

https://doi.org/10.51885/3134-8041_IACS_2026_1_9

XFTAP 67.09.33; 67.09.29

ӨЗДІГІНЕН ТЫҒЫЗДАЛАТЫН БЕТОН ҚҰРАМЫНДАҒЫ МИКРОКРЕМНЕЗЕМНІҢ ШӨГУ, БЕРІКТІК ЖӘНЕ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА В СОСТАВЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА НА УСАДКУ, ПРОЧНОСТЬ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

EFFECT OF MICROSILICA IN SELF COMPACTING CONCRETE ON SHRINKAGE, STRENGTH, AND RHEOLOGICAL PROPERTIES

А.Т. Оспанова ¹, Д.А. Ахметов ¹, А.А. Сартбаев ^{1*},

Б.О. Ускембаева ¹, Д.Е. Чуканов ¹

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

*Жауапты автор: Сартбаев Асхат Амандыкович, sartbayev03@gmail.com

Түйінді сөздер:

Өздігінен тығыздалатын бетон, микрокремнезем, шөгу, беріктік, пуццоландық белсенділік, реология.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста микрокремнеземнің (МК) өздігінен тығыздалатын бетонның (ӨТБ) шөгу, беріктік және реологиялық қасиеттеріне әсері зерттелген. МК мөлшері цемент массасының 5 %, 10 % және 15 % көлемінде қолданылған. Эксперименттік зерттеулер отандық және еуропалық стандарттарға сәйкес жүргізілді және бетонның ерте және кейінгі қату кезеңдеріндегі қасиеттерінің өзгеріс заңдылықтарын анықтауға бағытталған. Зерттеу нәтижесінде микрокремнеземнің жоғары пуццоландық белсенділігі цемент тасын тез гидратациялауға және тығыз микроструктура қалыптастыруға ықпал ететіні анықталды. Бұл капиллярлы кеуектіліктің төмендеуіне және бетон беріктігінің 19 %-ға дейін артуына алып келеді. Сонымен қатар, бақылау қоспасымен салыстырғанда шөгу деформациялары 27 %-ға дейін төмендегені байқалды. Сонымен бірге микрокремнеземнің бетон қоспаларының реологиялық қасиеттеріне әсері зерттелді, бұл олардың ерте кезеңдегі орнықтылығы мен ыңғайлы төселуін болжау үшін маңызды. Зерттеу нәтижелері Алматы қаласының климаттық жағдайларын ескере отырып, ұзақмерзімді темірбетон конструкцияларын жобалау және қолдану үшін практикалық маңызға ие.

Ключевые слова:

Самоуплотняющийся бетон, микрокремнезем, усадка, прочность,

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе рассмотрены особенности усадочных и прочностных, реологических характеристик самоуплотняющегося бетона (СУБ) с добавлением микрокремнезема (МК) в количестве



© 2026 А.Т. Оспанова, Д.А. Ахметов, А.А. Сартбаев, Б.О. Ускембаева, Д.Е. Чуканов
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

пуццолановая
активность, реология.

5 %, 10 % и 15 % от массы цемента. Проведён комплекс экспериментальных исследований в соответствии с отечественными и европейскими стандартами, направленных на оценку влияния МК на поведение бетона в ранние и поздние сроки твердения. Выявлено, что применение микрокремнезема способствует формированию более плотной структуры цементного камня за счёт интенсивных пуццолановых реакций, приводящих к ускоренной гидратации и снижению капиллярной пористости. В результате этого наблюдается значительное повышение прочности (до 19 %) и уменьшение усадки (до 27 %) по сравнению с контрольной смесью. Проведена оценка влияния МК на реологические характеристики смесей, что позволяет прогнозировать удобоукладываемость и поведение СУБ в ранние сроки. Полученные результаты представляют интерес для проектирования долговечных железобетонных конструкций, особенно в климатических условиях города Алматы.

Keywords:

self-compacting concrete,
microsilica, shrinkage,
strength, pozzolanic
activity, rheology

ABSTRACT

This study investigates the influence of microsilica on the shrinkage behavior, mechanical strength, and rheological properties of self-compacting concrete (SCC). Microsilica was incorporated at replacement levels of 5%, 10%, and 15% by mass of cement. A comprehensive experimental program, conducted in compliance with national and European standards, evaluated the effects of microsilica on both early and later hardening stages. The results indicate that MS enhances the formation of a denser cementitious matrix through intensified pozzolanic reactions, accelerating hydration and reducing capillary porosity. Compared to the control mixture, the microsilica-modified SCC exhibited a compressive strength increase of up to 19% and a total shrinkage reduction of up to 27%. Additionally, the study analyzed the impact of microsilica on the fresh-state rheology of SCC, improving workability prediction and early-age performance assessment. These findings provide practical insights for optimizing the design of durable reinforced concrete structures, particularly under the climatic conditions of Almaty.

КІРІСПЕ

Соңғы онжылдықтарда микрокремнезем (МК) жоғары сапалы бетон өндірісіндегі тиімді минералдық қоспа ретінде орнығын нығайтты. Оның қолданылуы тек беріктікті арттыруға ғана емес, сонымен қатар бетонның төзімділігі мен сыртқы агрессивті әсерлерге төзімділігіне байланысты да негізделген. 1980-жылдардан бастап МК жоғары беріктіктері, аязға және коррозияға төзімді бетондар өндірісінде кеңінен қолданылады (Daczko, 2012).

Микрокремнезем құрылыс материалдары саласында жаңа технологиялық бағыттардың дамуына түрткі болды. Қазіргі таңда ол тек дәстүрлі темірбетон бұйымдарында ғана емес, сонымен қатар гидротехникалық құрылыстарда, көпірлерде, жол жабыңдыларында және биік ғимараттардың көтергіш құрылымдарында кеңінен қолданылуда. Мұндай кең таралуының басты себебі МК енгізу арқылы бетонның қызмет ету мерзімін бірнеше есеге дейін арттыруға болатындығы.

Микрокремнезем (МК) - бұл ферросилиций қорытпасын балқыту кезінде түзілетін шаң (Lajan et al., 2019). МКЗ сұрғылт ақ түсті болып, оның бөлшектерінің орташа мөлшері шағын әрі әдетте цемент бөлшектерінің мөлшерінен 1/50-1/100 шамасында болады (МЕМСТ10180-2012, 2014). Материалдың меншікті бетінің аумағы өте үлкен және 15 000–25 000 м²/кг аралығында жатады. МК-тің негізгі химиялық компоненті бұл аморфты кремний диоксиді үлесі 85%-дан астам. Физикалық сипаттамалары мен химиялық құрамына

байланысты МК жоғары беленді пуццоландық қоспа болып табылады (Villar-Cociña et al., 2020; Lajan et al., 2019; Sharaky et al., 2019). Бетон дайындау кезінде микрокремнеземді қоспа қоспаның ұстамдылығын жақсартады; сонымен қатар, ол сілті-агрегаттық реакциясын тежейді және механикалық қасиеттерді (Flores Medina et al., 2015), аязға төзімділікті (Liang et al., 2021) және су өткізбейтіндікті (Zhang et al., 2018) едәуір жақсартады.

Осының нәтижесінде бетондағы капиллярлы кеуектердің саны азайып, су өткізбейтіндігі артады. Бұл қасиет әсіресе Қазақстанның климаттық жағдайларында маңызды, өйткені температураның күрт ауытқуы мен аяз кезінде конструкциялардың жарыққа төзімділігі артып, аязға қарсы беріктігі қамтамасыз етіледі. Сонымен қатар, микрокремнезем цемент шығынын азайтып, экономикалық тұрғыдан да тиімді шешім болып саналатыны атап өтілген (Daczko, 2012).

Өздігінен тығыздалатын бетондар (ӨТБ) құрамындағы микрокремнеземді бетондардың әрекеті ерекше қызығушылық тудырады, мұнда тек беріктік емес, сонымен қатар шөгінді және реологиялық қасиеттер сияқты параметрлер маңызды рөл ойнайды. МК-ның ұсақ дисперсті құрылымы мен су сіңіру қабілеті араласманың тұтқырлығына және бетон микроқұрылымының ерте қату кезеңдеріндегі қалыптасуына әсер етеді. Зерттеушілердің мәліметтері бойынша, су-цемент қатынасы тұрақты болған жағдайда, МК бар цементтің 7 күндік гидратация дәрежесі қарапайым цементтің 28 күндік дәрежесіне жетеді (Daczko, 2012).

Бұл дерек микрокремнеземнің гидратациялық процестерді айтарлықтай жылдамдататынын көрсетеді. Яғни, бетон ерте мерзімдерде жоғары беріктікке қол жеткізеді, бұл өндірістік циклдарды жеделдетуге және қалыптарды қайта пайдалануды тездетуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, қоспаның реологиялық қасиеттерінің жақсаруы бетонды құю кезінде вибрациясыз технологияларды қолдануға жол ашады.

Шөгу — бетонның қатып, құрғау процесінде пайда болатын маңызды құбылыс. Алғашқы көлемнің азаюы ылғалдың булануы мен гидратациядан туындайды және бетон конструкцияларының өнімділігіне уақыт өте келе әсер етеді. Алдын ала керілген бетондар үшін шөгілуді дәл бағалау сыртқы кернеудің уақытша жоғалуын болжауда шешуші рөлге ие. Шөгілуді төмен бағалау тізбекті кернеудің жоғалуына, соның салдарынан конструкциялардың ұзақ мерзімді төзімділігі мен қызмет ету қабілетіне теріс әсерін тигізуі мүмкін.

Сондықтан шөгу процестерін алдын ала зерттеу және олардың нақты шамаларын анықтау инженерлік практикада аса өзекті мәселе болып табылады. Шетелдік зерттеулерде микрокремнезем енгізілген бетондарда шөгу шамасы дәстүрлі құрамдармен салыстырғанда 20–30%-ға төмендейтіні көрсетілген. Бұл көрсеткіш конструкциялардың өлшемдік тұрақтылығын қамтамасыз етіп, олардың пайдалану мерзімін ұзартуға септігін тигізеді.

Зерттеудің мақсаты — микрокремнеземнің ӨТБ-ның шөгілуді және реологиялық қасиеттеріне әсерін тәжірибелік зерттеу және беріктікке тәуелді шөгілуін болжау. Жұмыс алдын ала керілген конструкциялардың жарыққа төзімділігін және эксплуатациялық сенімділігін арттыруға бағытталған. Нәтижелер микрокремнеземді бетондардың өнімділігін болжау дәлдігін арттырады.

ӘДЕБИ ШОЛУ

Өзін тығыздайтын бетон (ӨТБ) бұл өз салмағының әсерімен қалыпты толық толтыра алатын және қосымша дірілдеусіз орналаса алатын жоғары технологиялық құрылыс материалы. 1980-жылдардың соңында Жапонияда алғаш пайда болғаннан бері ӨТБ құрамын жобалау және материалтану салаларында айтарлықтай жетістіктерге қол жеткізілді (Okamura & Ouchi, 2003). Минералды қоспаларды, әсіресе микрокремнеземді (МК), қолдану арқылы ӨТБ-ның қасиеттерін жақсарту кеңінен зерттеліп келеді.

Микрокремнезем — кремний немесе феррокремний қорытпаларын өндіру кезінде түзілетін жанама өнім. Оның құрамы негізінен аморфты кремний диоксидінен тұрады және меншікті беті жоғары. Бұл материал пуццоландық белсенділікке ие және цемент гидратациясын жеделдетіп, қосымша кальций-силикат-гидрат (C-S-H) түзілуіне ықпал етеді, нәтижесінде беріктік пен микроқұрылым тығыздығы артады (Villar-Cociña et al., 2020).

Зерттеулер көрсеткендей, микрокремнеземді қолдану ӨТБ-ның қысу беріктігін және ұзақмерзімді төзімділігін айтарлықтай жақсартады. Мысалы, цементтің 10–15% микрокремнеземмен ауыстырылуы беріктіктің ерте және кейінгі кезеңдерде едәуір артуына алып келетіні анықталған (Sankar et al., 2019). Алайда микрокремнеземнің артық мөлшері қоспаның жұмысқа қабілеттілігін төмендетіп, суға деген қажеттілікті арттырады. Мұндай жағдайда жоғары тиімділікке ие су азайтқыштарды қолдану қажет (Domone, 2006).

ӨТБ үшін шөгу, әсіресе автогендік және кебу шөгуі, маңызды мәселе болып қала береді. Микрокремнеземнің ұсақ бөлшектері мен жоғары белсенділігі ішкі ылғалдың тез тұтынылуына және микроструктураның тығыздалуына әкеліп, шөгу көлемін арттыруы мүмкін (Puentes et al., 2015). Кейбір авторлар микрокремнеземнің шөгуін арттыратынын айтса, басқалары оны химиялық қоспалар мен дұрыс күтім арқылы азайтуға болатынын көрсетеді (Sahmaran et al., 2007).

ӨТБ-ның реологиялық қасиеттері де микрокремнеземнің қосылуымен айтарлықтай өзгереді. МК қосылғанда қоспаның беріктік шегі мен пластикалық тұтқырлығы артатыны байқалады, бұл тұрақтылықты арттыруы мүмкін, бірақ ағындылығын төмендетуі мүмкін (Domone, 2006). Бұл әсерлерді суперпластификатор дозасын дәл реттеу арқылы теңестіруге болады.

Қазіргі әдебиетте бірқатар олқылықтар әлі де бар. Атап айтқанда, ӨТБ құрамында микрокремнеземнің оңтайлы мөлшерін анықтау бойынша бірізді пікір жоқ. Сонымен қатар, микрокремнезем мөлшерінің реологиялық параметрлер мен ұзақ мерзімді шөгу арасындағы өзара байланысы туралы жүйелі зерттеулер аз. Микрокремнезем модификаторы маңызды, себебі ол дірілсіз технологиялармен өндірілетін құрылымдық элементтердің беріктігі мен төзімділігіне тікелей әсер етеді.

Осы зерттеу жұмысы микрокремнезем мөлшерінің өзгеруінің ӨТБ-ның шөгу, беріктік және реологиялық қасиеттеріне әсерін тәжірибелік түрде зерттеуге бағытталған. Әдеби шолуда қарастырылған мәліметтер зерттеу сұрақтарының және мақсаттарының қалыптасуына негіз болып табылады. Шолу тақырыптық бағытта ұйымдастырылған: механикалық қасиеттер, шөгу сипаты және реология — зерттеу тақырыбының негізгі аспектілерін қамтиды және жұмыс жоспарының негізін анықтайды.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӨДІСТЕР

Зерттеу барысында микрокремнезем (МК) мөлшері 0%, 5%, 10% және 15% (цементтің массасына қатысты) болатын өздігінен тығыздалатын бетон (ӨТБ) қоспалары дайындалды. Қоспалардың барлығы тұрақты су-цемент қатынасымен ($C/C_0 = 0,35$) және қажетті ағындылық пен құюға жарамдылықты қамтамасыз ететін поликарбоксилатты суперпластификатор қолданыла отырып жасалды. Тәжірибеге дейін шикізат материалдарының сапасы МЕМСТ стандарттарына сәйкес тексерілді (МЕМСТ 31108-2003, 2003; МЕМСТ 8736-2014; МЕМСТ 32824-2014).

Материалдар мен қоспалардың құрамы:

– Цемент: портландцемент СЕМ II 42.5 (МЕМСТ 31108-2003);

Зерттеуде портландцемент СЕМ II 42.5 (МЕМСТ 31108-2003) «Стандарт» маркасы (М450) қолданылды. Лабораториялық сынақ нәтижелері оның негізгі физикалық-

механикалық қасиеттерінің нормативтік талаптарға сәйкес келетінін көрсетті. Цементтің ұнтақталу дәрежесі 0,5 % қалдықпен сипатталады, бұл МЕМСТ нормасынан әлдеқайда төмен көрсеткіш болып табылады және материалдың жоғары ұнтақталуын айғақтайды. Қалыпты қоюлығы 28 % деңгейінде, бұл цементтің су қажеттілігінің стандарт шегінде екенін дәлелдейді. Қатаю уақытының басталуы мен аяқталуы мәндері нормативке сай келеді. Қысу беріктігі 7 тәулікте 63 МПа, иілуге беріктігі 6.6 МПа шамасында анықталды. Көлем тұрақтылығы бойынша ауытқулар байқалған жоқ, нәтижелері толық сәйкес келеді (МЕМСТ 10180-2012; МЕМСТ 31108-2003).

– Микрокремнезем (МК): меншікті беті 18 000 см²/г, аморфты кремний диоксидінің (SiO₂) мөлшері 90 % астам (ASTM C1240) ;

Зерттеуде қолданылған микрокремнеземнің меншікті беті 18 000 см²/г деңгейінде, ал аморфты кремний диоксидінің (SiO₂) мөлшері 90 % астам. Мұндай сипаттамалар ASTM C1240 стандартына сәйкес келеді және микрокремнеземнің жоғары пуццоландық белсенділігін қамтамасыз етеді.

– Толтырғыштар: қиыршық тас (5-10 мм және 10-20 мм фракциялары), кварцты құм (модулі Мкр = 2,6);

ТОО «Гида» өндірген кварцты құмға жүргізілген зертханалық зерттеулер оның физикалық-механикалық сипаттамаларының МЕМСТ 8736-2014 нормативтік талаптарына сәйкестігін растады. Атап айтқанда, құмның ірілік модулі 2,3 құрап, орташа ірілік класына сәйкес келеді. Ылғалдылық деңгейі 2,5 %, яғни стандартпен белгіленген 5 % шектен аспайды. Шаңды бөлшектердің үлесі 0,15 %, ал жуу кезіндегі масса жоғалтуы 0.15 % шамасында тіркелді, бұл мәндер нормативтік шектен айтарлықтай төмен. Құмның көлемдік массасы 1140 г/л құрап, оның құрылымдық тығыздығының жеткілікті деңгейін дәлелдейді (МЕМСТ 8736-2014)

Фракциясы 5-10 мм «Озентас» өндірісінің қиыршық тасы жүргізілген зертханалық зерттеулер нәтижелері бойынша МЕМСТ 8267-93 стандартының нормативтік талаптарына толық сәйкес келетіні анықталды. Материалдың түйір құрамын талдау барысында инелі (игольчатые) түйіршіктердің үлесі 8 % деңгейінде екені тіркелді, бұл көрсеткіш рұқсат етілген шектен (15 %) айтарлықтай төмен. Ұсақталу кезіндегі масса жоғалтуы небәрі 1.10% құрап, қиыршық тастың жоғары беріктік сипаттамаларын айғақтады. Сонымен қатар, көлемдік тығыздықтың 1320 г/л шамасында болуы материалдың құрылымдық сапасының жеткілікті екендігін дәлелдеп, бетон қоспаларының тығыздығы мен біртектілігіне оң әсер ететінін көрсетті (МЕМСТ 32824-2014).

«Озентас» өндірісінің 10–20 мм фракциялы қиыршық тасы МЕМСТ 32824-2014 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ» талаптарына толық сәйкес келеді (МЕМСТ 32824-2014).

Ине тәрізді түйіршіктердің мөлшері (10%) және ұсақталу кезіндегі масса жоғалтуы (1,28 %) нормативтік шектердің ішінде болып, материалдың сапасын айқындайды.

Қиыршық тастың көлемдік (насыпная) тығыздығы 1240 г/л шамасында, бұл оның құрылымдық тығыздығының жоғары екендігін және сапасының тұрақтылығын дәлелдейді

– Суперпластификатор: поликарбоксилатты түрі (дозасы байланыстырғыш массасының 0,85-1,3 % аралығында).

Зерттеуде поликарбоксилат негізіндегі суперпластификатор «Оптим» пайдаланылды. Қоспа жоғары диспергирлеу қабілетінің арқасында цемент жүйесінің бөлшектерін тиімді ажыратып, қоспаның ағымдылығын қамтамасыз етеді және су-цемент қатынасын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде бетонның ерте беріктік жинақталуын жеделдетіп, құрылымдық тығыздығын және ұзақмерзімді беріктігін арттырады. Поликарбоксилаттық суперпластификаторлар әдетте байланыстырғыш массасының 0,35-1,2 % мөлшерінде қолданылады.

Реологиялық қасиеттердің анықталуы:

Қоспалардың ағындылығы мен тығыздалу қабілеті келесі стандартты әдістер арқылы бағаланды:

- J-сақина (таралу қабілеті);
- V-тәрізді құйғыш (ағу уақытын анықтау);
- L-box (көлденең ағу қабілеті);
- Абрамс конусы (құймалық индексі).
- Микрометр:

Шөгілу: 100×100×400 мм өлшемді бетон призмаларда МЕМСТ 24544-2020 стандартына сәйкес өлшенді. Цифрлық индикатор көмегімен алғашқы күннен бастап (1, 3, 7, 14, 28 және 56 күн) шөгілу деформациялары тіркелді.

Қысу беріктігі: 100×100×100 мм өлшемді кубтық үлгілерде МЕМСТ 10180-2012 талаптары бойынша анықталды. Сынақтар шөгілу өлшеулерімен бір мезгілде жүргізілді.

Қату шарттары:

Барлық үлгілер нақты эксплуатациялық жағдайға жақын параметрлерде (температура 20±2 °С, салыстырмалы ылғалдылық 95±5 %) ұсталды.

1-кесте. Қоспалардың құрамы

Параметр	0 % МК	5 % МК	10 % МК	15 % МК
МК, % цементтен	0	5	10	15
Суперпластификатор, %	1,2	1,2	1,2	1,2
С/Ц	0,35	0,35	0,35	0,35

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

Зерттеу барысында микрокремнезем (МК) мөлшері 0 %, 5 %, 10 % және 15 % (цемент массасына) болатын 4 түрлі өздігінен тығыздалатын бетон қоспалары дайындалды. Барлық қоспалар үшін су-цемент қатынасы (С/Ц) тұрақты (0,35) болды. Әрбір құрамда суперпластификатор мөлшері тұрақты түрде цемент массасынан 1,2 % етіп алынды. Бұл микрокремнеземнің түрлі мөлшерінің бетон қоспасының қасиеттеріне әсерін дәл және салыстырмалы түрде бағалау үшін қажет болды. Суперпластификатор дозасын өзгертпей, тек микрокремнезем құрамын өзгерту арқылы оның нақты әсері анықталды.

ӨТБ қоспаларының реологиялық қасиеттері EN 12350 сериялы еуропалық стандарттарға сәйкес бағаланды:

- Абрамс конусы – таралу диаметрі (EN 12350-2, МЕМСТ 10181);
- J-ring әдісі – арматура арасынан өту қабілеті (EN 12350-12:2010);
- V-тәрізді құйғыш – ағу уақыты (EN 12350-9);
- L-box – көлденең ағу қабілеті (EN 12350-10).

Барлық сынақтар бөлме температурасында (20±2 °С) жүргізілді. Әр сынақ үш рет қайталанды, нәтижелер орташа мән ретінде берілді.

Өздігінен тығыздалатын бетон қоспасының реологиялық қасиеттерін бағалау үшін халықаралық және ұлттық стандарттарға сәйкес бірнеше стандартты әдістер қолданылды. Зерттеулер EN 12350 сериялы еуропалық стандарттар мен олардың үйлестірілген МЕМСТ нұсқаларына сәйкес жүргізілді.

Қоспаның таралу қабілеті Абрамс конусы әдісімен (EN 12350-2, МЕМСТ 10181) анықталды. Қоспаның жайылу қабілетін анықтау үшін конус Абрамс әдісі пайдаланылды. Сынақ барысында конус формасы тегіс металл табақшаға орналастырылып, үш қабатпен толтырылады. Әр қабат қоспаға ешқандай нығыздау күшін қолданбастан құйылды. Конус тігінен көтерілгеннен кейін қоспаның еркін жайылуы бақыланды. Диаметр екі бағытта

(өзара перпендикуляр) өлшеніп, олардың орташа мәні таралу диаметрі ретінде қабылданды. Бұл көрсеткіш қоспаның ағып жайылу қабілетін сипаттайды.

Арматура арасынан өту қабілеті J-ring әдісімен (EN 12350-12:2010) бағаланды. Арматура арасынан өту қабілетін бағалау үшін J-ring құрылғысы қолданылды. Ол дөңгелек табақшаға орнатылған тік стерженьдерден тұрады және арматураны еліктейді. Алдымен қоспаның еркін жайылуы Абрамс конусымен анықталды, кейін дәл сол процедура J-ring сақинасымен қайталанды. Екі жағдайда да таралу диаметрі өлшеніп, айырмашылық (ΔD) анықталды. Бұл көрсеткіш қоспаның арматурасы тығыз орналасқан аймақтар арқылы өту қабілетін көрсетеді.

Қоспаның тұтқырлығы және ағу уақыты V-тәрізді құйғыш арқылы (EN 12350-9) анықталды. Ағу уақыты қоспаның тұтқырлық қасиеттерін бағалау үшін V-тәрізді құйғыш арқылы өлшенді. Құйғыштың төменгі бөлігі жабық күйде қоспамен толтырылып, белгілі бір уақыт өткеннен кейін қақпағы ашылды. Қоспаның толық ағуына кеткен уақыт секундпен тіркелді. Алынған мәліметтер қоспаның тұтқырлығы мен еркін ағу қабілетінің сипаттамасы ретінде қарастырылды.

Қоспаның көлденең бағытта ағу қабілетін бағалау үшін L-box құрылғысы қолданылды. L-тәрізді арна тік бөлік пен көлденең бөлікке бөлінеді, олардың арасында тік стерженьдер орналасқан. Алдымен қоспа тік бөлікке құйылды, кейін қақпақ көтеріліп, қоспаның көлденең бөлікке өтуі бақыланды. Сынақ соңында қоспаның биіктігі екі нүктеде (көлденең арнаның басы мен соңы) өлшеніп, олардың қатынасы (H_2/H_1) есептелді. Бұл көрсеткіш қоспаның бөгеттер арқылы ағу қабілетін сипаттайды.



1-сурет. Бетон қоспасының реологиялық қасиеттерін анықтау әдістері.

А- V-тәрізді құйғыш. Б- L-box . В- J-ring әдісі

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

Шөгун анықтау үшін МЕМСТ 24544-2020 стандартына сәйкес ені 100 мм, биіктігі 100 мм және ұзындығы 400 мм призмалық үлгілер дайындалды. Үлгілер 1, 3, 7, 14, 28 және 56 тәулік ішінде бақылауға алынып, шөгілу микрометр арқылы өлшенді.

Қысу беріктігі 100×100×100 мм өлшемді куб үлгілерде гидравликалық пресс көмегімен анықталды (Пресс гидравликалық ИП-2000, жүктеме шегі 2000 кН, дәлдік класы ±1 %). Сынақтар МЕМСТ 10180-2012 стандартына сәйкес жүргізілді. Әр құрам үшін кемінде үш үлгі пайдаланылды.

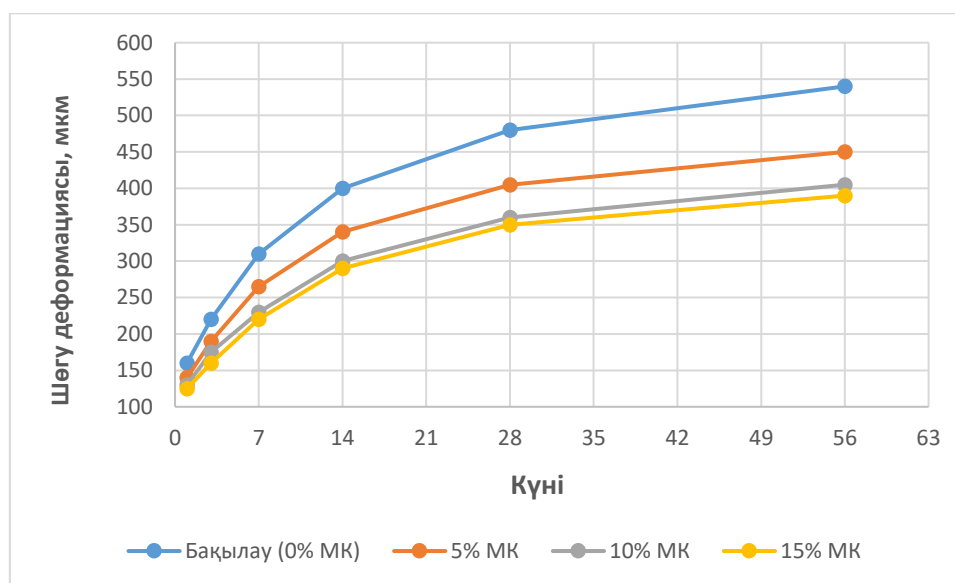
НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУ

Төмендегі графикте микрокремнеземнің мөлшеріне қарай бетон шөгунінің 56 күн ішіндегі өзгерісі берілген.

2-кесте. 56 күнде шөгiлу көрсеткіштері, график қоса тіркеледі:
Шөгiлу (мкм/м) – тәулік бойынша

Күні	Бақылау (0% МК)	5% МК	10% МК	15% МК
1	160	140	130	125
3	220	190	175	160
7	310	265	230	220
14	400	340	300	290
28	480	405	360	350
56	540	450	405	390

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған



2-сурет. Шөгiлу деформациясының уақыт бойынша өзгерісі

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

Суретте көрсетілген мәліметтер бойынша, өздігінен тығыздалатын бетонның шөгiлу деформациялары микрокремнезем (МК) мөлшерінің артуына қарай елеулі түрде азаятыны байқалады. Бақылау үлгісіне (0 % МК) қарағанда, барлық модификацияланған құрамдарда шөгiлу шамаларының тұрақты түрде төмендеуі тіркелген.

Ең жоғары шөгiлу деформациясы барлық мерзімде бақылау құрамында байқалды және 56 тәулікте 540 мкм-ге жетті. Ал 15 % микрокремнезем енгізілген құрамда бұл көрсеткіш тек 390 мкм құрады, яғни шөгiлу 27,8 %-ға азайды. Бұл микрокремнеземнің жоғары пуццоландық белсенділігі мен микрофилл эффектісіне байланысты цемент тасындағы капиллярлық қуыстардың азаюымен түсіндіріледі.

Бастапқы мерзімдерде де (1-7 тәулік) МК-мен модификацияланған құрамдарда шөгiлу қарқыны төмен болып, әсіресе 10–15 % МК қосылған қоспаларда тұрақты нәтиже берген. 1 тәулікте шөгiлу мөлшері бақылау үлгісінде 160 мкм болса, 15 % МК құрамында тек 125 мкм болды, бұл да 21,9 %-ға азаюды көрсетеді.

Жалпы, алынған нәтижелер микрокремнеземнің өздігінен тығыздалатын бетонның шөгiлу деформацияларын азайтуға тиімді әсер ететінін көрсетеді. Бұл көрсеткіштердің төмендеуі конструкциялардың жарыққа төзімділігін және ұзақ мерзімді эксплуатациялық сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл құбылыс

микркремнеземнің ерте гидратацияны жеделдету, кальций гидроксидімен реакцияға түсу арқылы екінші реттік C-S-H фазаларын қалыптастыру қабілетімен тығыз байланысты.

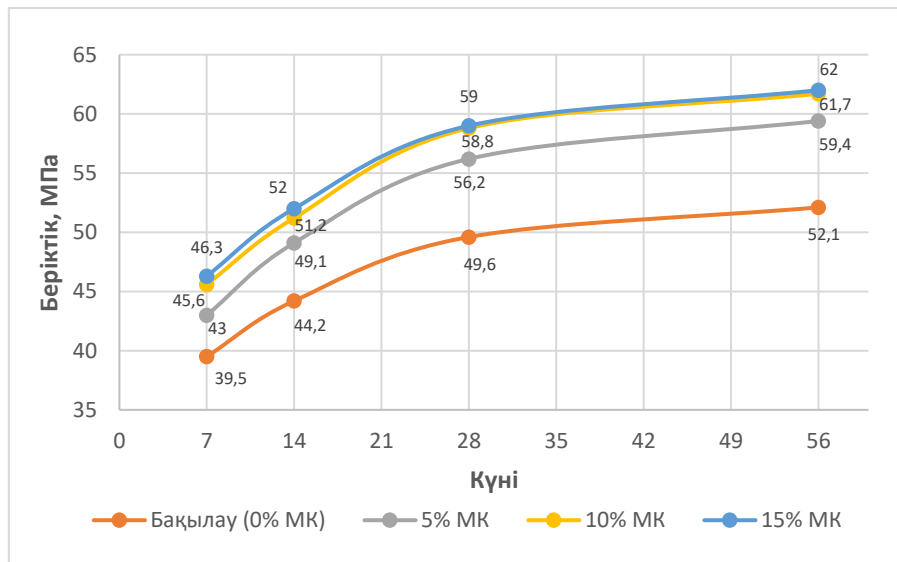
Кестеден көріп отырғанымыздай, МК қосу арқылы шөгү көрсеткіштері едәуір төмендеді. 15 % мөлшерінде МК қолдану шөгілуді 27,7 % азайтты.

3-кесте. 56 күнде бетондағы микркремнезем мөлшерінің беріктік көрсеткіштеріне әсері: Беріктік: МПа – тәулік бойынша

Күні	Бақылау (0 % МК)	5 % МК	10 % МК	15 % МК
7	39,5	43,0	45,6	46,3
14	44,2	49,1	51,2	52,0
28	49,6	56,2	58,8	59,0
56	52,1	59,4	61,7	62,0

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

МК енгізу беріктікті арттыруға әсер етті. 15 % МК қолдану 56 күнде 19 %-ға дейін артық беріктік көрсетті.



3-сурет. Бетонның беріктігінің қату уақытына байланысты өзгерісі

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

Суретте көрсетілген мәліметтер бойынша, 7–56 тәулік аралығында бетон үлгілерінің қысу беріктігінің өзгерісі көрсетілген. Бақылау үлгісімен (0 % МК) салыстырғанда, микркремнезем қосылған қоспаларда беріктіктің айтарлықтай артқаны байқалады. 7 тәулікте-ақ 5 %, 10 % және 15 % микркремнезем енгізілген үлгілер бақылаудан жоғары нәтижелер көрсетті. 28 және 56 тәуліктерде микркремнезем мөлшері артқан сайын бетонның беріктігі де біртіндеп жоғарылаған. Әсіресе 10 % және 15 % микркремнезем қосылған үлгілер ең жоғары нәтижелерді көрсетті.

Микркремнезем (МК) мөлшерінің артуы қоспаның тұтқырлығының жоғарылауына алып келді, бұл әсіресе 15 % мөлшерінде айқын байқалды. Алайда, поликарбонат негізіндегі суперпластификаторды қолданудың арқасында қоспалар қажетті қозғалыштылықты сақтап қалды: V-тәрізді воронка арқылы ағып өту уақыты 6,2-7,9 секунд

аралығында болды және МЕМСТ талаптарына (≤ 8 с) сай келді, ал Абрамс конусы бойынша жайылу 650-720 мм диапазонында сақталды (EN 12350-9:2010).

4-кесте. Микрокремнезем мөлшерінің реологиялық нәтижелеріне әсері

№	МК мөлшері, %	V-тәрізді воронка арқылы өту уақыты, с	L-box өтімділік коэффициенті (H_2/H_1)	Абрамс конусы бойынша жайылу, мм	Бөгет сақинасы (J-ring), мм
1	0	6,3	0,95	720	700
2	5	6,7	0,93	700	670
3	10	7,2	0,89	670	640
4	15	7,8	0,80	650	610

Ескерту – авторлардың тәжірибелік зерттеулері негізінде құрастырылған

Ең жақсы жұмысқа қабілеттілік көрсеткіштері микрокремнеземнің 5-10 % мөлшерінде байқалды, бұл қозғалыштылық пен тұтқырлық арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз етті. Мөлшерді одан әрі арттырған кезде, әсіресе L-box сынақтарында, өтімділік коэффициенті МЕМСТ бойынша рұқсат етілген шекке ($\geq 0,80$) жақындай отырып, қоспаның орнықты төгілу қабілеті төмендей бастады.

Микрокремнеземді (МК) енгізу өздігінен тығыздалатын бетонның (ӨТБ) шөгілу көрсеткіштерін едәуір төмендетіп, беріктігін арттыратыны анықталды. Бұл құбылыс көптеген зерттеулерде де сипатталған. Мысалы, Okamura & Ouchi [9] және EFNARC нұсқаулығында [3] микрокремнеземнің капиллярлық қуыстар санын азайтып, бетонның тығыздығын жоғарылататыны, нәтижесінде шөгілу деформациясының төмендейтіні көрсетілген. Біздің нәтижелеріміз осы тенденцияны растайды: 56 тәулікте бақылау құрамымен салыстырғанда (540 мкм), 15 % МК қосылған құрамда шөгілу 390 мкм болып, 27,8 %-ға азайды. Сонымен қатар, беріктік те артты: 56 тәулікте 52,1 МПа-дан 62,0 МПа-ға дейін өсіп, шамамен 19 %-ға артық нәтиже көрсетті.

Шетелдік зерттеулерде де микрокремнезем мөлшерінің оңтайлы деңгейі көрсетілген. Sankar және әріптестері (2020) микрокремнеземнің 10% дозасы бетонның құрылымдық беріктігі мен сыну энергиясын айтарлықтай арттыратынын анықтаған. Зерттеу нәтижелері бойынша 10% МК кезінде сыну энергиясы ең жоғары мәнге жетсе, 15% мөлшерінде бұл көрсеткіш төмендей бастаған, яғни артық микрокремнезем қоспаның морттығын арттырып, тиімділігін азайтады. Бұл мәліметтер біздің тәжірибемізде де расталды: 10–15% диапазонында беріктік жақсарғанымен, 10% МК ең тиімді нәтиже көрсетті. Дегенмен, 15% МК қосылған кезде тұтқырлық едәуір артып, L-box сынағы бойынша өтімділік коэффициенті 0,80-ге дейін төмендеді, яғни жұмысқа қабілеттілік шектік мәнге жақындады. Мұндай қайшылықты суперпластификатордың түрі мен мөлшерін оңтайландыру арқылы шешуге болады.

Алынған нәтижелерді түсіндіруге бірнеше фактор ықпал етеді. Біріншіден, микрокремнезем капиллярлық қуыстардың азаюына алып келеді, бұл судың булануын баяулатып, шөгілу деформациясын төмендетеді. Екіншіден, кальций гидроксидімен реакцияға түсу нәтижесінде қосымша C-S-H фазалары түзіліп, беріктік артады (Villar-Sociña et al., 2020). Үшіншіден, микрокремнеземнің дисперсті бөлшектері қоспаның тұтқырлығын көбейткенмен, поликарбоксилатты суперпластификатордың әсерінен қажетті қозғалыштылық сақталды: V-тәрізді воронка бойынша 6,2–7,9 с, Абрамс конусы бойынша жайылу 650–720 мм аралығында болып, EFNARC (2005) талаптарына сәйкес келді (EFNARC, 2005).

Зерттеудің белгілі бір шектеулері бар: сынақтар тек бір маркалы цемент пен бір типті суперпластификаторда жүргізілді, үлгілер 56 тәулікке дейін ғана бақыланды, ал МК мөлшерінің жоғарырақ деңгейлері (20% және одан көп) қарастырылмады. Дегенмен, алынған нәтижелер практикалық тұрғыда маңызды. МК енгізу конструкциялардың жарыққа төзімділігін арттырып, ұзақ мерзімді сенімділігін қамтамасыз етуге, сондай-ақ цемент шығынын ішінара төмендету арқылы экологиялық тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді.

Ғылыми жаңалығы – Қазақстан жағдайында өндірілетін цемент пен жергілікті микрокремнеземді пайдалана отырып, өздігінен тығыздалатын бетон құрамдарының шөгілуі мен беріктігі кешенді түрде зерттелді. Нәтижелер көрсеткендей, микрокремнезем қосу шөгілу көрсеткіштерін 27,8 %-ға дейін төмендетіп, қысу беріктігін 19 %-ға арттырады. Бұл микрокремнеземнің тиімді мөлшері 10–15 % аралығында екенін көрсетеді.

Алдағы зерттеулерде микрокремнеземді басқа минералдық қоспалармен (цеолит, ұшпа күл, метакаолин т.б.) біріктіру, ұзақ мерзімді шөгілу мен сырғымалы деформациясы (ползучесть) әсерлерін талдау, сондай-ақ фибра енгізген жағдайда МК-ның әсерін кешенді бағалау ұсынылады. Осылайша, алынған нәтижелер теориялық негізді кеңейтіп қана қоймай, Қазақстандағы темірбетон өндірісінде жаңа құрамдарды жобалау үшін практикалық база бола алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері микрокремнеземнің (МК) өздігінен тығыздалатын бетонның (ӨТБ) шөгу, беріктік және реологиялық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті.

МК қосылуы шөгу деформацияларын 27,8 %-ға дейін төмендетті (15 % МК, 56 күнде). Бұл МК-ның пуццоландық белсенділігі мен микрофилл эффектісінің нәтижесі: гидратты фазалардың тез қалыптасуы капиллярлы кеуектілікті азайтады, бұл ылғалдың булануын шектейді.

Ерте кезеңдерде (1–7 күн) шөгу қарқыны 21,9 %-ға төмендеді, бұл конструкциялардың алдын ала керілуі кезіндегі кернеудің жоғалуын болдырмайды.

МК қоспасының артуы беріктікті 19%-ға дейін арттырды (15 % МК, 56 күнде). МК-ның ұсақ дисперсті құрылымы цемент матрицасын тығыздап, C-S-H фазаларының синтезін жеделдетеді.

Оптималды доза – 10 % МК: 28 күнде беріктік 58,8 МПа (бақылауда 49,6 МПа), ал 56 күнде 61,7 МПа.

МК-ның жоғары дозасы (15 %) пластикалық тұтқырлықты арттырды, бірақ поликарбоксилатты суперпластификатордың дозасын реттеу арқылы қозғалыштылық сақталды (V-тәрізді құйғыш арқылы ағу уақыты ≤ 8 сек, EN 12350-9:2010. талаптарына сәйкес).

5–10 % МК қосылған құрамдар L-box сынағы бойынша ең жақсы өтімділік коэффициентін көрсетті ($H_2/H_1 = 0,89–0,93$). 15 % МК жағдайында бұл көрсеткіш 0,80-ге дейін төмендеді, бұл құрылымдық кедергілерді толтыру қабілетінің шектелуін білдіреді.

ӨТБ құрамында МК-ның оңтайлы дозасы 5–10% (цемент массасына). Бұл шөгу мен беріктік арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

15% МК қолдану жағдайында суперпластификатордың дозасын арттыру қажет, бірақ бұл құрамдарды тек шектеулі ағындылық талаптары бар конструкцияларға ұсынылады.

Осылайша, МК енгізу арқылы ӨТБ-ның қасиеттерін әртүрлі инженерлік талаптарға сәйкес реттеуге болады:

– 5–10% МК – шөгу (540-тен 405 мкм, 25 % төмендеу) мен қозғалыштылық арасындағы тепе-теңдік қажет болғанда;

– 10–15% МК – беріктік (52,1 -ден 62,0 МПа, +19%) пен төзімділікке жоғары талап қойылатын жағдайда.

Алматының климатында МК қосылған ӨТБ ұзақмерзімді төзімділігі жоғары конструкцияларды (көпірлер, эстакадалар) жобалау үшін тиімді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Daczko, J. A. (2012). *Self-Consolidating Concrete: Applying What We Know*. Skokie, IL: Portland Cement Association. <https://doi.org/10.1201/b11721>.
- Domone, P. L. (2006). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010>
- EFNARC. (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. Retrieved from <https://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.
- Flores Medina, N., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2015). Combined effect of polypropylene fibers and silica fume to improve the durability of concrete with natural pozzolans blended cement. *Construction and Building Materials*, 96, 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050>.
- Sankar, A.S., Hari, R., & Mini, K.M. (2019). Effect of micro silica and aggregate size on cracking of self-compacting concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(2), 168-176. <https://doi.org/10.1680/jcoma.18.00080>
- Puentes, J., Barluenga, G., Palomar, I. (2015). Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability. *Construction and Building Materials*, 81, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.053>
- Lajan, B., Ghafor, K., Mohammed, A. (2019). Testing and modeling the young age compressive strength for high workability concrete modified with PCE polymers. *Results in Materials*, 1, 100004 <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2019.100004>.
- Liang, G., Zhu, H., Li, H., Liu, T., Guo, H. (2021). Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 293, 123486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123486>.
- Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>.
- Sahmaran, M., Yaman, I. O., Tokyay, M. (2007). Transport and mechanical properties of self-consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.003>
- Sharaky, I. A., Megahed, F. A., Seleem, M. H., Badawy, A. M. (2019). The influence of silica fume, nano silica, and mixing method on the strength and durability of concrete. *SN Applied Sciences*, 1, 575–584. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0621-2>.
- Villar-Cociña, E., Rodier, L., Savastano, H., Lefrán, M., Rojas, M. F. (2020). A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: kinetic parameters. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 1627–1634. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00556-y>.
- Zhang, B., Tan, H., Shen, W., Xu, G., Ma, B., Ji, X. (2018). Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as surface protection material to enhance the impermeability. *Cement and Concrete Composites*, 92, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012>.
- ASTM C157/C157M-08. (2008). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. ASTM International.

- ASTM C1240-15. (2015). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International.
- EN 12350-2:2019. (2019). Testing Fresh Concrete – Part 2: Slump-Flow Test. Brussels: CEN.
- EN 12350-9:2010. (2010). Testing Fresh Concrete – Part 9: V-Funnel Test. Brussels: CEN.
- EN 12350-10:2010. (2010). Testing Fresh Concrete – Part 10: L-Box Test. Brussels: CEN.
- EN 12350-12:2010. (2010). Testing Fresh Concrete – Part 12: J-Ring Test. Brussels: CEN.
- Строительные материалы. (2021). №16. Москва: Изд-во ЦИТП, с. 99. // Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. – 2021. – No. 16. – P. 99. (In Russ.)
- ГОСТ 10180-2012. (2012). Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ. // GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam [Concretes. Methods for determining strength using control specimens]. – Moscow: Standartinform, 2012. (In Russ.)
- ГОСТ 24544-2020. (2020). Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. Москва: Стандартинформ. // GOST 24544-2020. Betony. Metody opredeleniya deformatsiy usadki i polzuchesti [Concretes. Methods for determining shrinkage and creep deformations]. – Moscow: Standartinform, 2020. (In Russ.)
- ГОСТ 31108-2003. (2003). Цементы. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ. // GOST 31108-2003. Tsementy. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Cements. General specifications]. – Moscow: Standartinform, 2003. (In Russ.)
- ГОСТ 8736-2014. (2014). Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ. // GOST 8736-2014. Pesok dlya stroitel'nykh работ. Tekhnicheskie usloviya [Sand for construction works. Specifications]. – Moscow: Standartinform, 2014. (In Russ.)
- ГОСТ 32824-2014. (2014). Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ. // GOST 32824-2014. Shcheben' i graviy iz plotnykh gornyx porod dlya stroitel'nykh работ. Tekhnicheskie usloviya [Crushed stone and gravel from dense rocks for construction works. Specifications]. – Moscow: Standartinform, 2014. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Оспанова Асель Тлектессона – техника ғылымдарының магистрі, Satbayev university, Алматы қ., Қазақстан.

Оспанова Асель Тлектессона – магистр технических наук, Satbayev university, г. Алматы, Казахстан

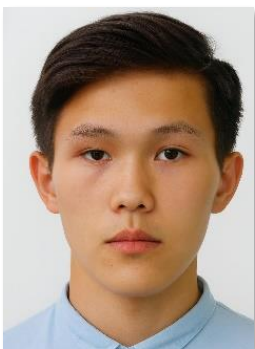
Ospanova Assel Tlektessovna – Master of Technical Sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: ospanovakzz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4029-4475>



Ахметов Данияр Акбулатович – техника ғылымдарының докторы, профессор, Satbayev university, Алматы қ., Қазақстан
Ахметов Данияр Акбулатович – доктор технических наук, профессор, Satbayev university, г. Алматы, Казахстан
Akhmetov Daniyar Akbulatovich – Doctor of Technical Sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: d.a.akhmetov@satbayev.university,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0978-6452>



Сартбаев Асхат Амандыкович – техника ғылымдарының бакалавры, магистрант, Satbayev university, Алматы қ., Қазақстан
Сартбаев Асхат Амандыкович – бакалавр технических наук, магистрант, Satbayev university, г. Алматы, Казахстан
Sartbayev Askhat Amandykovich – Bachelor of Technical Sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: sartbayev03@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7947-069X>



Ускембаева Багдат Оралбековна – техника ғылымдарының кандидаты, қауым. Проф., Satbayev university, Алматы қ., Қазақстан
Ускембаева Багдат Оралбековна – кандидат технических наук, ассоц. Проф., Satbayev university, г. Алматы, Казахстан
Uskembayeva Bagdat Oralbekovna – Candidate of Technical Sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: b.uskembayeva@satbayev.university
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4189-9772>



Чуканов Дияс Ерболатұлы – техника ғылымдарының магистрі, Satbayev university, Алматы қ., Қазақстан.
Чуканов Дияс Ерболатұлы – магистр технических наук, Satbayev university, г. Алматы, Казахстан
Chukanov Diyas Erbolatuly – Master of Technical Sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: d.chukanov@satbayev.university
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8357-4215>