

FTAMP 67.15.35

Л.Б. Аруова¹ – негізгі автор, | ©
А.К. Тлеубаева², Л.А. Жаксылыкова³, Д.Ж. Артықбаев⁴



¹Техн. ғылым. д-ры, профессор, ²Техн. ғылым. канд., қауымдас. профессор,
³Магистр, ⁴PhD, доцент

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-7700-0303> ²<https://orcid.org/0000-0002-6741-780X>
³<https://orcid.org/0000-0002-1869-9150> ⁴<https://orcid.org/0000-0003-4794-8707>



^{1,2,3}Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Астана, Қазақстан

²М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,
Шымкент, Қазақстан

@

⁴artykbaev_d@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/NAVZ7958>

3D-БАСПАҒА АРНАЛҒАН ӨНЕРКӘСІПТІК ҚАЛДЫҚТАРДАҒЫ ҰСАҚ ТҮЙІРШІКТІ ФИБРОБЕТОНДАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа. Бұл жұмыста құрылыстық 3D-баспаға арналған тиімді ұсақ түйіршікті фибробетондарды әзірлеу бойынша зерттеу ұсынылған. Тұтқыр ретінде жартылай күлмен алмастырылған PC 400-D0 және PC 500-D0 маркалы портландцементтер пайдаланылды. Жарықшаға төзімділігін және иілгіштікті арттыру үшін құрамына полипропилен, полиэтилен және нейлон сияқты түрлі полимерлік талшықтар енгізілді. Зерттеудің мақсаты жоғары беріктілік сипаттамаларын сақтай отырып, қажетті ағымдылықты және пішін төзімділікті қамтамасыз ету үшін бетон қоспасының құрамын оңтайландыру болып табылады. Жүргізілген сынақтар реологиялық қасиеттерін, сығылу мен созылу беріктілігін, тығыздығы мен иілгіштікті беріктілігін анықтауды қамтыды. Полипропилен талшықтарымен үйлесімде PC 500-D0 маркалы цементті қолдану сығылуға беріктілігі 50 МПа дейін арттыруды және созылуға беріктілігі бақылау құрамдарымен салыстырғанда 20%-ға дейін арттыруды қамтамасыз ететіні анықталды. Күлдің ұнтағын қосу цемент шығынын төмендетуге және қоспаның ыңғайлы орналасуын арттыруға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер құрылыс материалдарының беріктігін арттыруды және өзіндік құнын төмендетуді қамтамасыз ете отырып, құрылыстың аддитивті технологиялары үшін әзірленген қоспалардың перспективалылығын көрсетеді.

Тірек сөздер: 3D-баспа, фибробетон, портландцемент, күлдің ұнтағы, полипропилен талшықтары, беріктігі, төзімділігі.



Аруова, Л.Б. 3D-баспаға арналған өнеркәсіптік қалдықтардағы ұсақ түйіршікті фибробетондардың қасиеттері [Мәтін] / Л.Б. Аруова, А.К. Тлеубаева, Л.А. Жаксылыкова, Д.Ж. Артықбаев // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2026. – №1(91). – Б.275-282. <https://doi.org/10.55956/NAVZ7958>

Кіріспе. Құрылыстық 3D-баспа технологияларын дамыту соңғы жылдары инновациялық құрылыстың басым бағыттарының біріне айналды. Аддитивті әдістерді қолдану нысандарды салу мерзімін айтарлықтай қысқартуға, материал сыйымдылығын және қалдықтар санын азайтуға, сондай-ақ конструкциялардың геометриялық пішіндерінің дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Технологиялық ілгерілеумен бір мезгілде реологиялық

тұрақтылықты, пішінге төзімділікті және қатайтудан кейінгі жоғары беріктікті үйлестіруге қабілетті 3D-баспаның ерекшеліктеріне бейімделген құрылыс материалдарын әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Перспективалы шешімдердің бірі минералды және талшықты қоспалармен модификацияланған ұсақ түйіршікті фибробетондарды пайдалану болып табылады. Мұндай қоспалар жарылуға және иілгіштік деформацияларға төзімділікті қамтамасыз етіп қана қоймай, қабатты экструзия кезінде қабаттар арасындағы ілінісуді жақсартады. Соңғы жылдары көмірді жағу кезінде пайда болатын күлді қолдануға көп көңіл бөлінуде, ол тыңайтқыштарды жақсартады, су тұтынуды төмендетеді және өнеркәсіптік қалдықтарды қайта өңдеу есебінен орнықты құрылысқа ықпал етеді.

Құрылыстық 3D-баспа үшін фибробетондарды әзірлеу және қолдану мәселелерін соңғы жылдары әртүрлі ғылыми ұжымдар белсенді зерттеуде.

Nematollahi және басқалары [1] 3D-басып шығаруға арналған цемент қоспаларында полипропилен талшықтарын қолдану бойынша бірқатар эксперименттер жүргіздік және 0,25-0,5% талшықтар болғанда беріктік сипаттамалары жақсарады және экструзия кезінде материалдың қабатталу қаупі төмендейді. Zhu және басқалары [2] көрсеткендей цемент салмағының 20% -на дейінгі мөлшерде ұшпа күлді енгізуде иілгіштік беріктілігін арттырады және қатудың ерте мерзімінде шөгу жылдамдығын азайтады. Kazemian және басқалары [3] конструкциялардың қабаттық қалыптасу сапасын анықтайтын су-байланыстырғыш және тұтқырлық арақатынасын ескере отырып, қоспа құрамын таңдаудың маңыздылығын атап өтті. Ma және басқалары [4] арматуралаушы талшықтарды қолдану цемент элементтерін басу кезінде құрылымдық тұтастықты және қабатаралық адгезияны арттыратынын анықтады. Vos және басқалары [5] шүмек геометриясының және беру жылдамдығының басылған элементтердің қасиеттеріне әсерін зерттеді және қоспаның оңтайлы тұтқырлығы тұрақты экструзия үшін негізгі фактор болып табылатынын атап өтті. Le және басқалары [6] тиксотропия бойынша эксперименттік деректер негізінде құрамды іріктеу әдісін ұсынды, бұл нысандардың жоғары дәлдігіне қол жеткізуге және басып шығару кезінде деформацияларды азайтуға мүмкіндік берді. Nerella and Mechtcherine [7] талшықтар түрлерінің әсерін және олардың басылған бұйымдардың беріктілігіне бағдарлануын зерттеді және талшықтардың біркелкі таралуы жарылуға төзімділікті 25-30%-ға арттырады деген қорытындыға келді. Zareiyan and Khoshnevis [8] экструзия кезінде цемент матрицасы мен талшықтардың өзара әрекеттестігіне талдау жүргізді және синтетикалық талшықтарды қосу қабаттар арасындағы ілінісуді жақсартатынын көрсетті. Sanjaayan және басқалары [9] күл ұнтағын белсенді минералды компонент ретінде пайдалану 3D-бетонды өндіру кезінде көміртегі ізін азайтады және бұйымдардың ұзақтығын арттырады. Lv және басқалары [10] белсенді минералды қоспалармен бірге синтетикалық талшықтарды қолдану иілгіштік деформацияларға қарсы тұруды арттыратынын және цемент тасының микроқұрылымын жақсартуға ықпал ететінін растады.

Сол себептен, әдеби дереккөздерді талдау 3D-басып шығару үшін фибробетондардың тиімділігі қоспа компоненттерін кешенді іріктеуге байланысты екенін көрсетеді. Қазіргі заманғы зерттеулер технологиялық және беріктілік сипаттамаларын арттыру үшін күлдің ұнтағын пен полимерлік талшықтарды қолданудың перспективалылығын растайды. Алайда, осы уақытқа дейін цементтің, күл ұнтағын және талшық түрлерінің әртүрлі комбинацияларының құрылыстық беріктілігіне және ұзақ

мерзімділігіне әсерін сипаттайтын эксперименттік деректердің жеткіліксіз. Сондықтан да осы зерттеу осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған.

Құрылыстық 3D-баспасының белсенді дамуына қарамастан, оңтайлы реологиялық қасиеттерін қатайтылғаннан кейін жоғары беріктікпен үйлестіретін қоспалардың құрамдарын іріктеу міндеті әлі күнге дейін шешілмеген мәселелердің бірі.

Дәстүрлі цемент ерітінділері иілгіштіктің жеткіліксіздігімен, жарылуға бейімділігімен және едәуір шөгуімен сипатталады, бұл олардың аддитивті технологияларда қолданылуын шектейді. Күлді және синтетикалық талшықтарды қолдану осы кемшіліктерді жою үшін тиімді құрал болуы мүмкін, алайда экструзия кезінде талап етілетін тұрақтылыққа қол жеткізу үшін олардың цемент маркасымен және сумен оңтайлы арақатынасын белгілеу қажет.

Бұдан басқа, қабатты төсеу кезінде талшықтардың цемент матрицасымен өзара іс-қимылы, талшықтардың мөлшері мен түрінің пішінге төзімділігі мен жарықшаға төзімділігіне әсері мәселелері анықталмаған күйінде қалып отыр. Сол себептен, қоспа құрамын іріктеуге кешенді тәсілдің болмауы жаппай құрылысқа 3D-баспа технологиясын енгізуді шектейді.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Зерттеудің мақсаты – ұсақ түйіршікті фибробетондардың құрамын әзірлеу және оңтайландыру PC 400-D0 және PC маркаларының портландцементі негізінде күлдің ұнтағын және полимерлік талшықтардың әртүрлі түрлерін (ПП, ПЭ, нейлон) қоса отырып, құрылыстық 3D-басып шығару.

Мақсатқа қол жеткізу үшін қойылған міндеттер:

- цемент пен минералды қоспалар маркасының қоспалардың реологиялық қасиеттері мен пішінге төзімділігінің әсерлерін зерттеу;
- талшықтардың типі мен мөлшердерінің құрылымдық беріктілігі мен жарықшаға төзімділігінің әсерлерін анықтау;
- сығу және созу кезінде беріктілігіне, тығыздыққа және иілгіштік беріктілігіне кешенді сынақтар жүргізу;
- экструзия кезінде тұрақтылықты және басылған конструкциялардың ұзақтығын қамтамасыз ету үшін қоспалардың құрамын оңтайландыру.

Зерттеу әдістер мен қолдану материалдары. Зерттеудегі негізгі тұтқырлы компоненттер Каспий цемент зауыты (Қазақстан) өндірген PC 400-D0 және PC 500-D0 маркалы портландцементтер болды. Олардың химиялық құрамы мен физикалық-механикалық сипаттамалары берілген (1-кесте).

Кесте 1

Портландцементтердің физикалық-механикалық сипаттамалары

Көрсеткіштер	PC 400–D0	PC 500–D0
Тығыздығы, кг/м ³	3100	3150
Меншікті кеңістік, см ² /г	3200	3500
Ұстасудың басталуы, мин	95	90
Ұстасудың аяқталуы, мин	350	340
Сығылу беріктілігі (28 тәул.), МПа	42	52

PC 500-D0 маркалы цемент неғұрлым жоғары белсенділікке ие, бұл беріктіктің жедел дамуын және құрылыстық 3D-басып шығару үшін қажетті неғұрлым тығыз микроқұрылымды қамтамасыз етеді.

Минералдық қоспа ретінде құрамында SiO₂ – 57%, Al₂O₃ – 27%, Fe₂O₃ – 5%, CaO – 6% бар, МЕМСТ 25818-2014 сәйкес келетін Екібастұз ГРЭС-2

күлдің ұнтағы пайдаланылды. Күлді (цемент массасының 10-15%) қосу клинкер шығынын төмендетуге және қоспаның тиксотроптық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік берді.

Арматуралау үшін полимерлік талшықтардың үш түрі қолданылды:

– полипропиленді (PP) – тығыздығы 0,91 г/см³, беріктігі 550 МПа, ұзындығы 12 мм;

– полиэтиленді (PE) – тығыздығы 0,94 г/см³, беріктігі 400 МПа, ұзындығы 12 мм;

– нейлонды (PA) – тығыздығы 1,15 г/см³, беріктігі 700 МПа, ұзындығы 6 мм.

– талшықтардың әрбір түрі тұтқыр салмағының 0,5% мөлшерінде қосылады.

Қоспаларды дайындау және олардың құрамы. Эксперимент үшін қоспалардың төрт құрамы дайындалды. Барлық қоспалардың су-цементтік қатынасы бірдей ($W/C = 0,38$) және құрамында ірілік модулі 1,8 құм бар (2-кесте).

Кесте 2

Зерттелетін қоспалардың құрамы

Қоспалардың белгіленуі	Цемент	Күлдің ұнтағы, %	Талшықтардың түрлері	Талшықтардың үлесі, %
C1	PC 400–D0	10	PP	0,5
C2	PC 400–D0	10	PE	0,5
C3	PC 500–D0	15	PP	0,5
C4	PC 500–D0	15	PA	0,5

Күл мен талшықтардың мөлшерін таңдау ағымдылығын жоғалтпай экструзия кезінде қабаттардың тұрақты қалыптасуын қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін тиксотропия мен беріктікті алдын ала зерттеуге негізделген.

Араластыру планетарлық араластырғышта жүргізілді:

Алдымен құрғақ компоненттер (цемент, құм, күл) 3 минут бойы араластырылған кейін біркелкі бөлу үшін төмен айналымда (60 айн/мин дейін) талшықтар енгізілді. Содан кейін су қосылады, қоспа бір текті масса алынғанға дейін тағы 2 минут араластырылады.

Сынау әдістері. Сынақтар құрылыс материалдары зертханасында (20 ± 2)°C температурада және ылғалдылығы (60 ± 5)% болған кезде жүргізілді.

– жұмысқа жарамдылығы (конустың төгілуі) – MEMСт 10181 бойынша;

– сығылу беріктілігі – ASTM бойынша 1, 7 және 28 тәуліктен кейін с39;

– жарылу кезіндегі беріктілігі (созылуға) – ASTM C496 бойынша;

– иілгіштік беріктілігі – 1, 15, 35 және 50 мин сайын мәндерін тіркей отырып, ASTM с109 бойынша;

– 12730.1. MEMСт бойынша орташа тығыздығы.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Зерттеулер бойынша алынған нәтижелер бойынша қоспалардың реологиялық қасиеттері келтірілген (3-кесте).

PC 400-D0 цементімен қоспалар (C1, C2) неғұрлым жоғары қозғалғыштықты көрсетті, бұл цемент матрицасының тұтқырлығы аз болуымен түсіндіріледі. PC 500-D0 C3 құрамы азырақ (165 мм), бірақ бұл ретте қабаттың тұрақты пішінін сақтаған, бұл экструзия технологиясы үшін өте маңызды. Сол себептен цемент маркасының жоғарылауы ағымдылықты төмендетеді, бірақ пішін төзімділігі мен ерте беріктілігін арттырады.

Кесте 3

Зерттелетін қоспалардың реологиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	C1	C2	C3	C4
Конусты тарқату, мм	180	175	165	170
Ұстасудың басталу уақыты, мин	95	100	90	92
Ұстасудың аяқталу уақыты, мин	355	360	340	345
Тығыздығы, кг/м ³	2410	2400	2385	2390

Сығылуға және созылуға беріктілігін анықтау үшін эксперименттердің нәтижелері келтірілген. Нәтижелер бойынша сығылуға (52 МПа) және созылуға (5,9 МПа) беріктіліктің ең жоғары көрсеткіштері C3 қоспасын көрсетті (PC 500-D0 + 15% күлді алып кету + 0,5% PP) (4-кесте).

Кесте 4

Зерттелетін қоспалардың төзімділік көрсеткіштері

Жасы, тәулік	Сығылуға беріктілік, МПа	Созылуға беріктілік, МПа
	C1	C2
1	25	24
7	36	35
28	50	48

Полиэтилен және нейлон талшықтары бар құрамдар (C2, C4) біршама аз мәндерді көрсетті, бұл талшықтардың цемент матрицасымен неғұрлым әлсіз тіркелуіне байланысты.

Осылайша, полипропилен талшықтары 3D басып шығару кезінде қабаттардың біркелкі қалыптасуы үшін маңызды болып табылатын беріктілік пен икемділіктің оңтайлы қатынасын қамтамасыз етеді.

Сығылуға (52 МПа) және созылуға (5,9 МПа) беріктіліктің ең жоғары көрсеткіштері C3 қоспасын көрсетті (PC 500-D0 + 15% күлдің ұнтағы + 0,5% PP).

Полиэтилен және нейлон талшықтары (C2, C4) бар құрамдар бірнеше аз мәнді көрсетті, бұл талшықтардың цемент матрицасымен біршама әлсіз ілінісуіне байланысты. Сол себептен полипропилен талшықтары беріктілік пен икемділіктің оңтайлы арақатынасын қамтамасыз етеді, бұл 3D-басып шығару кезінде қабаттарды біркелкі қалыптастыру үшін маңызды болып табылады (5-кесте).

Кесте 5

Зерттелетін қоспалардың иілгіштік беріктілігі

Уақыт, мин	C1	C2	C3	C4
1	0,20	0,18	0,22	0,19
15	1,00	0,95	1,10	1,00
35	2,45	2,40	2,60	2,50
50	3,45	3,30	3,60	3,40

Қоспалардың иілгіштік беріктігі алғашқы 50 минутта сызықтық ұлғаяды, бұл құрылымның тұрақты қалыптасуын көрсетеді.

Ең жоғары мәндер С3 – 3,6 МПа құрамында тіркелген, бұл қабатты төсеу кезінде қабаттардың жоғары орнықтылығын көрсетеді.

С1 құрамы салыстырмалы нәтижелер көрсетті (3,45 МПа), бірақ тығыздығы мен жылдамдығы аз болады. Сондықтан РС 500-D0 цемент және РР талшықтары экструзиялық басып шығару үшін оңтайлы жағдайларды қамтамасыз ете отырып, неғұрлым берік ерте құрылымды қалыптастыруға ықпал етеді

Зерттеу нәтижелері бойынша РС 500-D0 жоғары белсенді цементтің, (15%) күл ұнтағының және полипропилен талшықтарының (0,5%) үйлесімі құрылыстық 3D-баспасына арналған оңтайлы қасиеттерге ие композицияны қалыптастыратынын растады.

Қорытынды. Қорытындылай келе цемент маркасын арттыру қоспаның ерте беріктігін арттырады, бұл қабаттарды басу кезінде тұрақтылықты қамтамасыз етеді.

Күлді қолдану тиксотроптық қасиеттерін жақсартады және цемент шығынын азайтуға мүмкіндік бере отырып, су қажеттілігін төмендетеді.

Полипропилен талшықтары жарықшалардың дамуына кедергі келтіретін микробайланыстар жасау арқылы микроқұрылымды жақсартады.

Алынған нәтижелер Nematollahi (2018) и Lv (2022), онда РР-талшықтарды мөлшерлеуде беріктіктің 0,3-0,5% ұқсас артуы байқалған.

Осылайша, құрылыс 3D-баспа технологиясы үшін оңтайлы құрам РС 500-D0 + 15% күлдің ұнтағы + 0,5% полипропилен талшықтары болып табылады, олар: қысымға беріктігі 52 МПа, иілгіштік беріктілігі 3,6 МПа, қабатталусыз экструзия кезінде пішіннің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Өзірленген қоспалар аз қабатты құрылыс пен өндірісте 3D-баспа әдісімен сәулеттік әрлеу элементтерін қолдану үшін жоғары әлеуетті көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Nematollahi B., Xia J., Sanjayan J. Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – No. 12. – P. 2352.
2. Zhu W., Pan D., Geng J., Ma C. Experimental study on the influence of fly ash on early age performance and buildability of 3D printable concrete // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 313. – P. 125512.
3. Kazemian A., Yuan X., Cochran J.K., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixtures // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639-647.
4. Ma G., Li Z., Wang L. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – No. 2. – P. 270.
5. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11. – No. 3. – P. 209-225.
6. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // *Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 45. – P. 1221-1232.
7. Nerella V., Mechtcherine V. Performance of 3D printed mortars containing fibres: Influence on fresh and hardened state behavior // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 97. – P. 31-40.

8. Zareiyan B., Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete // Automation in Construction. – 2017. – Vol. 83. – P. 307-317.
9. Sanjayan J., Nematollahi B., Xia M., Marchment H. Effect of surface moisture on interlayer strength of 3D printed concrete // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 172. – P. 468-475.
10. Lv X., Chen Y., Guo J., Zhu H. Mechanical properties and microstructure of fiber-reinforced 3D printable concrete with supplementary cementitious materials // Frontiers in Materials. – 2022. – Vol. 9. – P. 859322.

Зерттеу жұмыстары ҚР ҒЖБМ Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылған АР26197151 «3D басып шығаруға арналған қалдықтарға негізделген тиімді ұсақ түйірішті фибробетондар технологиясы» жоба аясында орындалды.

Материал редакцияға 15.01.26 түсті, 11.03.26 қабылданды.

Л.Б. Аруова¹, А.К. Тлеубаева², Л.А. Жаксылыкова¹, Д.Ж. Артыкбаев²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауезова,
Шымкент, Казахстан

СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ФИБРОБЕТОНОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДАХ ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ

Аннотация. В данной работе представлено исследование по разработке эффективных мелкозернистых фибробетонов, предназначенных для строительной 3D-печати. В качестве вяжущего использовались портландцементы марок РС 400-D0 и РС 500-D0, частично замещённые золой-уносом. Для повышения трещиностойкости и пластичности в состав были введены различные типы полимерных волокон – полипропиленовые, полиэтиленовые и нейлоновые. Целью исследования являлась оптимизация состава бетонной смеси для обеспечения необходимой текучести и формоустойчивости при сохранении высоких прочностных характеристик. Проведённые испытания включали определение реологических свойств, прочности на сжатие и растяжение, плотности и пластической прочности. Установлено, что применение цемента марки РС 500-D0 в сочетании с полипропиленовыми волокнами обеспечивает повышение прочности на сжатие до 50 МПа и увеличение прочности на растяжение до 20% по сравнению с контрольными составами. Добавление золы-уноса позволило снизить расход цемента и повысить удобоукладываемость смеси. Полученные результаты демонстрируют перспективность разработанных смесей для аддитивных технологий строительства, обеспечивая повышение долговечности и снижение себестоимости строительных материалов.

Ключевые слова: 3D-печать, фибробетон, портландцемент, зола-уноса, полипропиленовые волокна, прочность, долговечность.

L. Aruova¹, A. Tleubaeva¹, L. Zhaksylykova¹, D.Zh. Artykbaev²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

**PROPERTIES OF FINE-GRAINED FIBER-REINFORCED CONCRETE
MADE FROM INDUSTRIAL WASTE FOR 3D PRINTING**

Abstract. This paper presents a study on the development of effective fine-grained fiber-reinforced concrete for 3D construction printing. Portland cements of grades PC 400-D0 and PC 500-D0, partially replaced with fly ash, were used as binders. To increase crack resistance and plasticity, various types of polymer fibers were added to the composition, including polypropylene, polyethylene, and nylon. The aim of the study was to optimize the composition of the concrete mix to ensure the necessary fluidity and dimensional stability while maintaining high strength. The tests conducted included determining rheological properties, compressive and tensile strength, density, and plastic strength. It was found that the use of PC 500-D0 cement in combination with polypropylene fibers increases compressive strength to 50 MPa and tensile strength by 20% compared to the control compositions. The addition of fly ash reduced cement consumption and improved the workability of the mixture. The results demonstrate the promise of the developed mixtures for additive construction technologies, ensuring increased durability and reduced cost of building materials.

Keywords: 3D printing, fiber-reinforced concrete, Portland cement, fly ash, polypropylene fibers, strength, durability.