

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ
ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՃԱՐՏԱՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՇԻՆԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՍՈՒՐԵՆ ԱՇՈՏԻ ՄԱԼՈՒՄՅԱՆ

**ԱԾԽԱԾՆԱՅԻՆ ՆԱՆՈՒՈՂՈՎԱԿՆԵՐՈՎ ՇԱՂԱԽԻ ԵՎ ԲԵՏՈՆԻ
ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ**

Ե.23.01 - «Շինարարական կոնստրուկցիաներ, շենքեր, կառույցներ, շինարարական
նյութեր և շինարարական մեխանիկա» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА АРМЕНИИ

СУРЕН МАЛУМЯН АШОТОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ И
БЕТОНОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 05.23.01 – “СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ,
СООРУЖЕНИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА”

ЕРЕВАН 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր
Մանուկ Գևորգի Բարսեղյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տեխ.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Մարիա Մարտինի Բադալյան
Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու
Արամ Սպարտակի Մանուկյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ.-ի դեկտեմբերի 24-ին ժամը 14⁰⁰-ին Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարանի (ՃՀԱՀ) կից գործող ՀՀ ԿԳՄՍՆ ԲԿԳԿ-ի 030 մասնագիտական խորհրդում:

Հասցեն՝ 0009, ք. Երևան, Տերյան փողոց 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՃՀԱՀ-ի գրադարանում:

Հասցեն՝ 0079, ք. Երևան Մառի փողոց 17/1:

Սեղմագրին կարելի է ծանոթանալ ՃՀԱՀ-ի պաշտոնական կայքերում՝ www.nuaca.am

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ.-ի նոյեմբերի 24-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

տ. գ. թ., դոցենտ



Ս. Մ. Էդնատոսյան

Тема диссертации утверждена в Национальном университете архитектуры и строительства
Армении

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук
Манук Геворкович Барсегян

Официальные оппоненты:

доктор тех. наук, профессор
Мария Мартиновна Бадалян
кандидат. физ.-мат. наук
Арам Спартакovich Манукян

Ведущая организация:

Институт механики НАН РА

Защита состоится 24-го декабря 2025 году в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета 030 МОНКС РА КВОН, действующего при Национальном университете архитектуры и строительства Армении (НУАКА).

Адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна 105:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НУАКА по адресу: 0079, г. Ереван ул. Марра 17/1.

С авторефератом можно ознакомиться на официальном сайте НУАКА: www.nuaca.am.

Автореферат разослан 24-го ноября 2025 г.

Ученый секретарь специализированного совета:

кандидат тех. наук, доцент



С.М. Эгнатосян

Աշխատանքի արդիականությունը

Հինարարության ոլորտը համարվում է միջավայրի ձևավորման կարևորագույն բաղադրիչներից մեկը: Այսօր ցեմենտային կապակցանյութով շաղախը և բետոնը ամենալայն կիրառվող շինարարական նյութերից են: Դրանք կիրառվում են հարթեցման, հարդարման և նմանատիպ այլ աշխատանքներում, սակայն հիմնականում կրող կոնստրուկցիաներում [1]:

Հինարարական նյութերի հատկությունների բարելավումը գիտական արդի ուղղություններից է: Վերջին տասնամյակներին լայնորեն ուսումնասիրվում են ածխածնային նանոմասնիկներով (ԱՆՄ), մասնավորապես՝ բաղադրակազմերում միաշերտ ածխածնային նանոխողովակներ (ՄԱՆԽ) և բազմաշերտ ածխածնային նանոխողովակներ (ԲԱՆԽ) պարունակող շաղախների և բետոնների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները: ԱՆԽ-ներն իրենցից ներկայացնում են 0.4-3 նմ -ից մինչև 1.4-100 նմ տրամագծի (կախված շերտերի քանակից) և առավելագույնը 1սմ երկարությամբ հավելանյութեր: Դրանք օժտված են մեծ ձգման ամրությամբ (100-300 ԳՊա) և մեծ Յունգի մոդուլով (1ՏՊա), ինչն էականորեն նպաստում է բաղադրանյութի ամրության, կոշտության և ճաքակայունության աճին [2]: ԱՆԽ-ներն ունեն նաև բարձր էլեկտրահաղորդականություն (0.1-100 Սմ/մ) [3-5], որը հանգեցնում է ցեմենտային կապակցանյութով կոմպոզիտային նյութի էլեկտրական հատկությունների բարելավմանը: Էլեկտրահաղորդականության բարելավում, ինքնազգայունության (self sensing) և պիեզոդիմադրության (piezoresistivity) հատկությունների ձեռքբերում [6]:

Վերջին տարիներին մեծ քանակությամբ փորձարարական և տեսական հետազոտություններ են կատարվել տարբեր նանոչափանի մասնիկների հավելումով ցեմենտային կապակցանյութով շաղախների և բետոնների ֆիզիկամեխանիկական և էլեկտրական հատկությունների բարելավման ուղղությամբ, ինչն էականորեն կնպաստի քաղաքացիական, արդյունաբերական և պաշտպանական շինարարության ենթակառուցվածքների կատարելագործմանն ու արդիականացմանը:

Սույն աշխատանքը միտված է փորձարարական և թվային հետազոտմամբ վերոնշյալ շինարարական նյութերի ֆիզիկամեխանիկական և էլեկտրական հատկությունների մանրակրկիտ ուսումնասիրությանը և դրանց կիրառման խթանմանը:

Հետազոտության նպատակը

Հետազոտության նպատակն է ուսումնասիրել նանոշաղախների և նանոբետոնների ֆիզիկամեխանիկական, ինչպես նաև էլեկտրական հատկությունները՝ կախված ԲԱՆԽ-ների չափերի հարաբերակցության, ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ դրանց կոնցենտրացիայի փոփոխությունից՝ մասնավորապես, պարզել կոնցենտրացիայի օպտիմալ արժեքը նանոխողովակների տարբեր չափերի դեպքում և հակառակը: Ուսումնասիրություններն իրականացվել են փորձարարական և թվային եղանակներով:

Հետազոտության խնդիրները

Փորձարարական եղանակով իրականացնել.

- Մշակված բաղադրակազմերով շաղախի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների, մասնավորապես՝ սեղմման և ծռման ամրությունների ուսումնասիրությունը՝ կախված ցեմենտային կապակցանյութի զանգվածի նկատմամբ նանոխողովակների կոնցենտրացիայի փոփոխությունից,

- Մշակված բաղադրակազմերով շաղախի և բետոնի սեղմման ամրության ուսումնասիրությունը՝ կախված նանոխողովակների չափերի փոփոխությունից,
- Նանոխողովակներով ցեմենտային շաղախների էլեկտրական հատկությունների, մասնավորապես՝ էլեկտրական դիմադրության և պիեզոդիմադրության ուսումնասիրությունը՝ կախված նանոխողովակների կոնցենտրացիայի փոփոխությունից, Թվային եղանակով իրականացնել.
- ԲԱՆԽ-ներով ցեմենտային նանոբետոնի առաձգականության մոդուլի փոփոխության գնահատում՝ կախված նանոխողովակների բերված կոնցենտրացիայից և արտաքին տրամագծից,
- Սեղմման դեպքում նանոբետոնների նորմալ լարումների վերլուծություն՝ կախված նանոխողովակների բերված կոնցենտրացիայից և արտաքին տրամագծից:

Հետազոտության առարկան

ԲԱՆԽ-ներով շաղախի և բետոնի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների որոշումը, կախված նանոխողովակների արտաքին տրամագծի, չափերի հարաբերակցության, ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ դրանց կոնցենտրացիայի փոփոխությունից:

Հետազոտության մեթոդաբանությունը

Դիտարկվել են միևնույն տեսակի ու մակնիշի ցեմենտով պատրաստված շաղախե և բետոնե փորձանմուշներ՝ ԲԱՆԽ-ներով և առանց դրանց: Փորձանմուշները պատրաստվել են լաբարատոր պայմաններում, որոնք տեսակավորվել են ըստ հետազոտության խնդիրների: Փորձանմուշները ենթարկվել են փորձարկումների և ուսումնասիրվել են դրանց ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները (սեղմման և ծռման ամրություն, էլեկտրահաղորդականություն, պիեզոդիմադրության հատկություն և այլն): Ըստ ստացված տվյալների կազմվել են կոնցենտրացիայի, չափերի հարաբերության և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների կախվածության գրաֆիկներ, ինչպես նաև որոշվել է ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ նանոխողովակների կոնցենտրացիայի օպտիմալ արժեքը դրանց չափերի հարաբերակցության տարբեր արժեքների դեպքում և հակառակը: Բացի փորձարարական հետազոտությունից, իրականացվել է ԲԱՆԽ-ներով բետոնե միկրոնմուշների թվային հետազոտություն վերջավոր տարրերի մեթոդով՝ “ANSYS” ծրագրային փաթեթով: Ստացված արդյունքները համեմատվել են փորձնական արդյունքների հետ:

Աշխատանքի գիտական նորույթը

- Փորձարարական հետազոտությունների միջոցով՝ շաղախների սեղմման և ծռման ամրության բարելավման նպատակով, համեմատաբար մեծ արտաքին տրամագծով նանոխողովակների դեպքում ստացվել է նոր օպտիմալ կոնցենտրացիա (ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ),
- Ընտրված բաղադրակազմով միևնույն չափերի ԲԱՆԽ-ներով շաղախի էլեկտրահաղորդականության և պիեզոդիմադրության հատկությունները բարելավվում են նանոխողովակների համեմատաբար փոքր կոնցենտրացիաների դեպքում,
- Նոր մշակված բաղադրակազմերի և թվային մոդելավորման վրա հիմնված փորձարարական և թվային հետազոտությունների արդյունքում ստացվել է, որ

շաղախում և բետոնում ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ նանոխողովակների տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում համեմատաբար փոքր արտաքին տրամագիծ և մեծ երկարություն/արտաքին տրամագիծ հարաբերակցություն ունեցող նանոխողովակների կիրառումն առավել արդյունավետ է նյութի մեխանիկական հատկությունների բարելավման տեսանկյունից:

Աշխատանքի գործնական արժեքը

Հաշվի առնելով իրականացված փորձարարական և թվային հետազոտությունների արդյունքները՝ ԲԱՆԽ-ների կիրառումը նպաստում է ցեմենտային համակարգերի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների բարելավմանը նաև նանոչափային մակարդակում, հնարավորություն ստեղծելով բետոնե և երկաթբետոնե կոնստրուկցիաներում, ինչպես նաև հարդարման և հարթեցման աշխատանքներում դրանց կիրառմանը՝ նանոչափային ճաքերի առաջացումը և զարգացումը նվազեցնելու նպատակով: Բացի այդ, ԲԱՆԽ-ների կիրառումը հնարավորություն է ստեղծում առանց նյութի զանգվածի ավելացման՝ միևնույն մակնիշի պորտլանդցեմենտով ստանալ ավելի բարձր ամրության դասի շաղախ և բետոն, ինչը կնպաստի նյութի արդյունավետ օգտագործմանը, հատկապես ՀՀ-ում հավաքովի ծանր կոնստրուկցիաների արտադրության և տեղափոխման գործընթացներում, ինչպես նաև բետոնի 3D տպագրության շինարարական տեխնոլոգիաներում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Բազմաշերտ ածխածնային նանոխողովակների միևնույն արտաքին տրամագծի և ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ համեմատաբար մեծ կոնցենտրացիայի դեպքում մշակված բաղադրակազմով շաղախի սեղմման և ծռման ամրություններն աճում են: Միևնույն կոնցենտրացիայի դեպքում, համեմատաբար փոքր արտաքին տրամագծով նանոխողովակներով շաղախի սեղմման ամրության աճն առավելագույնն է:
2. Համեմատաբար փոքր կոնցենտրացիայով նանոխողովակներով շաղախի էլեկտրահաղորդականությունն աճում է փորձանմուշների 14օր պահորակումից հետո: Պարբերական սեղմման ժամանակ ածխածնային նանոշաղախները ցուցաբերում են պիեզոդինամիկության հատկություն: Նանոշաղախի սկզբնական էլեկտրական դիմադրությունն անընդհատ աճում է պարբերական բեռնմանը զուգընթաց: Նանոխողովակների փոքր և միջին կոնցենտրացիաների դեպքում շաղախի պիեզոդինամիկության արձագանքը կայուն է:
3. Փոքր տրամագծով և չափերի մեծ հարաբերակցությամբ նանոխողովակների կոնցենտրացիաների ուսումնասիրված արժեքների դեպքում նանոբետոնի սեղմման ամրությունն աճում է: Դիտարկված բոլոր փորձանմուշների սեղմման ամրության ֆունկցիոնալ կախումը նանոխողովակների կոնցենտրացիայից ունի ոչ մոնոտոն վարք:
4. Թվային մեթոդով մոդելավորված առանցքային սեղմման ենթարկվող համեմատաբար փոքր տրամագծով նանոխողովակներով բետոնե նմուշների լայնական հատույթի միջին հատվածում լարումները զգալի փոքրանում են: Լայնական հատույթի անկյունային հատվածի համար ամենափոքր լարումները ստացվում են նանոխողովակների միջին չափի տրամագծի դեպքում: Դիտարկված մոդելի դեպքում նանոխողովակների կոնցենտրացիայի աճին զուգահեռ բաղադրանյութի առաձգականության մոդուլը երեք գլխավոր ուղղություններով

աճում է, մինչդեռ նանոխողովակների չափերի փոփոխությունն էական ազդեցություն վերջինիս վրա չի թողնում:

Հետազոտության արդյունքների հավաստիությունը

Գիտական բոլոր դրույթների, կատարված եզրակացությունների և առաջարկությունների հավաստիությունն ու հիմնավորվածությունը հաստատվում են փորձարարական և թվային հետազոտությունների նշանակալի ծավալով, ստացված արդյունքների վերլուծություններով և արդեն իսկ հայտնի արդյունքների հետ համեմատությամբ:

Փորձարարական ուսումնասիրություններն իրականացվել են համաձայն գործող պետական ստանդարտների, օգտագործվել են ժամանակակից ֆիզիկական, ֆիզիկաքիմիական և մեխանիկական հետազոտման եղանակները:

Լաբորատոր փորձարարական և թվային ուսումնասիրություններն իրականացվել են ՃՀՀԱՀ-ի «Շինարարական նյութերի և պատրաստվածքների ուսումնագիտափորձարարական», ինպես նաև Ա.Բ.Նալբանդյանի անվան «Նանոգիտության և տեխնոլոգիաների նորարարական կենտրոն», «Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ» -ի «պինդ մարմնի ֆիզիկա» լաբորատորիաներում:

Աշխատանքի նախափորձահավանությունը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են ՃՀՀԱՀ-ի «Շինարարական նյութերի, պատրաստվածքների և կոնստրուկցիաների արտադրություն», «Շինարարական կոնստրուկցիաներ» ամբիոնների և «Մաթեմատիկա, շինարարական մեխանիկա և ֆիզիկա» դեպարտամենտի համատեղ նիստում:

Ատենախոսության հրապարակումները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրապարակված են 4 գիտական հոդվածներում, որոնցից 1-ը՝ Scopus և Web of Science գիտատեղեկատվական շտեմարանում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 3 գլխից, ընդհանուր եզրակացություններից, հապավումների և գրականության ցանկից: Յուրաքանչյուր գլուխ սկսվում է քննարկվող գրականության համառոտ ակնարկով: Ատենախոսության ծավալը 104 էջ է, որն իր մեջ ընդգրկում է 35 նկար, 15 աղյուսակ, գրականության 146 անվանում:

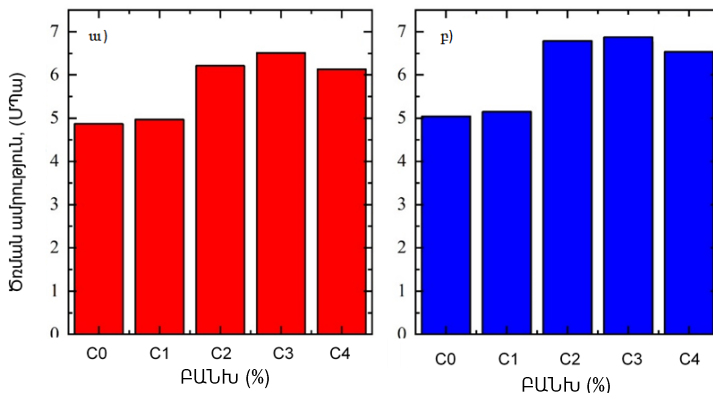
ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱՌՈՏ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Առաջին գլուխը վերաբերում է ԲԱՆԽ-ներով ցեմենտային կապակցանյութով շաղախների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների հետազոտմանը, դրանց առնչվող գրականության հավաքագրմանն ու վերլուծությանը: Նախապես մշակված բաղադրակազմով պատրաստվել են 40մմ×40մմ×160մմ չափերի պրիզմայաձև փորձանմուշներ նանոխողովակներով և առանց նանոխողովակների: Ուսումնասիրվել է միևնույն չափերի բազմաշերտ նանոխողովակների կոնցենտրացիայի փոփոխության ազդեցությունը ցեմենտային շաղախի ծոման և սեղմման ամրության վրա: Աղյուսակ 1-ում և Նկ. 1-2-ում ներկայացված են 20-30 նմ արտաքին տրամագծով և 10-30 մկմ երկարությամբ միևնույն TNM5 տեսակի ԲԱՆԽ-ների կոնցենտրացիայի փոփոխության (0.1, 0.2, 0.3 և 0.35 % ըստ ցեմենտի զանգվածի) ազդեցությունը ցեմենտային շաղախի ծոման և սեղմման ամրության վրա:

Աղյուսակ 1. TNM5 տեսակի ԲԱՆԽ-ներով շաղախների բաղադրակազմերն և վերջինիս ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը

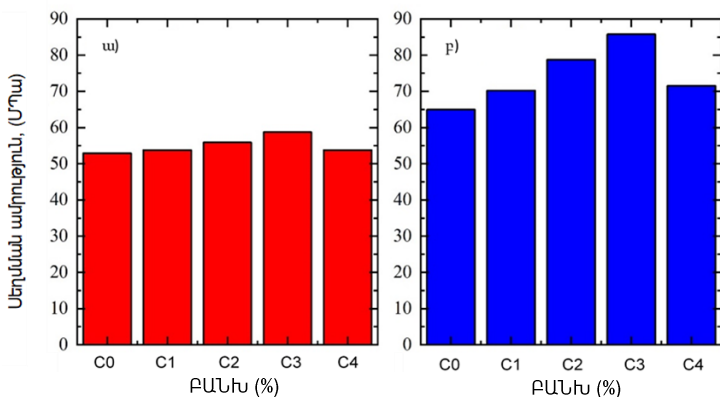
N	Ավազ, գ	Ցեմենտ Մ500, գ	Ջ/Ց	Ջուր, մլ	Դիսպերս. "Disperbyk", գ	ԲԱՆԽ TNM5, %	Միջին խտություն, գ/սմ ³	Ծոման ամրություն, ՄՊա		Սեղմման ամրություն, ՄՊա	
								7 օր	28 օր	7 օր	28 օր
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2400	900	0.47	423	-	-	2.10	4.87	5.04	52.94	64.99
2					0.9	0.1	2.10	4.94	5.15	53.80	70.30
3					1.8	0.2	2.10	6.21	6.79	55.88	78.79
4					2.7	0.3	2.20	6.51	6.88	58.73	85.79
5					3.15	0.35	2.20	6.13	6.54	53.78	71.56

Նկար 1 և 2-ում C0, C1, C2, C3 և C4-ը համապատասխանում են TNM5 ԲԱՆԽ-ների 0, 0.1, 0.2, 0.3 և 0.35 % կոնցենտրացիաներին ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ:



Նկար 1. TNM5 նանոխողովակներով փորձանմուշների ծոման ամրությունները ա) 7 և բ) 28 օրական ամրացման հասակում

Նկար 1-ում ներկայացված ծոման փորձարկման արդյունքներից, ցույց է տրվել, որ 20-30 նմ արտաքին տրամագծով և 10-30 մկմ երկարությամբ միևնույն տեսակի TNM5 նանոխողովակների 0.3% կոնցենտրացիայի դեպքում 28 օրական շաղախի ծոման ամրությունն աճել է 36.5%-ով, որի հետևանքով նանոշաղախները ձեռք են բերել 6.88ՄՊա ծոման ամրություն:



Նկար 2. TNM5 նանոխողովակներով փորձամուշների սեղմման ամրությունները ա) 7 և բ) 28 օրական ամրացման հասակում

Համաձայն Նկ. 2-ում բերված սեղմման փորձարկման արդյունքների, ստացվել է, որ TNM5 նանոխողովակների 0.3% կոնցենտրացիայի դեպքում 28 օրական շաղախի սեղմման ամրությունն աճել է 32.0%-ով, որի շնորհիվ նանոշաղախները ձեռք են բերել 85.59ՄՊա սեղմման ամրություն:

Ուսումնասիրվել է չափերի փոփոխության արգելադրությունը շաղախների սեղմման ամրության վրա: Աղյուսակ 2-ում ներկայացված են 3 տարբեր երկարություն/արտաքին տրամագիծ հարաբերակցությամբ ԲԱՆԽ-ների տեխնիկական բնութագրերը (TNM0, TNM1, TNM5):

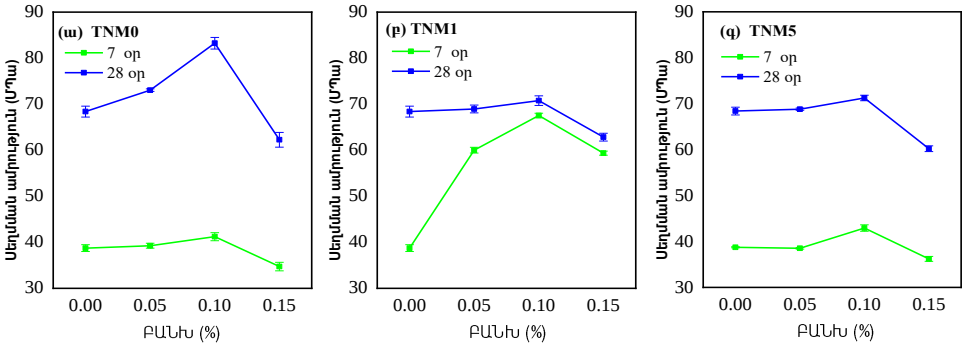
Աղյուսակ 2. Դիտարկված ԲԱՆԽ-ների հիմնական տեխնիկական բնութագրերը

ԲԱՆԽ-ների տեսակը	Արտաքին տրամագիծը, նմ	Երկարությունը, մկմ	Տեսակարար մակերես, մ ² /գ	Մաքրության աստիճանը, %
TNM0	4 - 8	10 - 20	>380	>98
TNM1	5 - 15	10 - 30	>220	>98
TNM5	20 - 30	10 - 30	>110	>98

Աղյուսակ 3-ում և Նկ. 3-ում բերված են Աղ. 2-ում ներկայացված տարբեր չափերի ԲԱՆԽ-ներով շաղախների սեղմման ամրությունների հետազոտության արդյունքները, համապատասխանաբար 7 և 28 օրական նմուշների համար:

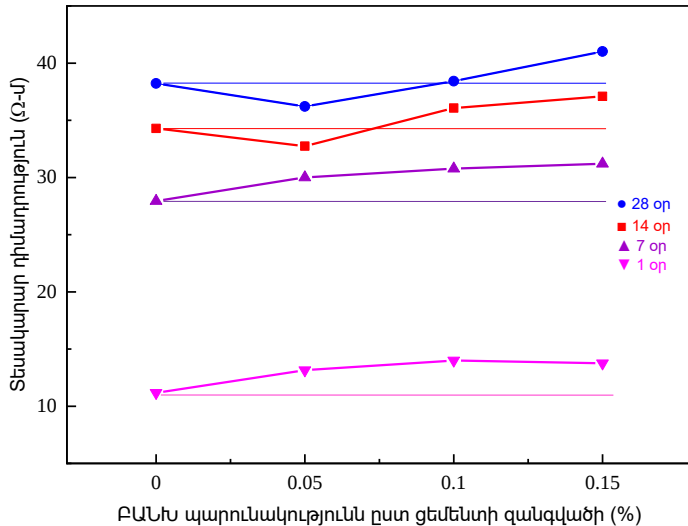
Աղյուսակ 3. TNM0, TNM1, TNM5 ԲԱՆԻ -ներով և առանց դրանց շաղախների սեղմման ամրության և խտության փորձարարական արդյունքները

N	Ավազ, գ	Ցեմենտ Մ500, գ	Ջ/Ց	Ջուր, մլ	Դիսպերս. "Disperbyk", գ	ԲԱՆԻ TNM, %	Միջին խտութ., գ/սմ³	Սեղմման ամրութ., ՄՊա	
								7 օր	28 օր
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TNM0									
1	2200	880	0.47	414	-	-	2.14	38.74	68.39
2					0.44	0.05	2.16	39.26	73.05
3					0.88	0.1	2.20	41.22	83.24
4					1.32	0.15	2.20	34.73	62.27
TNM1									
1	2200	880	0.47	414	-	-	2.14	38.74	68.39
2					0.44	0.05	2.18	60.01	68.96
3					0.88	0.1	2.20	67.54	70.77
4					1.32	0.15	2.21	59.35	62.84
TNM5									
1	2200	880	0.47	414	-	-	2.14	38.74	68.39
2					0.44	0.05	2.15	38.51	68.80
3					0.88	0.1	2.18	42.92	71.24
4					1.32	0.15	2.18	36.21	60.19



Նկար 3. ա) TNM0, բ) TNM1 և գ) TNM5 ԲԱՆԻ -ներով փորձանմուշների սեղմման ամրությունները 7 և 28 օրական ամրացման հասակում

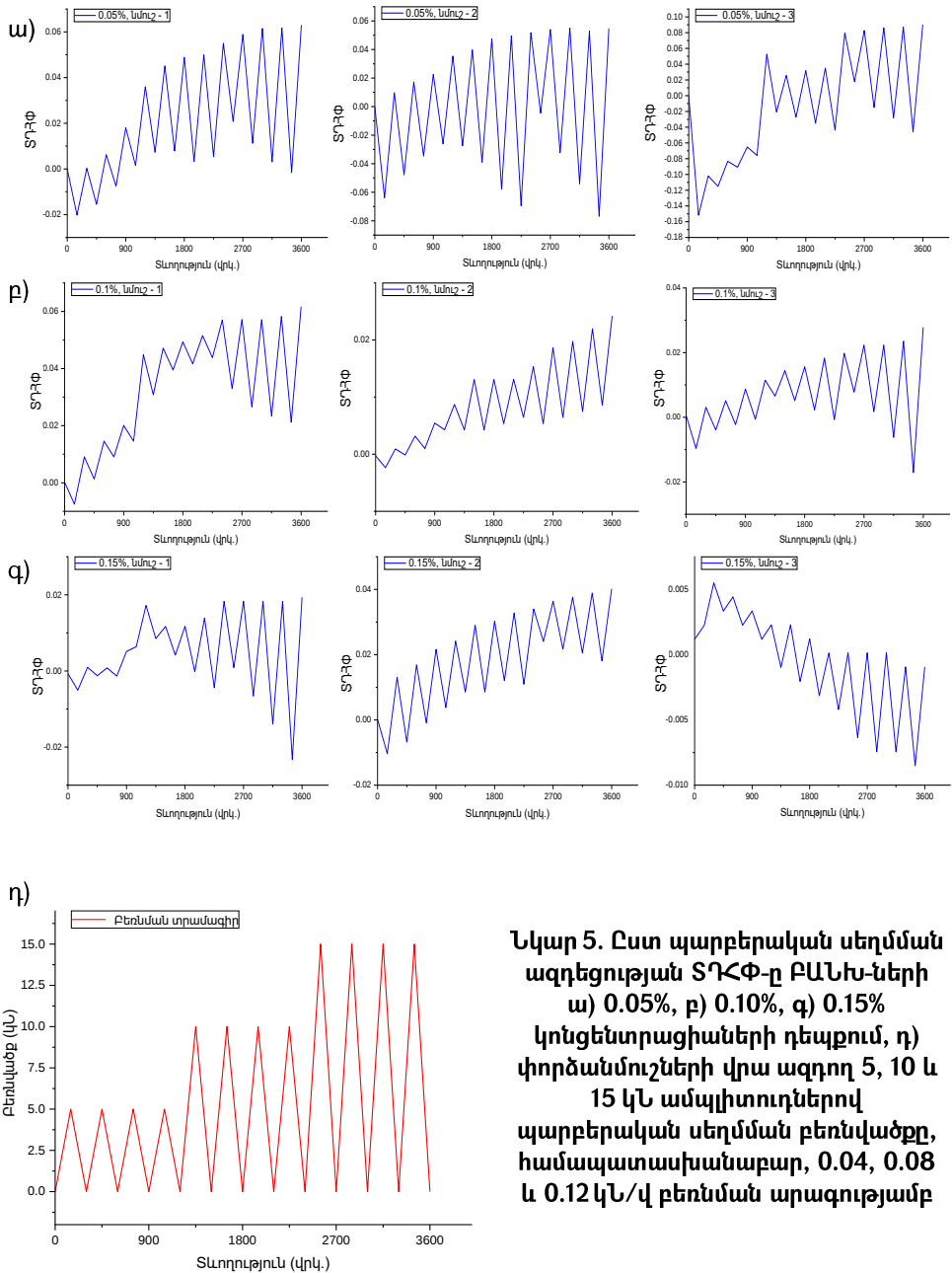
ԲԱՆԻՆ-ների չափերի փոփոխության ազդեցության ուսումնասիրության արդյունքում ստացվել է, որ համեմատականորեն փոքր 4-8 նմ տրամագծով նանոխողովակներով շաղախների սեղմման ամրության առավելագույն աճը եղել է 21.7%, միջին 5-15 նմ-ի դեպքում՝ 3.5%, իսկ մեծ 20-30 նմ-ի դեպքում՝ 4.2%, վերջիններիս 0.1% կոնցենտրացիայի դեպքում: Ուստի, ամենամեծ չափերի հարաբերակցությամբ և փոքր արտաքին տրամագծով ԲԱՆԻՆ-ների դեպքում, շաղախները ցուցաբերել են համեմատաբար բարձր մեխանիկական հատկություններ:



Նկար 4. Փորձանմուշների տեսակարար էլեկտրական դիմադրությունը ԲԱՆԻՆ-ների տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում ամրացման 1,7,14 և 28 օրական հասակում

Համաձայն Նկ.4-ում ներկայացված գրաֆիկների ԲԱՆԻՆ-ներով շաղախների էլեկտրահաղորդականության աճը նկատվում է փորձանմուշների 14օր պահորակումից հետո ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ համեմատաբար փոքր կոնցենտրացիայով (0.05%) նանոխողովակների դեպքում: Ըստ որի, ժամանակի ընթացքում փորձանմուշում խոնավության նվազմանը զուգընթաց նանոխողովակների էլեկտրահաղորդիչ ազդեցությունը նկատելի է դառնում, որը կարևոր բնույթ է կրում ցեմենտային շաղախների էլեկտրական ինքնազգայունության հատկության բարելավման համար:

ԲԱՆԻՆ-ներով շաղախները ենթարկվելով պարբերական սեղմման ազդեցության, ցուցաբերել են պիեզոդիմադրության հատկություն (Նկ. 5.): Չափումներից ակնհայտ է, որ փորձանմուշների սկզբնական էլեկտրական դիմադրությունն անընդհատ աճում է պարբերական բեռնմանը զուգընթաց: ԲԱՆԻՆ-ների 0.05 և 0.1% կոնցենտրացիաների դեպքում շաղախի պիեզոդիմադրության արձագանքը կայուն է՝ տեսակարար էլեկտրական դիմադրության հարաբերական փոփոխության ($S/\langle\Phi\rangle$) փոքր շեղմամբ:



Նկար 5. Ըստ պարբերական սեղմման ազդեցության $S7\Phi$ -ը ԲԱՆԽ-ների ա) 0.05%, բ) 0.10%, գ) 0.15% կոնցենտրացիաների դեպքում, դ) փորձանմուշների վրա ազդող 5, 10 և 15 կՆ ամպլիտուդներով պարբերական սեղմման բեռնվածքը, համապատասխանաբար, 0.04, 0.08 և 0.12 կՆ/վ բեռնման արագությամբ

Երկրորդ գլուխը վերաբերում է ԲԱՆԽ-ներով ցեմենտային կապակցանյութով բետոնների սեղմման ամրության ուսումնասիրմանը, դրանց առնչվող գրականության հավաքագրմանն ու վերլուծությանը: Սույն գլխում հետազոտվել է տարբեր երկարություն/արտաքին տրամագիծ հարաբերակցության ԲԱՆԽ-ների ազդեցությունը բետոնի սեղմման ամրության վրա: Աղյուսակ 4-ում բերված է հետազոտությունում օգտագործված 3 տարբեր ԲԱՆԽ-ների հիմնական տեխնիկական բնութագրերը:

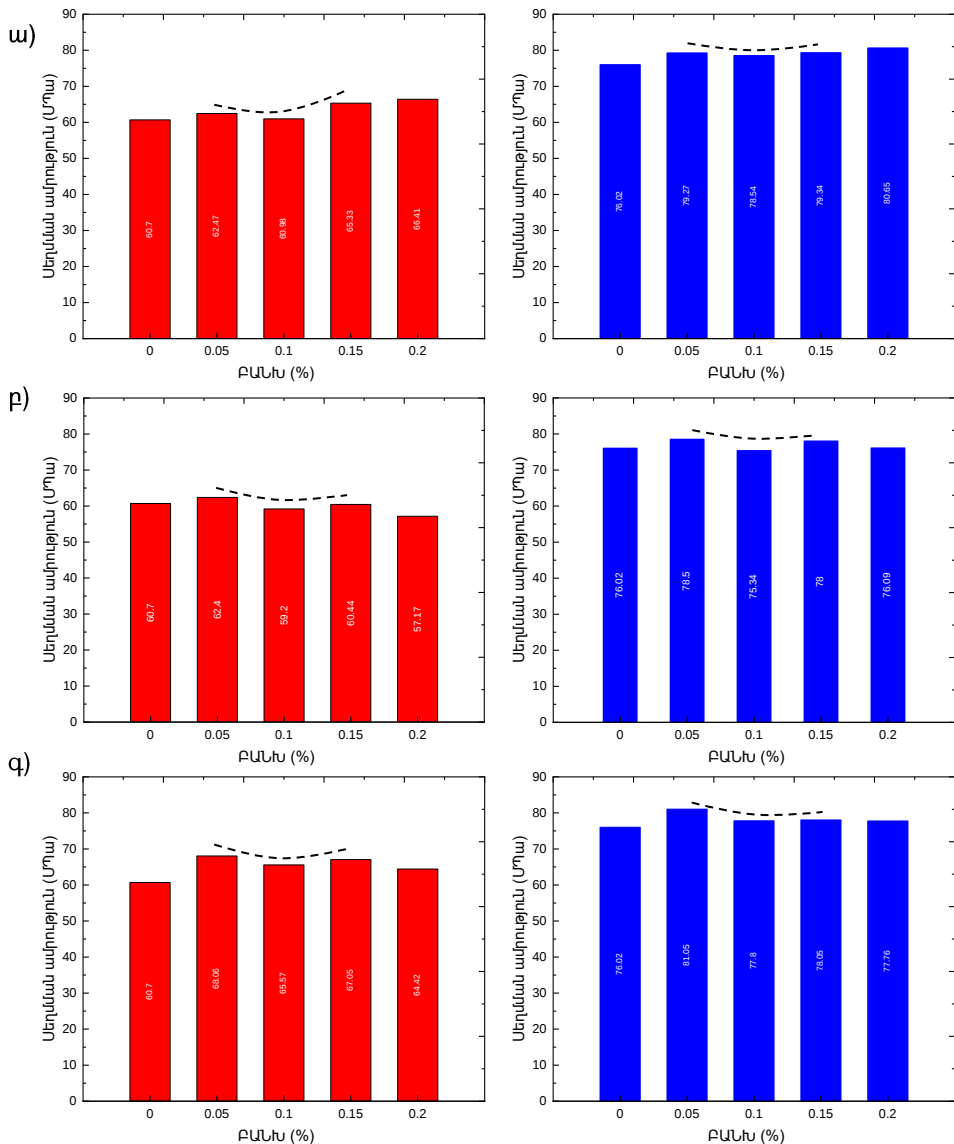
Աղյուսակ 4. ԲԱՆԽ-ների հիմնական տեխնիկական բնութագրեր

ԲԱՆԽ-ների տեսակը	Արտաքին տրամագիծը, նմ	Երկարությունը, մկմ	Մաքրության աստիճանը, %
TNM2	8 - 15	~ 50	>95
TNM3	10 - 20	10 - 30	>95
TNM7	30 - 50	<10	>95

Աղյուսակ 5-ում և Նկ.6-ում բերված են ԲԱՆԽ-ներով բետոնների սեղմման ամրության հետազոտման արդյունքները, համապատասխանաբար 7 և 28 օրական նմուշների համար: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ 7 օրվա ընթացքում բետոնի սեղմման ամրությունը զրոյական նմուշների նկատմամբ աճել է 9.40% (C4-ում), 2.85% (C1-ում) և 12.12% (C1-ում), իսկ 28 օրական նմուշների դեպքում՝ 6.09% (C4-ում), 3.26% (C1-ում) և 6.62% (C1-ում), համապատասխանաբար TNM2, TNM3 և TNM7 ԲԱՆԽ-ների համար: ԲԱՆԽ-ների չափերի մեծ հարաբերակցության դեպքում (մոտ 4347) սեղմման ամրությունն աճել է վերջինիս կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց: Իսկ նանոխողովակների չափերի փոքր հարաբերակցության դեպքում (մոտ 250), սեղմման ամրության առավելագույն արժեքը ձեռք է բերվել 0.05% կոնցենտրացիայի դեպքում: Նման միտում նկատվել է TNM3-ի դեպքում, սակայն վերջինիս C0-ի և C1-ի միջև տարբերությունը զգալի փոքր է TNM7-ի համապատասխան արդյունքների համեմատ:

Աղյուսակ 5. ԲԱՆԽ-ներով և առանց դրանց բետոնների սեղմման ամրության և խտության փորձարարական արդյունքները

Նմուշի համալրը	ԲԱՆԽ-ների տեսակը								
	TNM2			TNM3			TNM7		
	Սեղմման ամրություն, ՄՊա		Միջին խտութ., կգ/մ ³	Սեղմման ամրություն, ՄՊա		Միջին խտութ., կգ/մ ³	Սեղմման ամրություն, ՄՊա		Միջին խտութ., կգ/մ ³
	7 օր	28 օր		7 օր	28 օր		7 օր	28 օր	
C0	60.70	76.02	2429.7	60.70	76.02	2429.7	60.70	76.02	2429.7
C1	62.47	79.27	2425.5	62.43	78.50	2418.4	68.06	81.05	2387.7
C2	60.98	78.54	2421.3	59.20	75.34	2441.1	65.57	77.80	2408.3
C3	65.33	79.34	2444.4	60.44	78.00	2436.3	67.05	78.05	2419.4
C4	66.41	80.65	2426.9	57.17	76.09	2452.5	64.42	77.76	2418.1

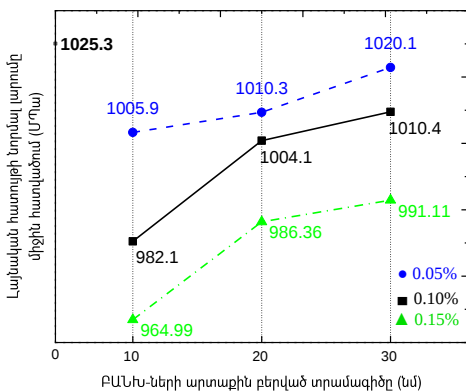


Նկար 6. ա) TNM2, բ) TNM3 և գ) TNM7 տեսակի ԲԱՆՏ -ներով նմուշների սեղման ամրությունները (7 և 28 օրական)

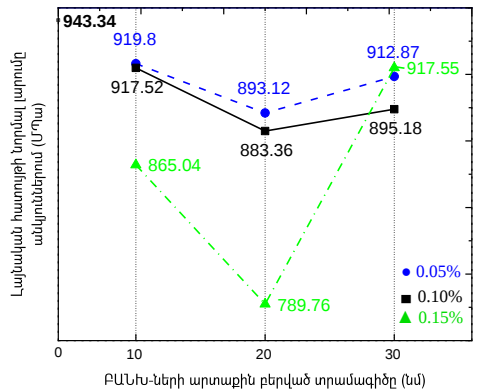
Նկար 6-ում և Աղ. 5-ում բերված արդյունքներից երևում է, որ ԲԱՆՏ -ների 0.1% կոնցենտրացիայի դեպքում նկատվում է սեղման ամրության աճի խզում, այլ կերպ, փորձանմուշների սեղման ամրության ֆունկցիոնալ կախումը նանոխողովակների կոնցենտրացիայից ունի ոչ մոնոտոն վարք, ինչը վկայում է ԲԱՆՏ -ների դիսպերսման եղանակի հետագա բարելավման անհրաժեշտությունը:

Երրորդ գլուխը վերաբերում է ԲԱՆԽ-ներով բետոնների առաձգականության մոդուլի և սեղմման ազդեցության դեպքում նորմալ լարումների թվային հետազոտմանը, դրանց առնչվող գրականության վերլուծությանը: “ANSYS” թվային հաշվարկային ծրագրով, վերջավոր տարրերի մեթոդի կիրառմամբ, մոդելավորվել են տարբեր ԲԱՆԽ-ների բերված կոնցենտրացիաներով և արտաքին տրամագծերով խորանարդաձև բետոնե միկրոնմուշներ: ԲԱՆԽ-ների կոնցենտրացիայի և արտաքին տրամագծի փոփոխության ազդեցությունը բետոնի լարվածային վիճակի վրա հետազոտելու համար մոդելավորած 9 խորանարդաձև նմուշները պայմանական $P = 1000 \text{ ՄՊա}$ հաստատուն ճնշման տակ ենթարկվել են սեղմման ազդեցության, թույլ տալով համեմատաբար փոքրաչափ նմուշներում նկատելի դարձնել լարումների փոփոխությունը: Նկար 7 և 8-ում բերված են խորանարդ նմուշ(1-9)-ի լայնական հատույթում նորմալ լարումները (միջին և անկյունային հատվածների համար) ԲԱՆԽ-ների տարբեր բերված 10, 20, 30 նմ արտաքին տրամագծերի և 0,05, 0,10 և 0,15 % կոնցենտրացիաների դեպքում, իսկ Աղ.6-ում՝ նմուշների առաձգականության մոդուլները երեք գլխավոր ուղղություններով: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ միևնույն սեղմման ուժի ազդեցության տակ նմուշների լայնական հատույթի միջին հատվածում լարումներն առավելապես փոքրացել են համեմատաբար փոքր տրամագծով (10նմ) նանոխողովակների կիրառմամբ, ինչի արդյունքում էլ վերջինիս 0.05, 0.10 և 0.15 % կոնցենտրացիաների դեպքում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է համապատասխանաբար 1.93, 4.39 և 6.25 %, իսկ անկյունային հատվածի համար՝ նանոխողովակների միջին չափի տրամագծի (20նմ) դեպքում, որի արդյունքում լարումը փոքրացել է համապատասխանաբար 5.62, 6.79 և 19.46 %: Դիտարկված մոդելի դեպքում նանոխողովակների կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց բաղադրանյութի առաձգականության մոդուլը երեք գլխավոր ուղղություններով աճում է, մինչդեռ նանոխողովակների չափերի փոփոխությունն էական ազդեցություն վերջինիս վրա չի թողնում (Աղ. 6.):

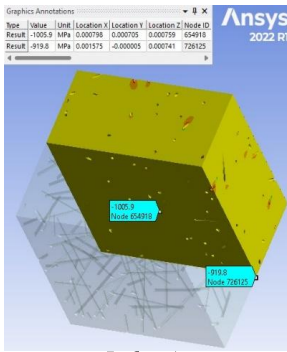
ա)



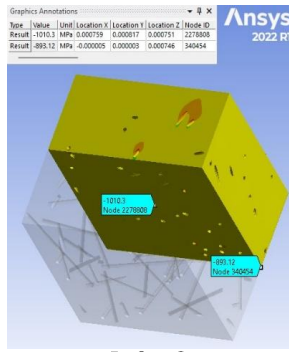
բ)



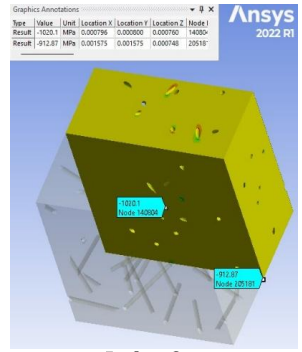
Նկար 7. Նմուշ(1-9)-ի լայնական հատույթում նորմալ լարումները ԲԱՆԽ-ների 10, 20, 30 նմ արտաքին տրամագծերի և 0,05, 0,10 և 0,15 % կոնցենտրացիաների դեպքում, լայնական հատվածքի. ա) միջին հատվածում, բ) անկյունային հատվածում



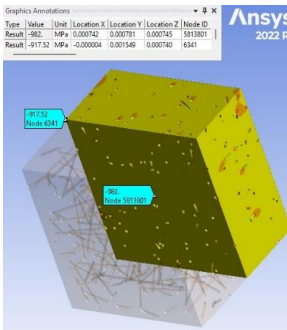
Նմուշ1



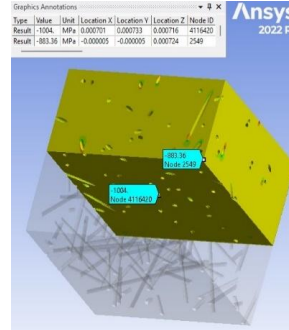
Նմուշ2



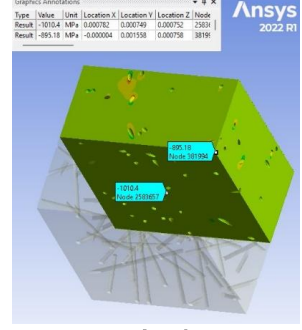
Նմուշ3



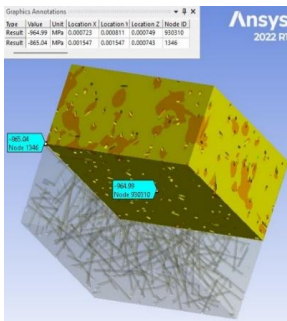
Նմուշ4



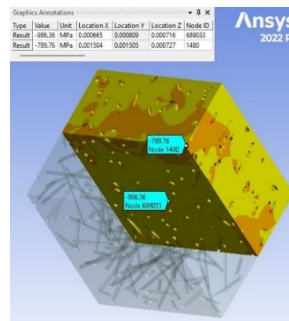
Նմուշ5



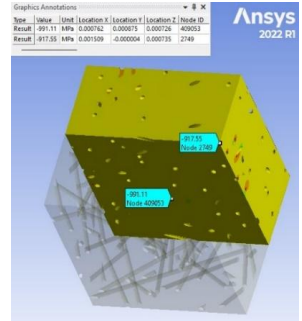
Նմուշ6



Նմուշ7



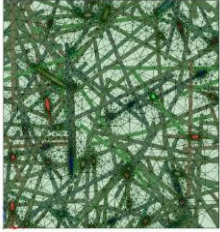
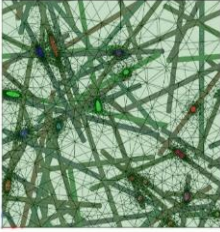
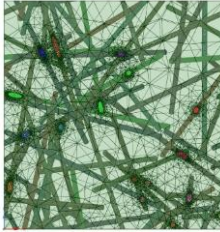
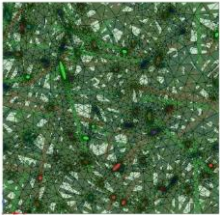
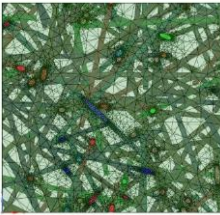
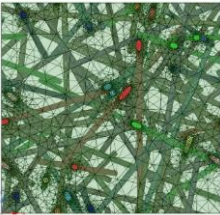
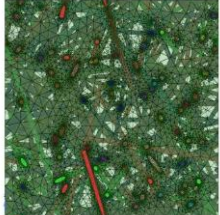
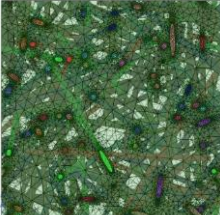
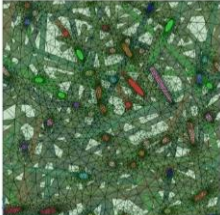
Նմուշ8



Նմուշ9

Նկար 8. Խորանարդ նմուշ(1- 9) -ի ($\approx 1550 \times 1550 \times 1550$ նմ) նորմալ լարումները լայնական հատույթի միջին հատվածում և անկյունում՝ ԲԱՆԻ -ների ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ տարբեր բերված կոնցենտրացիաների և արտաքին տրամագծերի դեպքում

Աղյուսակ 6. ԲԱՆԽ -ների տարբեր բերված կոնցենտրացիաների և արտաքին տրամագծերի դեպքում մոդելավորված խորանարդ նմուշների առաձգականության մոդուլները երեք գլխավոր ուղղություններով (E, ՄՊա)

Կոնցենտրացիա, %	Արտաքին տրամագիծ, նմ		
	10 (25*)	20 (33*)	30 (40*)
0.05 (0.01*)	 E₁=30.30, E₂=30.29, E₃=30.30	 E₁=30.31, E₂=30.30, E₃=30.31	 E₁=30.27, E₂=30.25, E₃=30.26
0.10 (0.02*)	 E₁=30.57, E₂=30.55, E₃=30.56	 E₁=30.54, E₂=30.58, E₃=30.54	 E₁=30.55, E₂=30.65, E₃=30.59
0.15 (0.03*)	 E₁=30.78, E₂=30.51, E₃=30.76	 E₁=30.82, E₂=30.79, E₃=30.76	 E₁=30.76, E₂=30.88, E₃=30.72
* Փակագծերում նշված արժեքները “Ansys” ծրագրում մոդելավորված ածխածնային թելքերի կոնցենտրացիաներն (ըստ նմուշի զանգվածի) ու արտաքին տրամագծերն են, իսկ առանց փակագծերինը՝ ԲԱՆԽ -ների բերված կոնցետրացիաները (ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ, վերջինս ընդունելով 500կգ 1մ³ բետոնի ծավալում) և արտաքին տրամագծերը			

ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Satheesh Gopi. Basic Civil Engineering, chapter 14, 16, 2009, 1-348
2. Lai Yin Chan, Bassem Andrawes. Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength. Computational Materials Science, 47, 2010, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.11.035>
3. Valentin N. Popov. Carbon nanotubes: properties and application. Materials Science and Engineering: R: Reports, 43, 3, 2004, 61-102. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2003.10.001>
4. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund, A.M. Rao. Carbon Nanotubes. In: Andreoni, W. (eds) The Physics of Fullerene-Based and Fullerene-Related Materials. Physics and Chemistry of Materials with Low-Dimensional Structures, vol 23. Springer, Dordrecht, 2000, 331-339. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4038-6_9
5. V. Sivasubramaniyam, S. Ramasamy, M. Venkatraman, G. Gatto, A. Kumar. Carbon Nanotubes as an Alternative to Copper Wires in Electrical Machines: A Review. Energies, 16, 2023, 3665. <https://doi.org/10.3390/en16093665>.
6. J. Suchorzewski, M. Prieto, U. Mueller. An Experimental Study of Self-Sensing Concrete Enhanced with Multi-Wall Carbon Nanotubes in Wedge Splitting Test and DIC. Construction and Building Materials, 262, 2020, 120871. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120871>

**ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ ԵՎ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ
ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԵՆ ՀԵՏԵՎՅԱԼ ԳԻՏԱԿԱՆ ՀՈԴՎԱԾՆԵՐՈՒՄ**

1. S.A. Malumyan. Influence of Carbon Nanotubes Concentration on the Mechanical Properties of Cement Mortars. Journal of Architectural and Engineering Research, 5, 2023, 47-52. <https://doi.org/10.54338/27382656-2023.5-006>
2. S.A. Malumyan, N.G. Muradyan, Y. Melikyan, D. Laroze, M.A. Kalantaryan, A.A. Arzumanyan, M.G. Barseghyan. Simultaneous Effect of Diameter and Concentration of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical and Electrical Properties of Cement Mortars: With and without Biosilica. Nanomaterials, 14 (15), 2024, 1271. <https://doi.org/10.3390/nano14151271>
3. S.A. Malumyan, N.G. Muradyan. The Effect of Different Multi-Walled Carbon Nanotubes Aspect Ratio on the Compressive Strength of the Cement-Based Concrete. Journal of Architectural and Engineering Research, 8, 2025, 62-68. <https://doi.org/10.54338/27382656-2025.8-06>
4. Ս. Մալումյան, Բետոնի լարվածային վիճակի վրա բազմաշերտ ածխածնային նանոխողովակների ազդեցության թվային ուսումնասիրություն, ՃՇՀԱՀ գիտական աշխատություններ, 2025, N3(93), 3-15

ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Ուսումնասիրվել են բազմաշերտ ածխածնային նանոխողովակներով շաղախի ծոման և սեղմման ամրությունները: Մշակված բաղադրակազմերով նանոխողովակներով և առանց դրանց շաղախախառնուրդների պատրաստման համար ընտրվել են՝ ելակետային նյութերի խառնման հաջորդականությունն ու տևողությունը, դրանց խտացման ընթացքն ու պահպանման պայմանները, ինչպես նաև փորձանմուշների ծոման և սեղմման ամրությունների որոշման ժամանակահատվածները: Հետազոտության արդյունքում միևնույն 20-30 նմ արտաքին տրամագծով նանոխողովակների կիրառմամբ 28 օրական շաղախների ծոման ամրության առավելագույն արդյունքը ստացվել է վերջինիս 0.3% կոնցենտրացիայի դեպքում ցմենտի զանգվածի նկատմամբ՝ ավելի քան 36.5% աճ, իսկ սեղմման ամրությունն աճել է 32.0%-ով առանց նանոխողովակների շաղախի նկատմամբ: 7 և 28 օրական շաղախների սեղմման ամրության վրա նանոխողովակների չափերի փոփոխության ազդեցության ուսումնասիրության արդյունքում ստացվել է, որ համեմատականորեն փոքր՝ 4-8 նմ արտաքին տրամագծով նանոխողովակներով շաղախների սեղմման ամրության առավելագույն աճը եղել է 21.7%, միջին 5-15 նմ -ի դեպքում՝ 3.5%, իսկ մեծ 20-30 նմ -ի դեպքում՝ 4.2%, վերջիններիս 0.1% կոնցենտրացիայի դեպքում: Ստացված արդյունքների վերլուծությամբ ցույց է տրվել, որ ամենամեծ երկարություն/արտաքին տրամագիծ հարաբերակցություն ունեցող նանոխողովակների և փոքր արտաքին տրամագծի դեպքում (4-8 նմ) ցմենտային շաղախները ցուցաբերել են ամենաբարձր մեխանիկական հատկությունները:
2. Բազմաշերտ նանոխողովակներով շաղախների էլեկտրական հատկությունների հետազոտության արդյունքում ստացվել է, որ վերջիններիս էլեկտրահաղորդականության աճը նկատվում է փորձանմուշների 14օր պահպանումից հետո, դիտարկված տեսակի նանոխողովակների 0.05% կոնցենտրացիայի դեպքում: Նանոշաղախների պարբերական սեղմման արդյունքում, ցույց է տրվել, որ բոլոր փորձանմուշները ձեռք են բերել պիեզոդիմադրության հատկություն: Չափումներից ստացվել է, որ փորձանմուշների սկզբնական էլեկտրական դիմադրությունն անընդհատ աճում է պարբերական բեռնմանը զուգընթաց: Նանոխողովակների 0.05 և 0.1% կոնցենտրացիաների դեպքում ստացվել է ավելի լավ պիեզոդիմադրության արձագանք և վերջինս նկարագրող գրաֆիկական կորի նույն կառուցվածքը՝ տեսակարար էլեկտրական դիմադրության հարաբերական փոփոխության փոքր շեղմամբ:
3. Ուսումնասիրվել է բազմաշերտ նանոխողովակների չափերի հարաբերակցության և ցմենտային կապակցանյութի զանգվածի նկատմամբ կոնցենտրացիայի փոփոխության ազդեցությունը բետոնների սեղմման ամրության վրա: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ 7 օրվա ընթացքում բետոնի սեղմման ամրությունը զրոյական նմուշների նկատմամբ աճել է 9.40, 2.85 և 12.12%, համապատասխանաբար, նանոածխածնային խողովակների չափերի՝ մեծ, միջին և փոքր հարաբերակցության և 0.2, 0.05, 0.05 % կոնցենտրացիաների դեպքում: Իսկ

28 օրական նմուշների դեպքում՝ 6.09, 3.26 և 6.62%: Հետազոտության արդյունքներից ստացվել է, որ նանոխողովակների դիտարկված չափերի մեծ հարաբերակցության դեպքում (մոտ 4347) սեղմման ամրությունն աճել է վերջինիս կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց: Իսկ նանոխողովակների չափերի փոքր հարաբերակցության դեպքում (մոտ 250), սեղմման ամրությունը նվազել է 0.05% կոնցենտրացիայից հետո: Նման միտում նկատվել է չափերի միջին հարաբերակցություն ունեցող նանոխողովակների դեպքում, սակայն վերջինիս ամրության փոփոխությունը 0-ականի նկատմամբ զգալի փոքր է մյուս երկու տեսակի նանոխողովակների համեմատ:

4. Նանոբետոնի սեղմման ամրության հետազոտությունից ստացվել է, որ բազմաշերտ նանոխողովակների 0.1% կոնցենտրացիայի դեպքում նկատվում է սեղմման ամրության աճի խզում, ըստ որի դիտարկված բոլոր փորձանմուշների սեղմման ամրության ֆունկցիոնալ կախումը նանոխողովակների կոնցենտրացիայից ունի ոչ մոնոտոն վարք, ինչը ցույց է տալիս նանոխողովակների դիսպերսման եղանակի հետագա բարելավման անհրաժեշտությունը:
5. Բետոնախառնուրդների շարժունակության հատկության հետազոտման արդյունքում ցույց է տրվել, որ առանց նանոխողովակների բետոնախառնուրդի շարժունակությունը կազմել է 4.6սմ, մինչդեռ նանոխողովակներով՝ 3.1սմ: Շարժունակության փոքրիկ կրճատումը կարող է դիտվել որպես նանոբետոնի որակական առավելություն, որը պայմանավորված է նանոխողովակների մակերևութային բարձր ակտիվությամբ:
6. Թվային եղանակով ուսումնասիրվել է բազմաշերտ նանոխողովակներով նանոբետոնե խորանարդ նմուշների նորմալ լարումների փոփոխությունն առանցքային սեղմման դեպքում, նանոխողովակների տարբեր արտաքին տրամագծերի և զանգվածային կոնցենտրացիաների դեպքում: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ միևնույն սեղմման ուժի ազդեցության տակ նմուշների լայնական հատույթի միջին հատվածում լարումներն առավելապես փոքրացել են համեմատաբար փոքր տրամագծով (10նմ) նանոխողովակների կիրառմամբ, ինչի արդյունքում էլ վերջինիս 0.05, 0.10 և 0.15 % կոնցենտրացիաների դեպքում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է համապատասխանաբար 1.93, 4.39 և 6.25%: Լայնական հատույթի անկյունային հատվածի համար կատարված հետազոտությունից ցույց է տրվել, որ ամենափոքր լարումները ստացվում են նանոխողովակների միջին չափի տրամագծի (20նմ) կիրառմամբ, որի արդյունքում վերջինիս 0.05, 0.10 և 0.15% կոնցենտրացիայի դեպքում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է համապատասխանաբար 5.62, 6.79 և 19.46%: Դիտարկված մոդելի դեպքում նանոխողովակների կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց բաղադրանյութի առաձգականության մոդուլը երեք գլխավոր ուղղություններով աճում է, մինչդեռ նանոխողովակների չափերի փոփոխությունն էական ազդեցություն վերջինիս վրա չի թողնում:

**INVESTIGATION OF THE PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR AND
CONCRETE REINFORCED WITH CARBON NANOTUBES**

ABSTRACT

Dissertation submitted to receive Academic Degree of Doctor of philosophy (Ph.D.) Engineering,
Speciality 05.23.01 – “Building construction, buildings, structures, construction materials and
structural mechanics”

Cement based concrete and mortar is one of the most commonly used materials in construction due to its high workability and mechanical properties. Improving these characteristics, particularly the compressive and flexural strength, is a challenging issue. Numerous studies have explored the use of additives and nanoparticles, including nanofibers, carbon graphene, single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), to enhance the mechanical properties of concrete/mortar and achieve higher compressive and tensile strengths. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) are among the most widely used and strongest known nanoparticles. Their one-dimensional fibrous characteristics contribute to a wide range of outer diameters and aspect ratios. MWCNTs possess high tensile strength and Young's modulus, which significantly influences the main properties of concrete and mortar. This is primarily due to their ability to act as crack bridges, preventing the growth of microcracks within the matrix. As a result, they enhance various characteristics of concrete/mortar, including compressive and tensile strength, as well as crack resistance. By experimental approach the influence of the concentration and aspect ratios of MWCNTs (0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 and 0.35 wt.%) on the compressive and flexural strengths of the cement mortar was investigated. Besides the advantages in improving almost all mechanical properties, the addition of MWCNTs in the cementitious matrix can result in tailoring the electrical properties of the nanocomposites. Piezoresistivity is the effect of change in the electrical resistivity induced by deformation of materials. The effect of MWCNT concentrations of 0.05, 0.10, and 0.15 wt% on the electrical properties of cement mortar, especially the bulk electrical resistivity and piezoresistive characteristics of cement mortar was studied. The study also investigates the impact of the aspect ratio of different carbon nanotubes on the compressive strength of ordinary cement - based concrete cured for 7 and 28 days. Furthermore, by the numerical analyses approach, using “ANSYS” numerical computation software, and applying the Finite Element Method, concretes of B25 strength class were modeled in the form of cubic microspecimens with varying concentrations and outer diameters of MWCNTs. As a result of the numerical analysis, the elastic moduli of the specimens (E1, E2, E3) and the stress state under uniaxial compression were investigated. Taking into account the results of the conducted experimental and numerical studies, the use of MWCNTs contributes to the enhancement of the physicomechanical properties of cementitious systems from nanoscale level, creating opportunities for their application in structural elements to reduce the initiation and propagation of nanoscale cracks. Moreover, the incorporation of MWCNTs enables the production of higher-strength classes of mortar and concrete using the same grade of Portland cement without increasing the material mass, which promotes more efficient material utilization—particularly in the production and transportation of prefabricated heavy structural elements in Armenia's industrial, civil, road, and defense construction sectors.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРА И БЕТОНА С
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

РЕЗЮМЕ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.23.01 – “Строительные конструкции, здания, сооружения, строительные материалы и
строительная механика”

Бетон и раствор на цементной основе является одним из наиболее широко используемых строительных материалов благодаря своей высокой удобоукладываемости и механическим свойствам. Повышение этих характеристик, в частности прочности на сжатие и изгиб, представляет собой сложную научно-техническую задачу. Многочисленные исследования посвящены использованию добавок и наночастиц, включая нановолокна, углеродный графен, одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), с целью улучшения механических свойств бетона и раствора, а также достижения более высоких показателей прочности на сжатие и растяжение. МУНТ являются одними из наиболее распространённых и прочных известных наночастиц. Их одномерная волокнистая структура обеспечивает широкий диапазон внешних диаметров и аспектных отношений. МУНТ обладают высокой прочностью на растяжение и высоким модулем Юнга, что существенно влияет на основные свойства бетона и раствора. Это обусловлено их способностью выполнять функцию «мостиков трещин», предотвращая рост микротрещин в цементном матриксе. В результате они способствуют улучшению различных характеристик цементных материалов, включая прочность на сжатие, растяжение и трещиностойкость. В рамках экспериментальных исследований было изучено влияние концентрации и аспектного отношения МУНТ (0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 и 0,35 мас. %) на прочность цементного раствора при сжатии и изгибе. Помимо преимуществ, связанных с повышением практически всех механических свойств, введение МУНТ в цементную матрицу позволяет регулировать электрические характеристики нанокompозитов. Пьезорезистивность представляет собой эффект изменения электрического сопротивления материала под воздействием механических деформаций. Исследовалось влияние концентраций МУНТ 0,05; 0,10 и 0,15 мас. % на электрические свойства цементного раствора, в частности на объемное электрическое сопротивление и пьезорезистивные характеристики. Кроме того, было проведено исследование влияния аспектного отношения различных углеродных нанотрубок на прочность цементного бетона на основе портландцемента после 7 и 28 суток твердения. В рамках численного анализа, выполненного с использованием программного комплекса “ANSYS” и метода конечных элементов, были смоделированы бетонные образцы класса прочности B25 в форме кубических микроспециментов с различными концентрациями и внешними диаметрами МУНТ. В результате численного моделирования были определены значения модулей упругости образцов (E_1 , E_2 , E_3), а также исследовано их напряжённое состояние при одноосном сжатии. На основании экспериментальных и численных исследований установлено, что введение МУНТ способствует улучшению физико-механических свойств цементных систем с наномасштабного уровня, создавая возможность для их применения в конструктивных элементах с целью снижения вероятности образования и распространения трещин в наномасштабе. Кроме того, использование МУНТ позволяет получать растворы и бетоны более высоких классов прочности при применении того же марки портландцемента без увеличения массы материала, что способствует более рациональному использованию ресурсов — особенно при производстве и транспортировке сборных тяжёлых конструктивных элементов в промышленном, гражданском, дорожном и оборонном строительстве Армении.