіне жауап беретін көпдеңгейлі жүйе ретінде көрсетуге болады (1-сурет).



1-сурет. Қазіргі бетонның көпдеңгейлі құрылымы.

Бетон қоспасына қайталама материалдарды енгізу экологиялық жүктемені азайтады және пуццоландық реакцияны іске қосады [8]. Оның мәні мынада: қоспаның белсенді кремнеземі цемент гидратациясы кезінде бөлінетін және беріктікке өздігінен аз әсер ететін кальций гидроксидін қосымша кальций гидросиликаттарына байланыстырады. Нәтижесінде кеуектілік төмендеп, цемент тасы тығызырақ әрі химиялық тұрғыдан төзімдірек болады. SCM-нің негізгі түрлері:

1. Ұшпа күл қоспаның төселгіштігін және кейінгі жастағы беріктікті арттырады. Оның сфералық бөлшектері микроподшипник сияқты жұмыс істеп, қоспаның жылжымалылығын жақсартады, ал уақыт өте келе құрылымды тығыздайды [4, 8].

2. Домна шлағы химиялық төзімділік пен қызмет мерзімін арттырады. Металлургияның бұл жанама өнімі сульфаттық коррозияға қарсылықты және арматураның қорғалуын жақсартады.

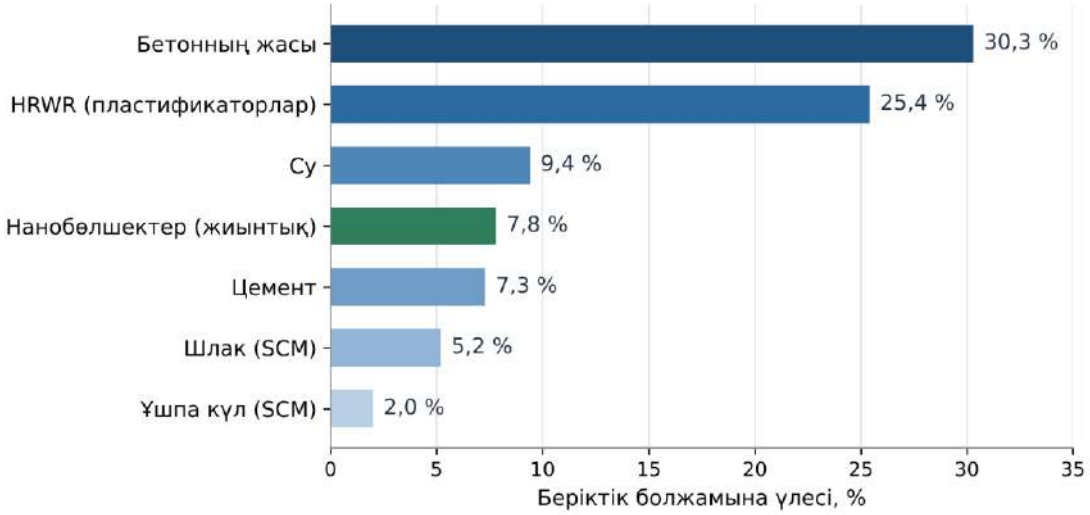
3. Микрокремнезем (silica fume) матрицаны күрт тығыздайды. Жоғары дисперстілігінің арқасында ол цемент түйіршіктері арасындағы қуыстарды толтырып, аса тығыз құрылым түзеді.

Сонымен бірге минералды қоспалар, әдетте, ерте жастағы беріктік жиналуын баяулататынын ескеру қажет. Сондықтан олардың мөлшерін қалыптан шығару мерзімі мен қатаю жағдайларын ескере отырып іріктейді.

Нанотехнологиялар: 7,8%-дық жасырын үлес.

Микродеңгейден нанодеңгейге көшу соңғы онжылдықтың басты жетістіктерінің бірі болды. Нанобөлшектер (nano-SiO_2, nano-TiO_2) цемент тасының түзілу үдерістерін айтарлықтай өзгертеді. Мысалы, nano-TiO_2 кристалдану орталығы қызметін атқарып, гидратацияның бастапқы сатысын жеделдетеді. Компоненттердің синергиясы ерекше маңызды: көміртекті нанотүтікшелер ұшпа күлі бар құрамдардың ерте жастағы төмен беріктігін өтеп, құрылымды нанодеңгейде «тігеді». Кеуектер өлшемінің кішіреюі бетонның ұзақ мерзімділігін, әсіресе циклдік мұздату кезінде, тікелей арттырады.

Әр компоненттің үлесін сандық тұрғыдан машиналық оқыту модельдерінің SHAP-талдауы арқылы бағалауға болады. Осындай талдау деректері бойынша [8] нанобөлшектердің беріктік болжамына үлесі шамамен 7,8%-ды құрайды – бұл цементтің өз үлесінен де жоғары (2-сурет).



2-сурет. SHAP-талдау: компоненттердің бетон беріктігіне әсері.

2-суреттен көрініп тұрғандай, беріктікке ең көп әсер ететін факторлар – бетонның жасы (30,3%) және пластификаторлар (25,4%), үшінші орында – су (9,4%). Бұл құрамды жобалау кезінде су мөлшері мен қатаю жағдайларын басқару басты тетік болып қала беретінін, ал наномодификаторлар мен минералды қоспалар нәзік баптау құралы екенін растайды.

Аязға төзімділіктің физикасы мен химиясы (F маркасы).

Аязға төзімділік – мәні жағынан мұздаған судың ұлғаюымен күрес. Мұзға айналғанда капиллярлық кеуектердегі су көлемі шамамен 9%-ға ұлғайып, айтарлықтай кристалдану қысымын тудырады. Егер кеуек құрылымы оңтайландырылмаса, бетонда микрожарықшақтар пайда болып, әр мұздату–еріту циклінде ұлғая береді [10].

Қазіргі ауа тартатын қоспалар мен гидрофобизаторлар бетонда «резервтік» кеуектер жүйесін – мұздату кезінде су ығыстырылатын ұсақ тұйық ауа көпіршіктерін түзеді. Бұл кеуектер демпфер қызметін атқарып, мұздың қысымын азайтады [10, 12]. Аязға төзімділікке сынау әдістері ГОСТ 10060 стандартымен белгіленген [1], ал бетонның аязға төзімділік маркалары бойынша жіктелуі мен олардың қолданылу салалары 2-кестеде келтірілген [1, 2].

2-кесте. Бетонның аязға төзімділік маркалары бойынша жіктелуі.

Марка	Аязға төзімділік	Қолданылу саласы
F25 – F50	Төмен	Ішкі конструкциялар, дайындық қабаттары
F50 – F150	Орташа	Қоңыржай ендіктердегі азаматтық құрылыс
F150 – F300	Жоғары	Іргетастар, жол плиталары, солтүстік өңірлер
F300 – F1000	Экстремалды	Көпір тіректері, гидротехника, арктикалық нысандар

Аязға төзімділік бір мезгілде көптеген факторларға – су-цемент қатынасына, тартылған ауа көлеміне, қоспалар түріне – тәуелді болғандықтан, оны болжау үшін машиналық оқыту әдістері жиі қолданылуда. Олар ұзақ циклдік сынақтарсыз-ақ бетон маркасын қоспа құрамы бойынша бағалауға мүмкіндік береді [5, 7, 12].

Технологиялық серпіліс: вакуумдау және «су парадоксы».

Толық гидратация үшін цементке өз массасының шамамен 20–25%-ы ғана су қажет, қалған су тек қоспаның жылжымалылығы үшін керек және буланғаннан кейін кеуектер қалдырады. Вакуумдау әдісі бұл қайшылықты физикалық тұрғыдан шешеді: артық су бетон төселгеннен кейін шығарылады. Вакуумдау 10–15 см тереңдікке дейін тиімді және су-цемент қатынасын (С/Ц) 15–25%-ға төмендетуге мүмкіндік береді. Үдеріс үш кезеңнен тұрады (3-сурет):

1. Төсеу және вибрациялау: қоспаны алғашқы тарату және тығыздау.

2. Герметикалау және суды сору: сүзгі төсеніштері мен вакуум-сорап көмегімен бос судың 20–30%-ы шығарылады.

3. Тегістеу және жылтырату: тығыздалған қабатты соңғы өңдеу.



3-сурет. Бетон қоспасын вакуумдау кезеңдері.

Нәтижесінде вакуумдалған бетон 7 тәулікте-ақ жобалық беріктіктің шамамен 70%-ын жинайды (дәстүрлі бетонда – 50%), ал оның аязға төзімділігі F200–F400 маркаларына дейін артады. Бұл әдісті едендер, жол және аэродром жабындарын салуда ерекше сұранысқа ие етеді.

Өздігінен қалпына келетін бетон.

Тағы бір перспективалы бағыт – микрожарықшақтарды өздігінен «емдей» алатын бетондар [3]. Ол үшін қоспаға кристалданатын қоспалар, полимерлік құрамы бар микрокапсулалар немесе бактерия споралары енгізіледі. Жарықшаққа су түскенде қоспа белсендіріліп, оны реакция өнімдерімен, мысалы, кальций карбонатымен толтырады. Мұндай шешімдер жөндеуге қол жеткізу қиын конструкциялар үшін – жерасты ғимараттары, резервуарлар, көпір тіректері үшін – әсіресе пайдалы.

Болашақ: жасанды интеллект және «ақылды» қоспалар.

Рецептураға 12-ден астам айнымалы (SCM, нанобөлшектер, пластификаторлар) қатысқанда, олардың өзара әсерін қолмен есептеу мүмкін болмай қалады. Мұнда машиналық оқыту әдістері көмекке келеді.

Сапору платформасы. Бұл XGBoost алгоритміне негізделген ашық құрал (GitHub-та қолжетімді). Huang және бірлескен авторлардың зерттеуінде

беріктікті болжау дәлдігі детерминация коэффициенті бойынша $R^2 = 0,974$-ке жетті. Модельдің «қара жәшігін» түсіндіру үшін әр компоненттің нәтижеге үлесін көрсететін SHAP (Shapley Additive exPlanations) әдісі қолданылады [8, 11].

Meta және Amrize кейсі. Роузмаунт қаласында (Миннесота штаты, АҚШ) дата-орталық салу кезінде байес оңтайландыруына негізделген ЖИ көміртек ізі төмен әрі тез қатаятын жабын плиталарына арналған бетон құрамын іріктеуге көмектесті [9].

Машиналық оқыту әдістері сондай-ақ жоғары берік бетон құрамын оңтайландыру [4] және агрессивті ортада жұмыс істейтін ауыр бетонның беріктігін болжау [13] үшін де қолданылады. Біртіндеп «бетон қызмет ретінде» тұжырымдамасы қалыптасуда: алгоритм бірнеше секундта климатқа, логистикаға және нақты нысанның міндеттеріне бейімделген рецептура ұсынады.

Қорытынды.

Қазіргі бетон – қасиеттері нанодеңгейден бастап қалыптасатын композит. Қарастырылған дереккөздерді талдау мынадай қорытындылар жасауға мүмкіндік береді:

1. Аязға төзімділік ең алдымен кеуек құрылымымен анықталады, ауа тарту мен вакуумдау F200–F400 және одан жоғары маркаларға жетуге мүмкіндік береді.

2. Қосымша цементтеуші материалдар (ұшпа күл, шлак, микрокремнезем) портландцемент шығыны мен көміртек ізін азайтып, пуццоландық реакция есебінен құрылымды тығыздайды.

3. Наномодификаторлар беріктікке едәуір үлес қосады, алайда басты факторлар бетонның жасы, пластификаторлар және су мөлшері болып қала береді.

4. Машиналық оқыту әдістері бүгіннің өзінде беріктікті жоғары дәлдікпен ($R^2 \approx 0,97$) болжауды қамтамасыз етіп, құрамды іріктеудің жұмыс құралына айналуда.

Жаңа буын инженерлері үшін дайын пропорцияларды білу емес, компоненттердің өзара әрекеттесуінің физикалық-химиялық үдерістерін түсіну басты мәнге ие болады. SCM, наномодификаторлар және цифрлық оңтайландыру әдістерін біріктіру тезірек, экологиялық таза әрі сенімдірек салуға мүмкіндік беріп, дәстүрлі «сұр тасты» тұрақты дамудың негізіне айналдырады.

ӘДЕБИЕТТЕР:

1. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. М.: Стандартинформ, 2014
2. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016
3. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // Вестник ПНИПУ. 2020
4. Chen B. et al. Optimization of high-performance concrete mix ratio design using machine learning // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023 https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106047
5. Chen H. et al. Enhancing the durability of concrete in severely cold regions: mix proportion optimization based on machine learning // Construction and Building Materials. 2023 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130644
6. Dam S. AI reveals the perfect low-carbon concrete recipe [Электронный ресурс] // AZoBuild. 2025
7. Dong X. et al. Frost resistance prediction of concrete based on dynamic multi-stage optimisation algorithm // Algorithms. 2025 https://doi.org/10.3390/a18070441
8. Huang D. et al. Optimizing concrete strength: how nanomaterials and AI redefine mix design // Case Studies in Construction Materials. 2025 https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04838
9. Kusuma J. et al. Using AI to make lower-carbon, faster-curing concrete [Электронный ресурс] // Engineering at Meta. 2025

10. Neville A.M. Properties of concrete. 5th ed. Harlow: Pearson Education, 2011. 846 p.

11. Sobuz et al. AI-driven modeling for the optimization of concrete strength for low-cost business production in the USA construction industry [Электронный ресурс] // ResearchGate. 2025 https://doi.org/10.48084/etasr.9733

12. Zhang J. et al. Intelligent prediction of the frost resistance of high-performance concrete: a machine learning method // Journal of Civil Engineering and Management. 2023 https://doi.org/10.3846/jcem.2023.19226

13. Zubarev K.P. et al. Predicting the strength of heavy concrete exposed to aggressive environmental influences by machine learning methods // Buildings. 2025 https://doi.org/10.3390/buildings15213998