

**ԲԵՏՈՆԻ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ՎՐԱ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԱԾԽԱԾՆԱՅԻՆ ՆԱՆՈՒՆՈՂՈՎԱԿՆԵՐԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԹՎԱՅԻՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ**

Սուրեն Աշոտի Մալումյան

*Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան, ք. Երևան, ՀՀ
surmalumyan@gmail.com*

Ածխածնային նանոխողովակների ներդրումը բետոնում և շաղախում նպաստում է նյութի մեխանիկական հատկությունների զգալի բարելավմանը: Այդ հատկությունների ուսումնասիրման համար, թեև փորձարարական մեթոդները տալիս են իրական արդյունքներ, դրանք պահանջում են մեծ նյութական ներդրումներ և զգալի ժամանակ: Ժամանակակից թվային մոդելավորման մեթոդները ծառայում են կանխատեսելու և օպտիմալացնելու փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները: “ANSYS” թվային հաշվարկային ծրագրով, վերջավոր տարրերի մեթոդի կիրառմամբ, մոդելավորվել են տարբեր բազմաշերտ ածխածնային նանոխողովակների (ԲԱՆԽ) բերված կոնցենտրացիաներով և արտաքին տրամագծերով խորանարդ նմուշների տեսքով նյութեր: Թվային վերլուծության արդյունքում հետազոտվել է նմուշների առաձգականության մոդուլների (E_1 , E_2 , E_3) լարվածային վիճակն առանցքային սեղմման դեպքում: Միննույն սեղմման ուժի ազդեցության տակ նմուշների լայնական հաստայթի միջին հատվածում բետոնի մատրիցում նորմալ լարումները 0-ական նմուշների նկատմամբ էականորեն նվազում են համեմատաբար փոքր տրամագծի ԲԱՆԽ դեպքում (6,25 %), իսկ անկյունային հատվածներում՝ ԲԱՆԽ-երի միջին չափի տրամագծի դեպքում (19,46 %): Ստացվածը հաստատում է ցեմենտային կապակցանյութով ԲԱՆԽ-երով նանոշաղախների և նանոբետոնների իրականացված փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները: Կատարված ուսումնասիրությունները կարող են հիմք հանդիսանալ փորձարարական հետազոտությունների համար՝ խնայելով նյութական ռեսուրսներ և ժամանակ, ինչպես նաև նպաստել նանոշաղախների և նանոբետոնների մեխանիկական հատկությունների կատարելագործմանը:

Բանալի բառեր. ածխածնային նանոխողովակ, բետոն, վերջավոր տարրերի մեթոդ, սեղմում, արտաքին տրամագիծ

Ներածություն

Ցեմենտային կապակցանյութով բետոնն ու շաղախը հանդիսանում են ժամանակակից շինարարության հիմնարար նյութերը՝ շնորհիվ բարձր մեխանիկական և ֆիզիկաքիմիական հատկությունների [1, 2]: Վերջին տասնամյակներում մեծ ուշադրություն է դարձվում բետոնի միկրոկառուցվածքի կատարելագործմանը՝ նոր հավելանյութերի ներդրման միջոցով, որոնք կա-

րող են նպաստել ցեմենտային կապակցանյութով բետոնի և շաղախի սեղմման և ծոման ամրությունների, ինչպես նաև ճաքակայունության բարելավմանը: Այսօր շինարարական նյութագիտության մեջ լայն կիրառություն են գտնում տարբեր տեսակի և կազմի միկրոթելքեր (պողպատե, ապակե, բազալտե, ածխածնային և այլն), ինչպես նաև ածխածնային նանոմասնիկներ (նանոգրաֆեններ, նանոգնդեր, նանոխողովակներ և այլն), որոնք, դիսպերսվելով կամ խառնվելով ցեմենտային կապակցանյութի մասնիկների հետ կամ լցնելով վերջինիս միջհատիկային խոռոչները, ապահովում են նյութի ավելի խիտ և մեխանիկապես ամուր կառուցվածք [3-5]: Նանոմասշտաբային հավելանյութերի մեջ լայն ուսումնասիրություն ունեն ածխածնային նանոխողովակները (ԱՆԽ), իրենց կապակցանյութում նանոամրանավորման հատկության շնորհիվ, ունեն մեծ երկարություն/արտաքին տրամագիծ կողմերի հարաբերակցություն (100-ից 1000 և ավելի)՝ *“aspect ratio”*, զգալի մեծ առաձգականության մոդուլ (1 *SՊա*) և ձգման մեծ ամրություն (50...200 *ԳՊա*) [6-10]:

Տարբեր փորձարարական հետազոտություններ ցույց են տվել, որ ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ 0,01...0,30 % կոնցենտրացիաների կիրառումը բերում է շաղախի և բետոնի մեխանիկական հատկությունների զգալի բարելավմանը: Ա. Սվիրգենը և այլոք ցույց են տվել, որ ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ ԲԱՆԽ-երի 0,045 % կոնցենտրացիայի կիրառումը հանգեցրել է ցեմենտային շաղախի 50% սեղմման ամրության աճի [11]: Ս.Ջ. Սուջաթան ցույց է տվել, որ ԲԱՆԽ-երի օպտիմալ կոնցենտրացիայի կիրառման դեպքում ցեմենտային կապակցանյութով բարձրամուր բետոնի սեղմման և ծոման ամրություններն աճել են, համապատասխանաբար, 16% և 20% [12]:

Էական կարևորություն ունի ԲԱՆԽ-երի արտաքին չափերի հարաբերակցության ազդեցությունը ցեմենտային կապակցանյութով նանոբետոնների և նանոշաղախների մեխանիկական հատկությունների վրա [13, 14]: ԲԱՆԽ-երի տարբեր արտաքին տրամագծերի և չափերի հարաբերակցության դեպքում ցեմենտային կապակցանյութով շաղախի և բետոնի մեխանիկական հատկությունների փորձարարական հետազոտությունները ցույց են տվել, որ վերջինիս միևնույն կոնցենտրացիայի և փոքր արտաքին տրամագծի դեպքում սեղմման ամրությունը զգալի կերպով բարելավվում է. նանոշաղախների դեպքում՝ 21,7 %, իսկ բետոնների դեպքում՝ 9,4 % [13, 14]: Ընդ որում, երկու հետազոտություններում էլ ԲԱՆԽ-երի ամենափոքր արտաքին տրամագիծը չի անցնում 10 նմ-ը:

Փորձարարական հետազոտությունների գույքահեռ, այսօր լայն կիրառություն ունի թվային հետազոտությունը: Թեև փորձարարական մեթոդները տալիս են իրական արդյունքներ, դրանք պահանջում են նյութական, ռեսուրսային մեծ ներդրումներ և զգալի ժամանակ: Ժամանակակից եռաչափ թվային մոդելավորման մեթոդները ծառայում են կանխատեսելու և օպտիմալացնելու փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները [6, 15-20]: Թվային հետազոտությունների համար լայն կիրառություն ունի վերջավոր տարրերի մեթոդը (ՎՏՄ), որի կիրառման հնարավորության տիրույթում նպատակահարմար է վերլուծել տարբեր հավելանյութերով ցեմենտային մատրիցների մեխանիկական հատկությունները (առաձգականության և սահքի մոդուլ, սեղմման, ձգման, ծոման ամրություն և այլն): Ի.Է. Կավվադիասը և այլոք ցույց են տվել, որ նանոշաղախների

մեխանիկական հատկությունների թվային վերլուծությամբ ստացված արդյունքները համապատասխանում են փորձարարական հետազոտությամբ ստացված արդյունքներին, որի դեպքում սեղմման, ծոման ամրությունը և առաձգականության մոդուլն աճել են մինչև 10 % [15]:

Նյութի կառուցվածքի թվային եռաչափ մոդելավորման համար կիրառվում է ՎՏՄ-ն՝ օգտագործելով ներկայացուցչական ծավալային տարրը (ՆՕՏ) “RVE”, որը նկարագրում է նյութի միջին կառուցվածքային հատկանիշները նանո- և միկրոմասշտաբներում, առանց որի հնարավոր չի լինի նկարագրել ցեմենտային մատրիցում պատահականության սկզբունքով բաշխված տարատեսակ հավելանյութերի ֆիզիկական առկայությունը: Հավելանյութերի մոդելավորման այլ մոտեցումը կհանգեցնի զգալի ժամանակի կորստի և ծրագրային խնդիրների, ուստի՝ վերլուծության անհնարինություն: Այս առումով դժվարություն է հանդիսանում նկարագրել ԲԱՆԽ-երի իրական մոդելը, իր ատոմական կառուցվածքի պատճառով, նաև ցեմենտային մարմնի ֆիզիկական ոչ գծայնությունը, քանի որ ՆՕՏ-ում նանոհավելանյութով նյութի մոդելը նանոմասշտաբային է և ՎՏՄ-ում նյութի ոչ գծային բնույթը նկարագրող և կիրառություն ունեցող “SOLID-65” վերջավոր տարրի կիրառումը զգալի կդժվարացնի հետագա մոդելավորման և վերլուծության ընթացքը:

Այնուամենայնիվ, օգտվելով առկա և արդի ծրագրային հնարավորություններից, կիրառելով “SOLID-186” վերջավոր տարրը, նանոխողովակները և ցեմենտային մատրիցը մոդելավորվել են, համապատասխանաբար, որպես հոծ, առաձգական պինդ մարմին: Նանոխողովակները փոխարինվել են կլոր հատվածքի անընդհատ նանոձողերով, որոնց գծային բերված կոշտությունը կհամապատասխանի ընտրված ԲԱՆԽ-երի գծային կոշտությանը: Ցեմենտային մատրիցի ֆիզիկամեխանիկական վարքագիծն առավել լիարժեք բնորոշելու համար վերջինիս ֆիզիկական ոչ գծայնությունը հաշվի կառնվի հետագա մակրոմասշտաբային հետազոտությունների ժամանակ: Ցեմենտային մատրիցի և նանոխողովակների միջև կապը մոդելավորվել է անընկրկելի: Նյութի իրական կառուցվածքային համակարգում այդ կապն ապահովվում է Վան դեր Վաալսյան միջմոլեկուլային ամուր փոխազդեցության ուժերով [3, 6]: Բազմաթիվ աշխատանքներ անդրադարձել են ցեմենտային մատրիցի և նանոխողովակների շաղկապման ամրությանը, որը հիմնականում կախված է միջատոմային փոխազդեցության գործոններից: Այնուամենայնիվ, շաղկապման ամրության թվային հետազոտություններն իրականացվում են ատոմային մասշտաբներում, որպես առանձին նանոխողովակի պոկման վերլուծություն (*pull-out analyses*) [3, 6]:

Սույն աշխատանքում “ANSYS” թվային հաշվարկային ծրագրով, ՎՏՄ-ի կիրառմամբ ՆՕՏ-ում մոդելավորվել են բերված կոնցենտրացիաներով (0,05 %, 0,10 % և 0,15 %՝ զանգվածի նկատմամբ) և արտաքին տրամագծերով (10 նմ, 20 նմ և 30 նմ) ԲԱՆԽ-երով B25 դասին համապատասխանող բետոնե խորանարդ նմուշներ: ՆՕՏ-ում նախապես որոշվել են նմուշների առաձգականության մոդուլները երեք ուղղություններով (E_1 , E_2 , E_3), գնահատելու վերջինիս կոշտության բնութագրերի փոփոխությունը: Թվային վերլուծության արդյունքում “SOLID-186” վերջավոր տարրերի կիրառ-

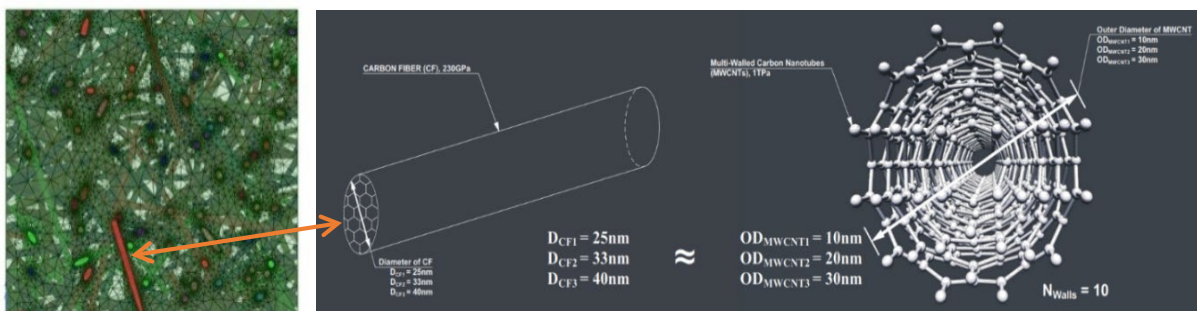
մամբ կատարվել է դիտարկվող 9 խորանարդ նմուշների համար լարվածային վիճակի վերլուծություն, կոնցենտրացիա-արտաքին տրամագիծ պարամետրերի փոփոխության ազդեցությունը ցեմենտային կապակցանյութով բետոնի սեղմման ամրության վրա գնահատելու նպատակով:

Նյութեր և մեթոդներ

Սույն հոդվածում թվային ԲԱՆՄ-երով բաղադրանյութի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների թվային վերլուծության համար օգտագործվել է “ANSYS” հաշվարկային ծրագիրը՝ կիրառելով ՎՏՄ: Նյութերի թվային նկարագրության նպատակով “Material Designer” ենթածրագրի միջոցով մոդելավորվել են $1500 \times 1500 \times 1500$ նմ չափերով խորանարդային նմուշներ, որոնց մեջ ընդունվել է չափային 5% պատահական շեղում: Բոլոր մոդելներում բետոնի մատրիցը դիտարկվել է որպես B25 դասի պինդ և համասեռ մարմին՝ իր ֆիզիկամեխանիկական հատկություններով: Հաշվարկների համար դիտարկվել են 9 նմուշներ, որոնցում ԲԱՆՄ-երը նկարագրելու համար մոդելավորվել են երեք տարբեր կոնցենտրացիաների (0,01, 0,02 և 0,03 %՝ նմուշի զանգվածի նկատմամբ) և երեք տարբեր տրամագծի (25, 33 և 40 նմ) կլոր հատվածով և հոծ կառուցվածքով ածխածնային թելքեր, որոնց գծային կոշտությունը համապատասխանում է նախատեսվող ԲԱՆՄ-երի բերված կոշտությանը (1) (աղ. 1): Նկ. 1-ում բերված են “Ansys” ծրագրի “Material Designer” ենթածրագրի մոդելավորված ածխածնային թելքերի չափերը և վերջինիս համարժեք ԲԱՆՄ-երի բերված արտաքին տրամագծերը.

$$E_{U\theta} \cdot A_{U\theta} = E_{F_{U\theta}} \cdot A_{F_{U\theta}}, \quad (1)$$

որտեղ $E_{U\theta}$ և $E_{F_{U\theta}}$ -ը ածխածնային թելքերի և նանոխողովակների առաձգականության մոդուլներն են, որոնք հավասար են, համապատասխանաբար, 230 և 1000 ԳՊա, $A_{U\theta}$ և $A_{F_{U\theta}}$ -ն՝ ածխածնային թելքերի և ԲԱՆՄ-երի լայնական հատվածքի մակերեսները: $A_{F_{U\theta}}$ -երի ստացման ժամանակ նանոխողովակների շերտերի քանակը պայամանականորեն ընդունվել է 10, ընդհանուր հաստությունը՝ 3,0...3,5 նմ:



Նկ. 1. Մոդելավորված ածխածնային թելքերի և դրան համապատասխանող ԲԱՆՄ-երի սխեման

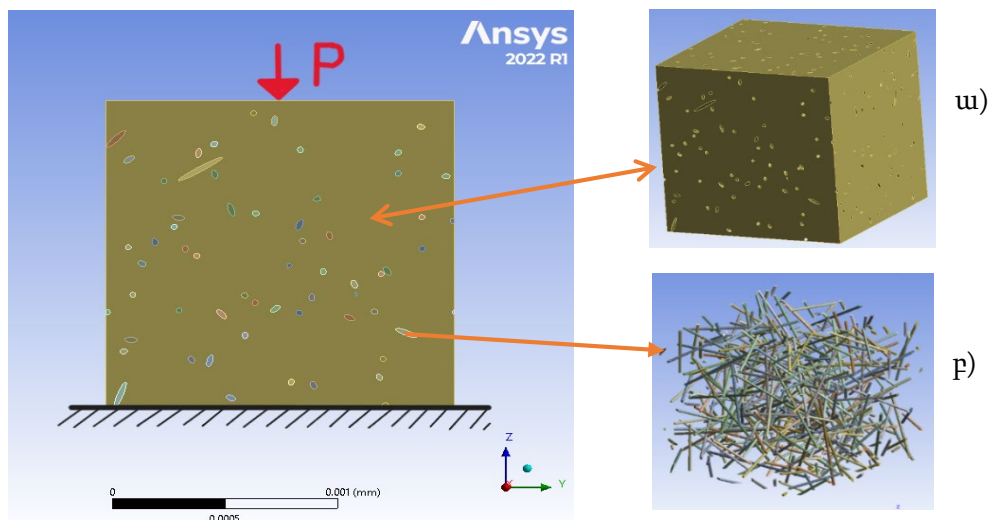
Աղյուսակ 1

Նմուշների համարակալումն ըստ թելքերի տրամագծի և կոնցենտրացիայի (փակագծում՝ ԲԱՆԽ-երի բերված տրամագիծը և կոնցենտրացիան ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ, ընդունելով 500 կգ 1 մ³ բետոնում)

Նմուշի անվանում	Տրամագիծ, նմ	Կոնցենտրացիա, %	Նմուշի անվանում	Տրամագիծ, նմ	Կոնցենտրացիա, %
Նմուշ0	-	-	Նմուշ5	33 (20)	0,02 (0,10)
Նմուշ1	25 (10)	0,01 (0,05)	Նմուշ6	40 (30)	0,02 (0,10)
Նմուշ2	33 (20)	0,01 (0,05)	Նմուշ7	25 (10)	0,03 (0,15)
Նմուշ3	40 (30)	0,01 (0,05)	Նմուշ8	33 (20)	0,03 (0,15)
Նմուշ4	25 (10)	0,02 (0,10)	Նմուշ9	40 (30)	0,03 (0,15)

Մոդելավորած նյութերի առանցքային սեղմումը նանոմասշտաբում

Նանոմասշտաբում ԲԱՆԽ-երի կոնցենտրացիայի և արտաքին տրամագծի փոփոխության ազդեցությունը բետոնի լարվածադեֆորմատիկ վիճակի վրա հետազոտելու համար մոդելավորած 9 խորանարդային նյութերը պայմանական $P = 1000$ ՄՊա հաստատուն ճնշման տակ ենթարկվել են սեղմման ազդեցության (նկ. 2): Նման մոտեցումը թույլ է տալիս համեմատաբար փոքրաչափ նմուշներում ապահովել բավարար լարվածադեֆորմատիվ դաշտ՝ նյութում նկատելի դարձնելով դեֆորմացիաների և լարումների փոփոխությունը: Ընտրված ճնշման արժեքից զգալի շեղումները՝ թե մեծացման և թե նվազեցման դեպքում, կարող են հանգեցնել, համապատասխանաբար, ոչ տեսանելի կառուցվածքային փոփոխությունների կամ սխալ արդյունքների: Հաշվարկների համար խորանարդ նմուշների հենարանային պայմաններն ընդունվել են անշարժ (նկ. 2): Այս կերպ ապահովվել է լարվածադեֆորմատիվ վիճակի սիմետրիկ մոդելավորում, ինչը նպաստում է բետոնի մեխանիկական վարքագծի առավել հուսալի համեմատական վերլուծությանը:



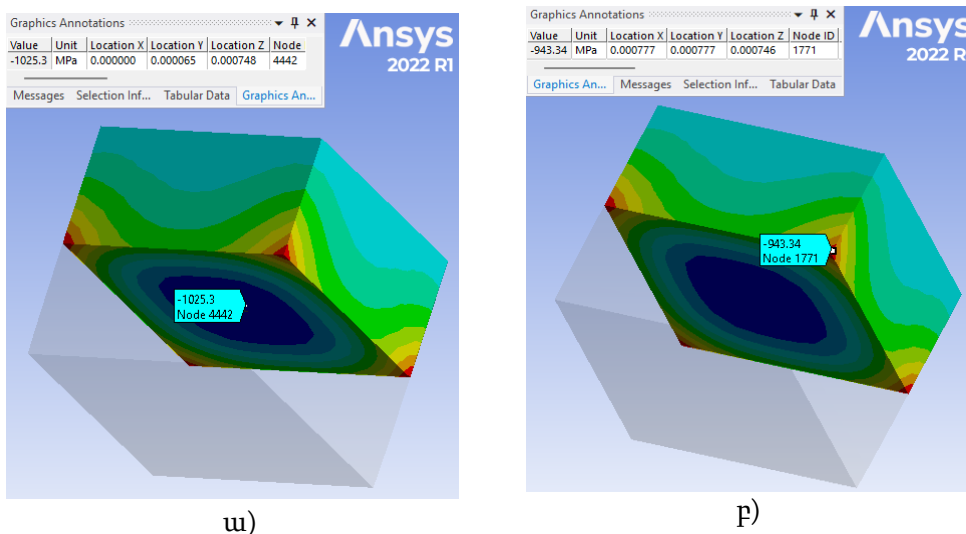
Նկ. 2. Մոդելավորված նյութերը սեղմման ազդեցության տակ P ճնշմամբ. ա - առանձնացված բետոնի մատրից, բ - առանձնացված ածխածնային թելքերի մատրից

Արդյունքներ և քննարկում

Սույն բաժնում ներկայացված են “ANSYS” թվային հաշվարկային ծրագրով ՎՏՄ-ի կիրառմամբ ՆՕՏ-ում մոդելավորված, տարբեր բերված կոնցենտրացիաներով (0,05 %, 0,10 % և 0,15 % ցեմենտի բերված զանգվածի նկատմամբ) և արտաքին տրամագծերով (10 նմ, 20 նմ և 30 նմ) ԲԱՆԽ-երով B25 դասին համապատասխանող բետոնե խորանարդ նմուշների առաձգականության մոդուլների որոշումը, լարվածային վիճակի վերլուծությունը և դրանց ստացված արդյունքները:

Աղ. 2-ում ներկայացված են նանոմասշտաբում “Material Designer” ենթածրագրի միջոցով ՆՕՏ-ում մոդելավորված թվային հաշվարկված 9 տեսակ խորանարդաձև նմուշ-նյութերի առաձգականության մոդուլները երեք գլխավոր ուղղություններով՝ ԲԱՆԽ-երի տարբեր բերված կոնցենտրացիաների (ըստ ցեմենտի զանգվածի) և արտաքին տրամագծերի դեպքում: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ ԲԱՆԽ-երի կոնցենտրացիայի աճին զուգահեռ բարելավվում են բաղադրանյութի կոշտության բնութագրերը բոլոր երեք ուղղություններով, մինչդեռ նանոխողովակների չափերի փոփոխությունն էական ազդեցություն չի թողնում:

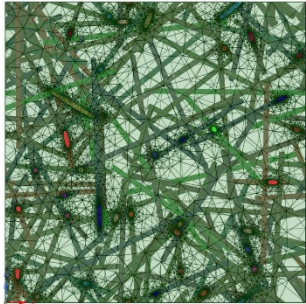
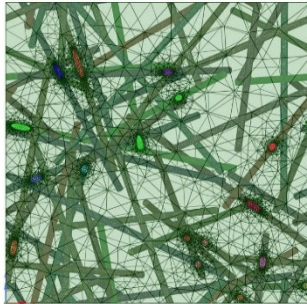
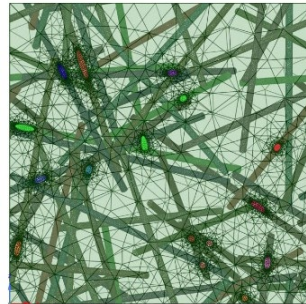
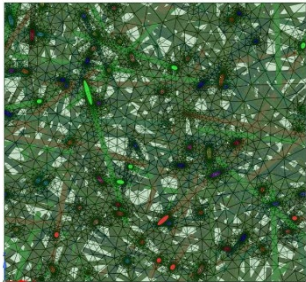
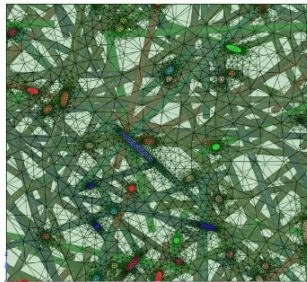
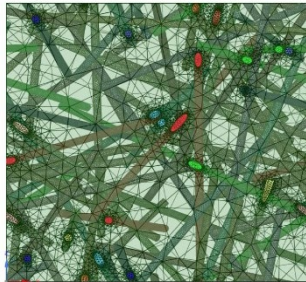
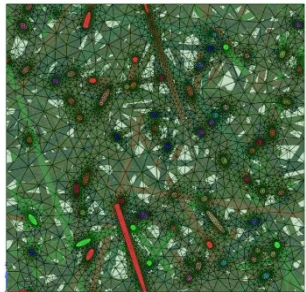
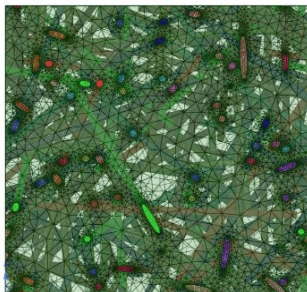
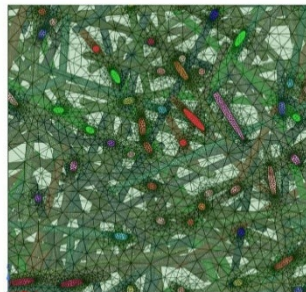
Նմուշների լարվածային վիճակը դիտարկվել է միայն առանցքային սեղմման ազդեցությունից՝ միննույն սեղմող ճնշումից: Սեղմման դեպքում բետոնի նորմալ լարումների գնահատման համար փորձարկվող նմուշները բաժանվել են ըստ բարձրության հավասար երկու մասի՝ լայնական հատույթներով: Լարումների վերլուծությունը կատարվել է հատույթի անկյունային և միջնամասային հատվածների համար: Բոլոր նմուշների վերլուծությունը կատարվել է, դիտարկելով միայն բետոնային մատրիցը նանոխողովակներից առանձնացված, ելնելով այն դիտարկումից, որ նյութի հնարավոր քայքայումը տեղի է ունենում առավել փոքր կոշտություն ունեցող նյութում՝ վերջինիս լարումների բեռնաթափումը և վերաբաշխումը հետագոտելու նպատակով: Նմուշ 0 -ի և ԲԱՆԽ-երով B25 դասի նանոբետոնե խորանարդ 1-9 նմուշների ՎՏՄ -ով սեղմման դեպքում լարվածային վիճակի թվային վերլուծության արդյունքները ներկայացված են նկ. 3-5 -ում:

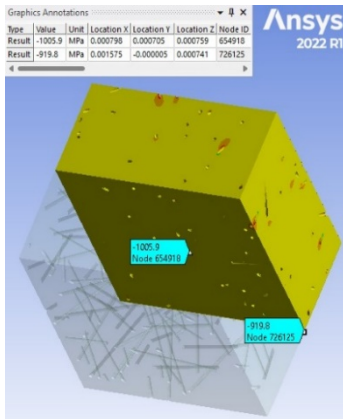


Նկ. 3. Նմուշ0-ի լարվածային վիճակի վերլուծությունը սեղմման դեպքում. ա-նորմալ լարումները լայնական հատույթի միջին հատվածում, բ-նորմալ լարումները լայնական հատույթի եզրային անկյունում

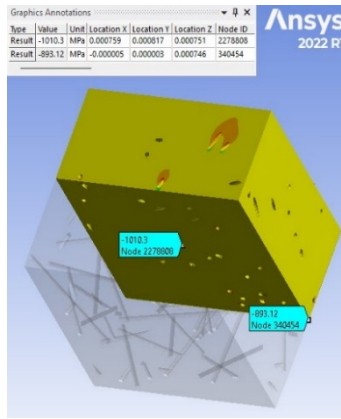
Աղյուսակ 2

ԲԱՆԻ-երի տարբեր բերված կոնցենտրացիաների և արտաքին տրամագծերի դեպքում մոդելավորված խորանարդ նմուշների առաձգականության մոդուլները երեք գլխավոր ուղղություններով (E, ՄՊա)

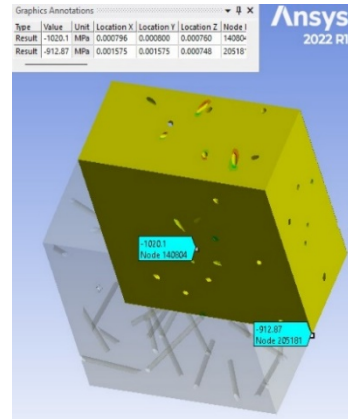
Կոնցենտրացիա, %	Արտաքին տրամագիծ, նմ		
	10 (25*)	20 (33*)	30 (40*)
0,05 (0,01*)	 <p>$E_1=30,30, E_2=30,29,$ $E_3=30,30$</p>	 <p>$E_1=30,31, E_2=30,30,$ $E_3=30,31$</p>	 <p>$E_1=30,27, E_2=30,25,$ $E_3=30,26$</p>
0,10 (0,02*)	 <p>$E_1=30,57, E_2=30,55,$ $E_3=30,56$</p>	 <p>$E_1=30,54, E_2=30,58,$ $E_3=30,54$</p>	 <p>$E_1=30,55, E_2=30,65,$ $E_3=30,59$</p>
0,15 (0,03*)	 <p>$E_1=30,78, E_2=30,51,$ $E_3=30,76$</p>	 <p>$E_1=30,82, E_2=30,79,$ $E_3=30,76$</p>	 <p>$E_1=30,76, E_2=30,88,$ $E_3=30,72$</p>
<p>* Փակագծերում նշված արժեքները “Ansys” ծրագրում մոդելավորված ածխածնային թելքերի կոնցենտրացիաներն (ըստ նմուշի զանգվածի) ու արտաքին տրամագծերն են, իսկ առանց փակագծերի՝ ԲԱՆԻ-երի բերված կոնցենտրացիան (ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ, վերջինս ընդունելով 500 կգ 1մ³ բետոնի ծավալում) և արտաքին տրամագիծը</p>			



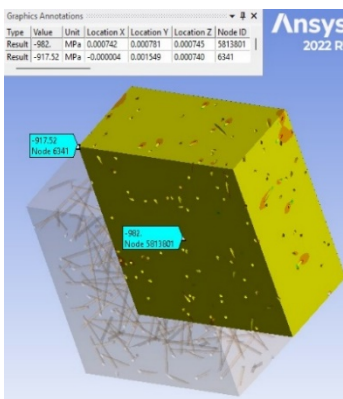
Նմուշ1



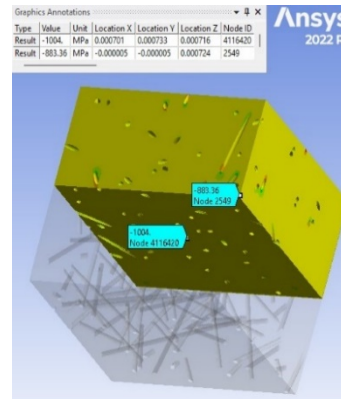
Նմուշ2



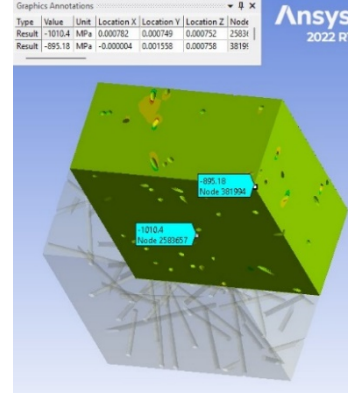
Նմուշ3



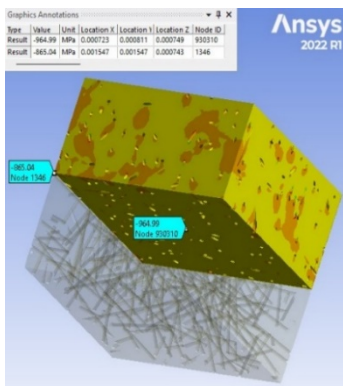
Նմուշ4



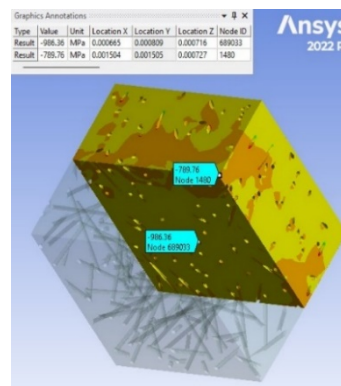
Նմուշ5



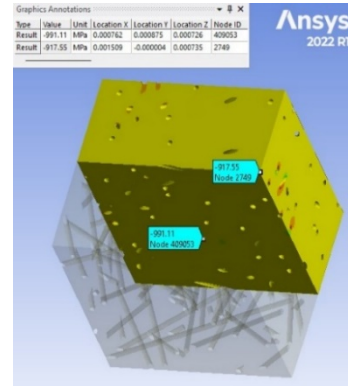
Նմուշ6



Նմուշ7



Նմուշ8

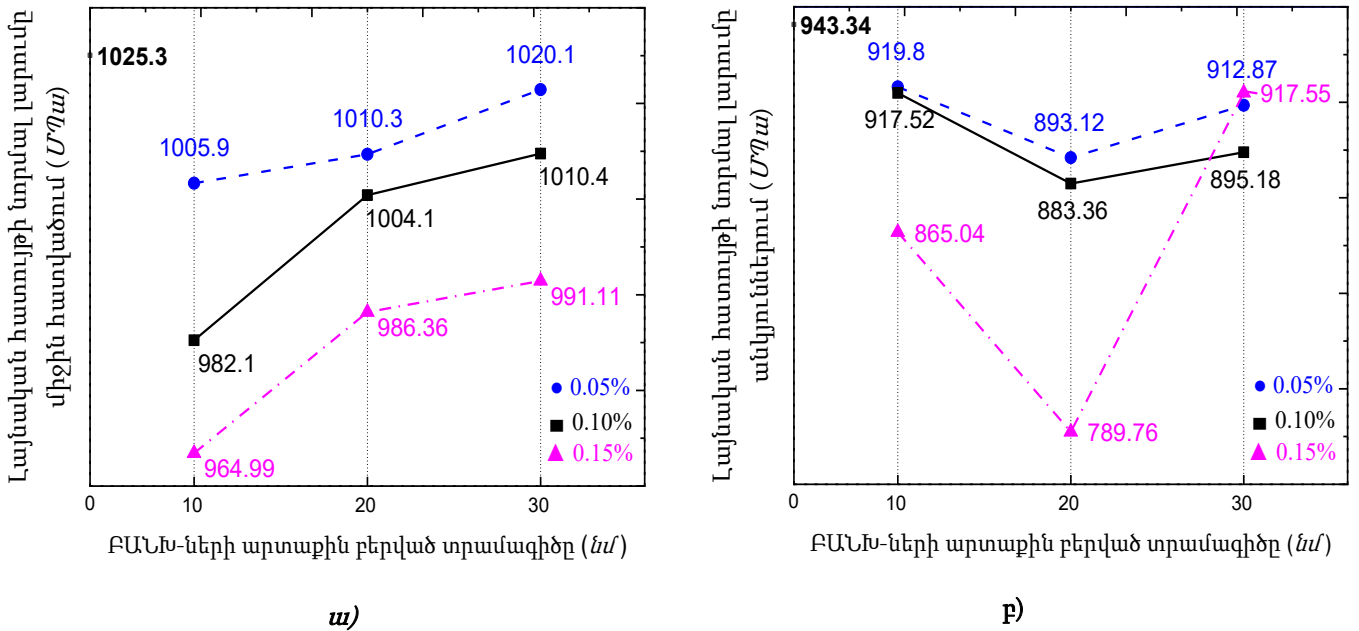


Նմուշ9

Նկ. 4 Նորմալ նմուշ (1- 9) -ի ($\approx 1550 \times 1550 \times 1550$ նմ) նորմալ լարումները լայնական հատույթի միջին հատվածում և անկյունում՝ ԲԱՆԽ-երի ցեմենտի զանգվածի նկատմամբ տարբեր բերված կոնցենտրացիաների և արտաքին տրամագծի դեպքում

Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ միևնույն սեղմման ուժի ազդեցության տակ նմուշների լայնական հատույթի միջին հատվածում լարումներն առավելապես փոքրացել են համեմատաբար փոքր տրամագծի (10 նմ) ԲԱՆԽ-երի կիրառմամբ, ինչի արդյունքում էլ ԲԱՆԽ-երի 0,05 %, 0,10 % և 0,15 % կոնցենտրացիայի պարագայում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է, համապատասխանաբար, 1,93, %, 4,39, % և 6,25 %: Լայնական հատույթի անկյունային հատվածներում ամենափոքր լարումները ստացվում են ԲԱՆԽ-երի միջին չափի տրամագծի (20 նմ) ԲԱՆԽ-երի կիրառմամբ, որի արդյունքում ԲԱՆԽ-երի 0,05 %, 0,10 % և 0,15 % կոնցենտրացիայի

դեպքում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է, համապատասխանաբար, 5,62%, 6,79% և 19,46%: Այստեղ 10 և 30 նմ արտաքին տրամագծի դեպքում լարումները բետոնում ավելի մեծ են, համեմատած 20 նմ-ի հետ: Առաջինում մասնիկների խիտ դասավորությունը բերում է անկյունային հատվածների կոշտության աճին, առավել նկատելի դարձնելով լարումների կենտրոնացումը: Իսկ երկրորդ դեպքում ԲԱՆԽ-երի նոսր դասավորմամբ հատվածքի անկյունները բավարար կերպով չեն ամրանավորվում նանոմասնիկներով, ուստի լարումները կտրուկ կերպով մոտենում են 0-ական նմուշի համապատասխան արժեքին:



Նկ. 5. Խորանարդ նմուշ (1-9)-ի լայնական հատվածում նորմալ լարումները ԲԱՆԽ-երի 10, 20, 30 նմ արտաքին տրամագծի և 0,05, 0,10 և 0,15 % կոնցենտրացիայի դեպքում. ա - լայնական հատվածքի միջին հատվածում, բ - լայնական հատվածքի անկյուններում

Ստացվածից կարելի է եզրակացնել, որ ցեմենտային կոմպոզիտներում ԱՆԽ-երի միևնույն կոնցենտրացիայի և համեմատաբար փոքր տրամագծի պարագայում բետոնե մատրիցում նորմալ լարումները համեմատականորեն փոքրանում են: Թեև առանցքային սեղմման դեպքում նյութի մեխանիկական հատկությունների լիարժեք հետազոտում իրականացնելու համար բացի նորմալ լարումներից կարևոր դեր ունեն նաև ազդող ուժին ուղղահայաց ուղղությամբ զարգացող դեֆորմացիաների գնահատումը, բետոնային մատրիցում միևնույն ուժի ազդման պարագայում, վերջինիս ուղղությամբ գործող նորմալ լարումների նվազումն էական նշանակություն ունի նյութի սեղմման ամրության բարելավման համար, հաշվի առնելով նմուշում ներքին բարդ լարվածային վիճակի առկայությունն առանցքային սեղմման դեպքում [21]:

Ընդհանուր առմամբ, ստացված արդյունքները հաստատում են ԲԱՆԽ-երով նանոշաղախների և նանոբետոնների սեղմման ամրության փորձարական հետազոտության ստացված արդյունքները [13, 14]: Թեև փոքր տրամագծի ԱՆԽ-երը տեխնոլոգիապես ավելի դժվար են դիսպերսվում կապակցանյութում, դրանք առավել համասեռ են բաշխվում խառնուրդում և լցնում նանո- և

միկրոմասշտաբային դատարկությունները, որի շնորհիվ լարումներն ավելի հավասարաչափ են բաշխվում ցեմենտային մատրիցում [22, 23]:

Թվային վերլուծության մեջ նմուշների մեխանիկական հատկությունների բարելավումը ԲԱՆԽ-երի կոնցենտրացիայի աճին զուգահեռ, պայմանավորված է նաև մասնիկների դիսպերսման և ազլոմերացիայի փաստացի բացակայությամբ, քանի որ վերջինս առաջանում է միայն իրական-փորձարարական տեխնոլոգիական գործընթացի դեպքում [15]: Այստեղ մեխանիկական առավել բարձր հատկություններ ունեցող հավելանյութի կոնցենտրացիայի աճն ուղղակիորեն բերում է նյութի կրողունակության բարելավմանը: Փորձարարական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ այդ աճը տեղի է ունենում ոչ անընդհատ, որոշ սահմանից հետո սկսում է նվազել՝ ելնելով վերոնշյալ խնդիրներից [13, 15]:

Կարելի է եզրակացնել, որ ԲԱՆԽ-երի միևնույն կոնցենտրացիայի և փոքր արտաքին տրամագծի դեպքում բետոնի լարվածային վիճակը բարելավվում է, պայմանավորված նանոմասնիկների համասեռ ցրմամբ և լարումների առավել արդյունավետ վերաբաշխմամբ նյութի ծավալում: Ստացվածը կարող է նպաստել ցեմենտային կապակցանյութով նանոբետոնե խորանարդ նմուշների հետագա մակրոմասշտաբային հետազոտությունների շարունակությանը, հաշվի առնելով բետոնի ֆիզիկական ոչ գծայնությունը:

Եզրակացություն

Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ միևնույն սեղմման ուժի ազդեցության տակ նանոաձխածնային խորանարդ նմուշների լայնական հատույթի միջին հատվածում լարումներն առավելապես փոքրացել են համեմատաբար փոքր տրամագծի (10 նմ) ԲԱՆԽ-երի կիրառմամբ, ինչի արդյունքում էլ ԲԱՆԽ-երի 0,05%, 0,10% և 0,15% կոնցենտրացիայի պարագայում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է, համապատասխանաբար, 1,93%, 4,39% և 6,25%:

Լայնական հատույթի անկյունային հատվածներում ամենափոքր լարումները ստացվում են միջին չափի տրամագծի (20 նմ) ԲԱՆԽ-երի կիրառմամբ, որի արդյունքում ԲԱՆԽ-երի 0,05%, 0,10% և 0,15% կոնցենտրացիայի դեպքում նորմալ լարումը բետոնում փոքրացել է, համապատասխանաբար, 5,62%, 6,79% և 19,46%:

ԲԱՆԽ-երի կոնցենտրացիայի աճին զուգահեռ երեք գլխավոր ուղղություններով բարելավվում են բաղադրանյութի կոշտության բնութագրերը, մինչդեռ նանոխողովակների չափերի փոփոխությունն էական ազդեցություն չի թողնում:

Հաշվի առնելով կատարված փորձարարական և թվային հետազոտությունների ստացված արդյունքների համապատասխանությունը՝ կարելի է եզրակացնել, որ ԲԱՆԽ-երի միևնույն կոնցենտրացիայի և փոքր արտաքին տրամագծի դեպքում բետոնի լարվածային վիճակը բարելավվում է, պայմանավորված նանոմասնիկների համասեռ ցրմամբ և նյութի ծավալում լարումների առավել արդյունավետ վերաբաշխմամբ: Այս աշխատանքում կատարված ուսումնասիրությունները կարող են հիմք հանդիսանալ հետագա փորձարարական հետազոտությունների համար՝

իննայելով նյութական ռեսուրսներ և ժամանակ, ինչպես նաև նպաստել նանոշաղախների և նանոբետոնների մեխանիկական հատկությունների կատարելագործմանը:

Գրականության ցանկ

- [1] **Y. Alvarez, M.I. Prieto, A. Cobo**, Mechanical Properties of Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibers Subjected to High Temperatures and Different Cooling Regimes. *Buildings* 13 (2023) 1445.
- [2] **Dong-Hee Son, Dongsun Hwangbo, Heongwon Suh, Baek-II Bae, Sungchul Bae, Chang-Sik Choi**, Mechanical properties of mortar and concrete incorporated with concentrated graphene oxide, functionalized carbon nanotube, nano silica hybrid aqueous solution. *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023) e01603, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01603>.
- [3] **M. Yaghobian, G. Whittleston**, A critical review of carbon nanomaterials applied in cementitious composites – A focus on mechanical properties and dispersion techniques. *Alexandria Engineering Journal* 61 (5) (2022) 3417–3433, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.053>.
- [4] **A. Peyvandi, L.A. Sbia, P. Soroushian, K. Sobolev**, Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 265–269. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2013.06.094.
- [5] **S. Du, J. Wu, O. Alshareedah, and X. Shi**, Nanotechnology in cement-based materials: A review of durability, modeling, and advanced characterization, *Nanomaterials* 9 (9) (2019) 1213, <https://doi.org/10.3390/nano9091213>.
- [6] **Lai Yin Chan, Bassem Andrawes**, Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength, *Computational Materials Science* 47 (2010) 995.
- [7] **Z. Yue-Feng, Z. Chan, W. Jing-Dong, S. Lei, L.Ji**, Influence of electric field on dispersion of carbon nanotubes in liquids. *J Disper Sci Technol* 27 (2006) 371–5.
- [8] **M.-F.Yu, O.Lourie, M.J.Dyer, K.Moloni, T.F.Kelly, R.S.Ruoff**, Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science* 287 (2000) 637–40.
- [9] **X.-L. Xie, Y.-W. Mai, X.-P.Zhou**, Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review. *Mater Sci Eng R Rep* 49 (2005) 89–112.
- [10] **A. Naqi, N. Abbas, N. Zahra, A. Hussain, S. Q. Shabbi**, Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials. *Journal of Material Research and Technology* 8(1) (2019) 1203–1211.
- [11] **A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, V.Penttala**, Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Adv Cem Res* 20 (2008) 65–73.
- [12] **S.J. Sujatha, V.R. Ruban Daniel**, Effects of multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) on strength enhancement and microstructural changes in high-performance concrete. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* 33(10) (2025) 1042-1054.
- [13] **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, DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14151271>.
- [14] **S. Malumyan, N. Muradyan**, The Effect of Different Multi-Walled Carbon Nanotubes Aspect Ratio on the Compressive Strength of the Cement-Based Concrete, *JAER* 8 (2025) 62-68, DOI: <https://doi.org/10.54338/27382656-2025.8-06>.

- [15] **I.E. Kavvadias, K. Tsongas, K.E. Bantilas, M.G. Falara, A.K. Thomoglou, F.I. Gkountakou, A. Elenas**, Mechanical Characterization of MWCNT-Reinforced Cement Paste: Experimental and Multiscale Computational Investigation. *Materials* 16 (2023) 5379.
- [16] **B.S. Sindu, S. Sasmal, S. Gopinath**, A multi-scale approach for evaluating the mechanical characteristics of carbon nanotube incorporated cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 317–327.
- [17] **V. Šmilauer, P. Hlaváček, P. Padevět**, Micromechanical analysis of cement paste with carbon nanotubes. *Acta Polytech.* 52 (2012) 22–28.
- [18] **M. Eftekhari, S. Mohammadi, M. Khanmohammadi**, A hierarchical nano to macro multiscale analysis of monotonic behavior of concrete columns made of CNT-reinforced cement composite. *Constr. Build. Mater.* 175 (2018) 134–143.
- [19] **V. Papadopoulos, M. Impraimakis**, Multiscale modeling of carbon nanotube reinforced concrete. *Compos. Struct.* 182 (2017) 251–260.
- [20] **C. Talayero, O. Ait-Salem, P. Gallego, A. Páez-Pavón, R.G. Merodio-Perea, I. Lado-Touriño**, Computational Prediction and Experimental Values of Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Cement. *Nanomaterials* 11 (2021) 2997.
- [21] **I. Takamoto, S. Masao, M. Takahiro, N. Hiroshi, T. Masahiro**, Crack mode and life of Ti-6Al-4V under multiaxial low cycle fatigue. *Frattura ed Integrità Strutturale.* 34 (2015) 487-497.
- [22] **Fangfang Gao, Wei Tian, Zhen Wang, Feng Wang**, Effect of diameter of multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and microstructure of the cement-based material. *Construction and Building Materials.* 260 (2020) 1-11.
- [23] **R.K. Abu Al-Rub, A.I. Ashour, B.M. Tyson**, On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. *Construction and Building Materials.* (2012) 647-655.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА

Сурен Ашотович Малумян

Национальный университет архитектуры и строительства Армении, г. Ереван, РА
surmalumyan@gmail.com

Введение углеродных нанотрубок (УНТ) в состав бетона и раствора способствует значительному улучшению их механических свойств. Несмотря на то, что экспериментальные методы обеспечивают получение реальных результатов, они требуют значительных материальных затрат и времени. Современные методы численного моделирования позволяют прогнозировать и оптимизировать результаты экспериментальных исследований. С использованием расчетного программного комплекса “ANSYS” и метода конечных элементов были смоделированы материалы в виде кубических образцов с различными концентрациями и внешними диаметрами УНТ. В ходе численного анализа исследовались модули упругости образцов (E_1 , E_2 , E_3) и напряжённое состояние при осевом сжатии. При одинаковом усилии сжатия нормальные напряжения в средней части поперечного сечения бетонной матрицы существенно снижаются по сравнению с контрольными образцами: для УНТ меньшего диаметра — на 6,25%, а в угловых зонах — для трубок среднего диаметра — на 19,46%. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, подтверждая эффективность применения нанорастворов и нанобетонов на основе цементного вяжущего с УНТ. Проведённые исследования

могут служить основой для последующих экспериментальных работ, позволяя экономить материальные ресурсы и время, а также способствовать совершенствованию механических свойств нанораст-
воров и нанобетонов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, бетон, метод конечных элементов, сжатие, внешний диаметр

NUMERICAL STUDY OF THE MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES EFFECT ON THE STRESS STATE OF CONCRETE

Suren Malumyan

National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, RA
surmalumyan@gmail.com

The incorporation of carbon nanotubes (CNTs) into concrete and mortar contributes to a significant improvement in their mechanical properties. Although experimental methods provide real and reliable results, they require considerable material resources and time. Modern numerical modeling techniques are employed to predict and optimize experimental outcomes. Using the ANSYS computational software and the Finite Element Method (FEM), cube specimens were modeled with various CNT concentrations and outer diameters. The numerical analysis focused on evaluating the elastic moduli of the specimens (E_1 , E_2 , E_3) and their stress distribution under uniaxial compression. Under the same compressive pressure, the normal stresses within the midsection of the concrete matrix significantly decreased compared to the reference specimens — by 6,25 % for smaller-diameter CNTs and by 19,46 % in the corner points for CNTs of medium diameters. The obtained results are in good agreement with experimental findings, confirming the effectiveness of CNT-reinforced cementitious nanomortars and nanoconcretes. The conducted study can serve as a foundation for further experimental research, helping to save material resources and time, as well as enhancing the mechanical performance of CNT-based mortars and concretes.

Keywords: carbon nanotubes, concrete, finite element method, compression, outer diameter

Մալումյան Սուրեն Աշոտի (ՀՀ, ք. Երևան) - ՃՇՀԱՀ, ՄՇՄՖ դեկաբրտամենտ, ասիստենտ, կրտսեր գիտաշխատող, (+374)95229447, surmalumyan@gmail.com

Малумян Сурен Ашотович (РА, г. Ереван) - НУАСА, Департамент Математики, строительной механики и физики, ассистент, младший научный сотрудник, (+374)95229447, surmalumyan@gmail.com

Malumyan Suren (RA, Yerevan) - NUACA, MBMF department, assistant, junior researcher, (+374)95229447, surmalumyan@gmail.com

Ներկայացվել է՝ 06.10.2025թ.

Գրախոսվել է՝ 03.11.2025թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 22.12.2025թ.