

ՓՈՍՈՐԱԿՆԵՐԻ ՇԵՊԵՐԻ ՎԱՐՔԱԳԾԻ ՎՐԱ ՓՈՐՄԱՆ ԽՈՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հայկ Ստյոպայի Ղարիբյան

Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան, ք. Երևան, ՀՀ
haykgharibyan759@gmail.com

Ուսումնասիրվել է փոստրակների շեպերի վարքագիծը՝ տարբեր փորման խորությունների և ամրացման համակարգերի կիրառման պայմաններում: Հետազոտության նպատակն է գնահատել տարբեր ինժեներական լուծումների ազդեցությունը շեպերի լարվածադեֆորմատիվ վարքագծի և անվտանգության գործակցի վրա: Թվային մոդելավորումն իրականացվել է PLAXIS 2D վերջավոր տարրերի մեթոդով՝ կիրառելով փուլային փորման (Staged Construction) մոտեցումը: Հետազոտության շրջանակներում դիտարկվել են երեք ամրացման համակարգեր՝ շպունտային պատ (Sheet Pile Wall), հորատահատող ցցային պատ (Secant Pile Wall) և երկաթբետոնե դիաֆրագմային պատ (Diaphragm Wall): Հաշվարկները կատարվել են նույն ինժեներակրաբանական պայմաններում՝ երեք տարբեր փորման խորությունների համար (4մ, 6մ և 8մ)՝ ստատիկ բեռնվածքների ազդեցության ներքո: Յուրաքանչյուր դեպքի համար իրականացվել է հորիզոնական տեղափոխությունների, ներքին ուժերի (ծռող մոմենտների) և անվտանգության գործակցի համեմատական վերլուծություն: Ստացված արդյունքները դասակարգվել են բազմաչափ գնահատման մեթոդով (TOPSIS)՝ ապահովելով ամրացման համակարգերի օբյեկտիվ և համակարգված համեմատություն տարբեր խորությունների պայմաններում: Վերլուծության արդյունքում սահմանվել են փորման խորության աճի ազդեցությունները փոստրակի շեպերի լարվածադեֆորմատիվ վարքագծի վրա, ինչպես նաև տարբեր ամրացման համակարգերի արդյունավետության տարբերությունները:

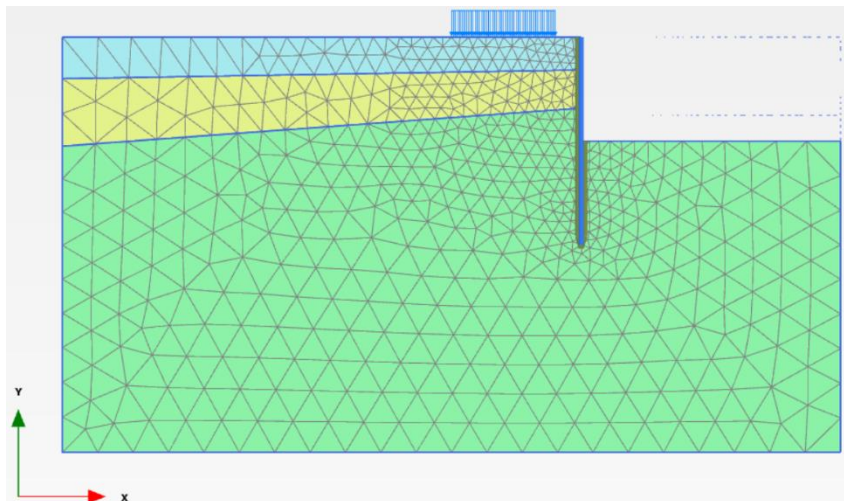
Բանալի բառեր. փոստրակի շեպ, անվտանգության գործակից, ամրացման մեթոդներ, շպունտային պատ, հորատահատող ցցային պատ, երկաթբետոնե դիաֆրագմային պատ, TOPSIS

Ներածություն

Ժամանակակից շինարարական գործելակերպում, կախված շենքերի և կառույցների նախագծային ու կոնստրուկտիվ պահանջներից, հաճախ առաջանում է տարբեր խորությունների փոստրակների փորման անհրաժեշտություն: Նման աշխատանքները շինարարական հրապարակներում համարվում են բարդ և անվտանգության տեսանկյունից առավել կրիտիկական առաջադրանքներից, որոնք պահանջում են ճշգրիտ երկրատեխնիկական վերլուծություններ և փոստրակների շեպերի ամրացման հուսալի համակարգեր: Այդուհանդերձ, Հայաստանի Հանրապետությունում փոստրակների նախագծման և կայունության վերլուծության խնդիրները դեռևս մնում են

թերի ուսումնասիրված: Շատ դեպքերում, պատշաճ ճարտարագիտական վերլուծության և նախագծային փաստաթղթերի բացակայության պատճառով, բարդ գրունտային պայմաններում փոստրակներն իրականացվում են ուղղաձիգ շեպերով՝ առանց պատշաճ ամրացման համակարգերի, ինչը հաճախ հանգեցնում է փլուզումների, մարդկային զոհերի և զգալի ֆինանսական կորուստների:

Այս ռիսկերը մեղմելու և օպտիմալ ինժեներական լուծումներ ընտրելու նպատակով, սույն հետազոտությունում թվային մոդելավորման միջոցով վերլուծվում է փոստրակների շեպերի լարվածադեֆորմատիվ վարքագիծը տարբեր փորման խորությունների և ամրացման համակարգերի կիրառման պայմաններում: Ուսումնասիրությունն իրականացվում է III կարգի գրունտային պայմաններում՝ ստատիկ բեռնվածքների ազդեցության տակ: Հետազոտության շրջանակներում PLAXIS 2D ծրագրային համակարգում վերջավոր տարրերի մեթոդով և փուլային փորման (Staged Construction) մոտեցմամբ մոդելավորվել են երեք հիմնական ամրացման համակարգեր՝ շպունտային պատ, հորատահատող ցցային պատ և երկաթբետոնե դիաֆրագմային պատ (նկ. 1):



Նկ. 1. Հետազոտվող փոստրակի և հենապատի համակարգի բազային երկրաչափական մոդելը և եզրային պայմանները

Հաշվարկներն իրականացվել են երեք տարբեր խորությունների (4մ, 6մ և 8մ) համար՝ յուրաքանչյուր դեպքի համար գնահատելով հորիզոնական տեղափոխությունները, ծող մոմենտները և անվտանգության գործակիցները: Տարբեր խորություններում ստացված բազմաչափ ինժեներական ցուցանիշների օբյեկտիվ և համակարգված համեմատությունն ապահովելու նպատակով, սույն աշխատանքում կիրառվել է բազմաչափ գնահատման և որոշումների կայացման *TOPSIS* (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) մեթոդը, ինչը թույլ է տվել իրականացնել ամրացման համակարգերի արդյունավետության քանակական դասակարգում:

Նյութեր և մեթոդներ

Դիտարկվող փոստրակի հաշվարկային սխեմաները մոդելավորվել են որպես փուլային փորման և ամրացման միջոցառումների տեխնոլոգիական հաջորդականություն (Staged

Construction)՝ ապահովելով իրական շինարարական գործընթացի առավելագույն նմանակումը: Հաշվարկներն իրականացվել են PLAXIS 2D ծրագրային համակարգում՝ վերջավոր տարրերի մեթոդի (FEM) կիրառմամբ, ինչը թույլ է տալիս լիարժեք գնահատել գրունտային զանգվածի և հենապատերի լարվածադեֆորմատիվ վիճակը փորման ցանկացած փուլում, ինչպես նաև ստանալ ինժեներական արդյունքները դիտարկվող կրիտիկական կետերում [1, 2]: Հետազոտության շրջանակներում կատարվել է երեք հիմնական ամրացման համակարգերի (շպունտային պատ, հորատահատող ցցային պատ և երկաթբետոնե դիաֆրագմային պատ) համեմատական վերլուծություն՝ երեք տարբեր փորման խորությունների (4 մ, 6 մ և 8 մ) պայմաններում: Բարձակային սխեմայի ընտրությունը պայմանավորված է խիտ քաղաքային միջավայրի սահմանափակումներով, որտեղ ստորգետնյա հաղորդակցությունները բացառում են գրունտային խարխիսների տեղադրումը, ինչպես նաև տարբեր տեսակի հենապատերի սեփական կոշտության սահմանային հնարավորությունների մաքուր համեմատության անհրաժեշտությամբ [3-5]:

Քանի որ հաշվարկներն իրականացվել են PLAXIS 2D միջավայրում, կիրառվել է հարթ դեֆորմացիոն (Plane Strain) լարվածային վիճակի մոտեցումը, որի դեպքում խնդիրը դիտարկվում է երկչափ կտրվածքով, և փոստրակի հատակագծային չափերը հաշվարկային մոդելի վրա անմիջական ազդեցություն չեն ունենում: Բացի այդ, հաշվի առնելով, որ փոստրակի պարագծով գործում են նույն երկրաչափական պայմանները և նույնաբնույթ բեռնավորումը, խնդիրը բավարար է ուսումնասիրել միայն մեկ բնորոշ կտրվածքով (մեկ շեփի համար): Ստացված լարվածադեֆորմատիվ վիճակը և հաշվարկային արդյունքները տվյալ կտրվածքի համար նույնական են փոստրակի մյուս կողմերի համար, ուստի առանձին մոդելավորում յուրաքանչյուր շեփի համար անհրաժեշտ չէ: Ներկայացված մոտեցումը ճիշտ է այն դեպքում, երբ փոստրակն ունի կանոնավոր հատակագիծ, երկրաբանական պայմանները համասեռ են, իսկ պարագծով կիրառվող բեռնավածքները և եզրային պայմանները նույնական են: Նման պայմաններում PLAXIS 2D-ի հարթ դեֆորմացիոն մոդելը համարվում է բավարար՝ մեկ բնորոշ կտրվածքով խնդիրը ներկայացնելու և ամբողջ փոստրակի վարքագիծը գնահատելու համար [6]:

Հաշվարկային ծրագրում փոստրակի գրունտը մոդելավորվել է *Մոր-Կուլոնի (Mohr-Coulomb)* առաձգապլաստիկ նյութի մոդելով՝ *գծային առաձգական – իդեալական պլաստիկ (Linear Elastic-Perfectly Plastic)* ենթադրությամբ: Գրունտային միջավայրի նկարագրման համար կիրառվել են հիմնական ֆիզիկամեխանիկական պարամետրերը՝ ներքին շփման անկյունը, տեսակարար շաղկապվածությունը, դեֆորմացիայի մոդուլը, Պուասոնի գործակիցը և տեսակարար կշիռը: Մինչև ամրության սահմանային վիճակին հասնելը գրունտի վարքագիծը նկարագրվում է գծային առաձգական օրենքներով, իսկ սահմանային վիճակին հասնելուց հետո դիտարկվում է ոչ առաձգական դեֆորմացիաների զարգացում և պլաստիկ գոտիների առաջացում՝ բնորոշ Mohr-Coulomb մոդելի կայունության կորստի պայմաններին [7, 8]:

Տարբեր ամրացման համակարգերի համեմատական գնահատման նպատակով արդյունքները հետագա փուլում մշակվել են բազմաչափ որոշումների կայացման *TOPSIS (Technique for*

Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) մեթոդով, որը կիրառվել է որպես հետվերլուծական գործիք՝ միաժամանակ հաշվի առնելով հիմնական ինժեներական ցուցանիշները՝ հորիզոնական տեղափոխությունները (U_x), ծոռո մոմենտները (M_{max}), հարակից գրունտի մակերևույթի նստվածքները (U_y) և անվտանգության գործակիցները (ΣM_{sf}): Ինժեներական և տեխնոլոգիական իրատեսությունն ապահովելու նպատակով՝ այս քանակական ցուցանիշներին զուգահեռ ներմուծվել է նաև կոնստրուկտիվ բարդության որակական չափանիշը՝ գնահատված 1-ից 3 փորձագիտական սանդղակով: Մեթոդը հնարավորություն է տվել համակարգերի վարքագիծը ներկայացնել մեկ համակցված քանակական ցուցիչով՝ ապահովելով դրանց համեմատական դասակարգումը նույն նախագծային պայմաններում [9, 10]:

Մեթոդի դասական հաշվարկային ալգորիթմն իրականացվել է հետևյալ մաթեմատիկական քայլերի հաջորդականությամբ.

Քայլ 1. Ելակետային մատրիցի կազմում:

Կառուցվում է ելակետային $m \times n$ չափի $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ մատրիցը, որտեղ m -ն այլընտրանքների (ամրացման սխեմաների մոդելներ) քանակն է ($m=9$), իսկ n -ը՝ գնահատման չափանիշները ($n=5$):

Քայլ 2. Տվյալների նորմալացում:

Չափանիշների տարբեր չափման միավորները չեզոքացնելու նպատակով իրականացվում է վեկտորային նորմալացում՝ ստանալով $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ մատրիցը, որտեղ յուրաքանչյուր նորմալացված տարր որոշվում է հետևյալ բանաձևով.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}: \quad (1)$$

Քայլ 3. Կշռային գործակիցների հաշվառում:

Հաշվի առնելով չափանիշների ω_j փորձագիտական կշիռները ($\sum \omega_j = 1$)՝ կառուցվում է $V = [v_{ij}]_{m \times n}$ մատրիցը, որտեղ յուրաքանչյուր կշռված տարր հաշվարկվում է հետևյալ կերպ.

$$v_{ij} = \omega_j \cdot r_{ij}: \quad (2)$$

Քայլ 4. Իդեալական և հակաիդեալական լուծումների սահմանում:

Որոշվում են դրական իդեալական կետը՝

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_k^+\} = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \text{ և բացասական իդեալական կետը՝}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_k^-\} = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\}, \text{ որտեղ } J\text{-ն օգուտի չափանիշն է (անվտանգության գործակից } \Sigma M_{sf}), \text{ իսկ } J'\text{-ը՝ կորստի/ծախսի չափանիշները (հորիզոնական տեղափոխություններ, ծոռո մոմենտներ, նստվածքներ):}$$

Քայլ 5. Եվկլիդեսյան հեռավորությունների հաշվարկ:

Յուրաքանչյուր տարբերակի հեռավորությունը իդեալական կետերից հաշվարկվում է հետևյալ բանաձևերով.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad (3)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (4)$$

Քայլ 6. Հարաբերական մոտեցման C_i^* գործակցի հաշվարկ:

Վերջնական գործակիցը, որի հիման վրա կատարվում է համակարգերի օպտիմալության դասակարգումը, որոշվում է հետևյալ կերպ.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5)$$

Դիտարկվող ամրացման համակարգերի օպտիմալության աստիճանը գնահատվել է ըստ հաշվարկված հարաբերական մոտեցման C_i^* գործակցի արժեքների, որոնք տեղավորվում են $[0, 1]$ միջակայքում: Մաթեմատիկական այս ալգորիթի տրամաբանության համաձայն՝ որքան C_i^* գործակցի արժեքը մոտ է 1-ին, այնքան տվյալ ինժեներական լուծումը տարածականորեն ավելի մոտ է գտնվում դրական իդեալական լուծմանը (PIS) և միաժամանակ առավելագույնս հեռացված է բացասական իդեալական լուծումից (NIS): Հետևաբար, $C_i^* \rightarrow 1$ պայմանին բավարարող ամրացման համակարգը դասակարգվում է որպես տվյալ փորման խորության համար ընդհանրացված տեխնիկական չափանիշներով ամենաօպտիմալ ընտրություն:

Հաշվարկներում գրունտը մոդելավորվել է իրական ինժեներատեխնիկական ուսումնասիրության արդյունքներով ստացված տվյալների հիման վրա (նկ. 2), որտեղ գրունտի շերտերը դասակարգված են հետևյալ ձևով.

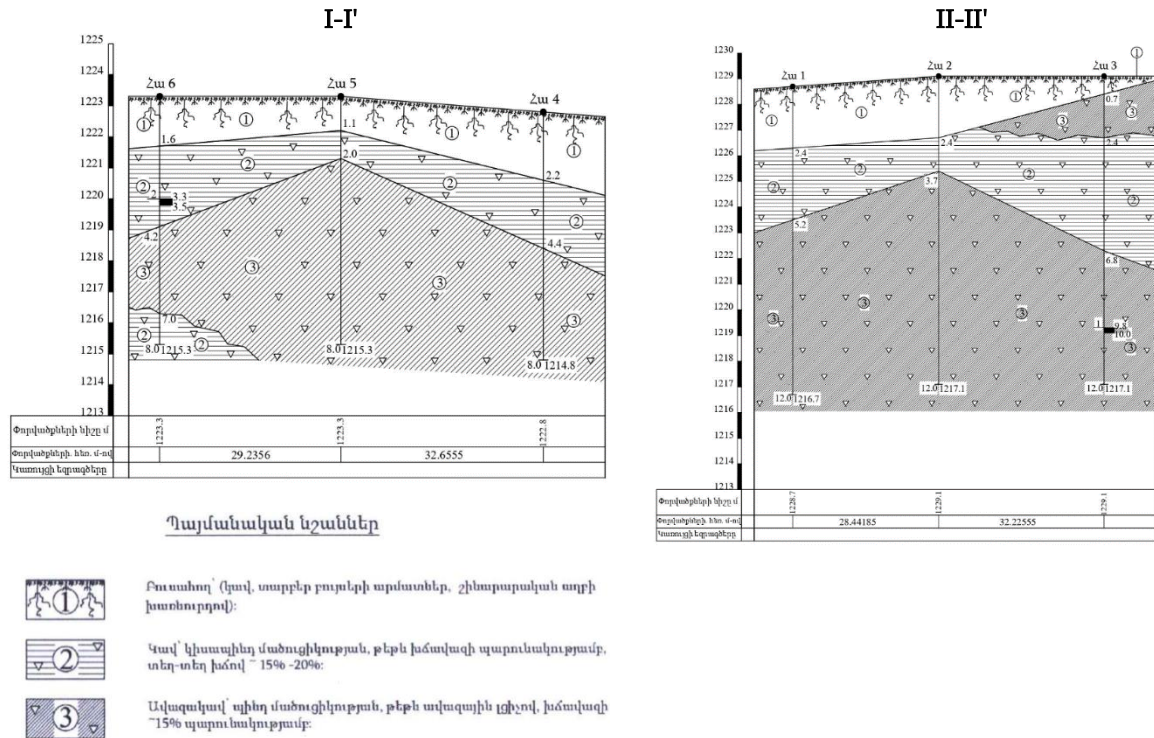
- շերտ 1. բուսահող (կավ, տարբեր բույսերի արմատներ, շինարարական աղբի խառնուրդով),
- շերտ 2. կավ՝ կիսապինդ մածուցիկության, թեթև խճավազի պարունակությամբ, տեղ-տեղ խճող մոտ 15...20 %,
- շերտ 3. ավազակավ՝ պինդ մածուցիկությամբ, թեթև ավազային լցիչով, խճավազի 15 % պարունակությամբ:

Աղ. 1-ում տրված են գրունտի շերտերի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները:

Աղյուսակ 1

Գրունտի շերտերի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը

№	Ֆիզիկամեխանիկական բնութագիրը		Գրունտի շերտերը		
			1	2	3
1.	Գրունտի խտությունը, $q/սմ^3$	ρ	1,40	1,84	2,03
2.	Նորմատիվային տեսակարար շաղկապվածությունը, $U^*_{\eta\omega}$	c_{II}	-	0,040	0,035
3.	Հաշվարկային տեսակարար շաղկապվածությունը, $U^*_{\eta\omega}$	c_I	-	0,035	0,030
4.	Ծակոտկենության գործակիցը	e	-	0,867	0,495
5.	Նորմատիվային ներքին շփման անկյունը, $\omega_{ստ.}$	φ_{II}	-	16	25
6.	Հաշվարկային ներքին շփման անկյունը, $\omega_{ստ.}$	φ_I	-	14	22
7.	Ձևախախտման մոդուլը, $U^*_{\eta\omega}$	E	-	12	25
8.	Բնական թեքության անկյունը, $\omega_{ստ.}$	α	-	65	50...55
9.	Գրունտի պայմանական հաշվարկային դիմադրությունը, $kq/սմ^2$	R_0	-	2,5	3,0
10.	Բնական միջին խոնավությունը, %	w	-	26,3	12,4
11.	Գրունտի ընկրկելիության գործակիցը, $u/սմ^3$	k	-	4000	4000
12.	Գրունտի կարգն ըստ սեյսմիկ հատկությունների	-	-	III	III



Նկ. 2. Ինժեներակառուցական կտրվածք I-I' և II-II'

Աղյուսակ 2

Ամրացման համակարգերի հաշվարկային պարամետրերը

№	Հաշվարկային պարամետրերը		Ամրացման համակարգերը		
			շպունտային պատ	հորատահատող ցցային պատ	դիաֆրագմային պատ
1	Անվանում (պրոֆիլ)		AZ 46-700N	-	-
2	Տրամագիծ (1 ցից), մ	D	-	0,6	-
3	Հաստություն, մ	t	-	-	0,6
4	Հատվածքի մակերես, սմ ² /մ	A	287	5380	6000
5	Առանցքային կոշտություն, կՆ/մ	EA	6,027 x 10 ⁶	15,1985 x 10 ⁶	19,5 x 10 ⁶
6	Ծովման կոշտություն, Ն·սմ ² /մ	EI	242277,0	229612,5	585000,0
7	Պուստոնի գործակից	v	0,3	0,2	0,2
8	Տեսակարար կշիռ, կՆ/սմ ²	γ _{wall}	1,63	13,45	15,0
Ծանոթություն. բոլոր մեխանիկական պարամետրերը հաշվարկված են կոնստրուկցիայի միավոր երկարության (1 մ) համար					

Հետազոտության օբյեկտիվությունն ապահովելու նպատակով դիտարկվող երեք ամրացման համակարգերի հաշվարկային պարամետրերն ընտրվել են այնպիսի հաշվարկով, որպեսզի ապահովվի դրանց համարժեք սկզբնական կոնստրուկտիվ կոշտությունը (աղ. 2): Սույն մոտե-

ցումը թույլ է տալիս նույնական պայմաններում սահմանել յուրաքանչյուր համակարգի կրողունակության սահմանները և իրականացնել դրանց օպտիմալության քանակական դասակարգումը՝ բացառապես փորման խորության աճի ազդեցության տակ:

Համաձայն Eurocode 7-ի (EN 1997) և Eurocode 1-ի (EN 1991) նախագծային առաջարկությունների՝ քաղաքային կառուցապատման և շինհրապարակի ներքին տրանսպորտային միջոցների ծանրաբեռնվածությունը հաշվի առնելու նպատակով փոստրակի վերին եզրից սկսած ակտիվացվել է անընդհատ հավասարաչափ բաշխված արտաքին բեռնվածքը՝ 20 կն/մ^2 բնութագրային արժեքով: Սույն մեծությունը համապատասխանում է նշված նորմատիվային փաստաթղթերով սահմանված ծանր շինարարական տեխնիկայի տեղաշարժի և նյութերի ժամանակավոր պահեստավորման կրիտիկական սահմաններին:

Արդյունքներ և քննարկում

Դիտարկվող փոստրակի և ամրացման համակարգերի երկրամեխանիկական վարքագծի համեմատական գնահատման նպատակով աղ. 3-ում ամփոփված են թվային մոդելավորման (PLAXIS 2D) արդյունքում ստացված ելակետային տվյալները: Արձանագրված առանցքային ցուցանիշները ներառում են ամրացման համակարգի առավելագույն հորիզոնական տեղափոխությունը (U_x), հարակից գրունտի մակերևույթի նստվածքը (U_y), առաջացող առավելագույն մոմենտը ($M_{\max}$), անվտանգության գործակիցը (ΣM_{sf}) և տեխնոլոգիական բարդության աստիճանը (C_c)՝ փորման 4,0 մ, 6,0 մ և 8,0 մ խորությունների համար:

Աղյուսակ 3

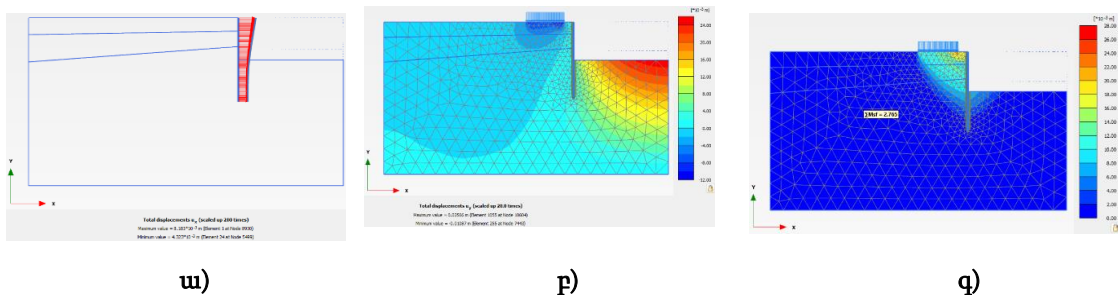
Հաշվարկներից ստացված ելքային տվյալները

N	Ամրացման համակարգ	Մոդել	Խորություն, H (մ)	Հաշվարկային ցուցանիշներ				
				U_x (մմ)	U_y (մմ)	$M_{\max}$ (կՆ-մ/մ)	ΣM_{sf}	C_c
1	Շպունտային պատ	U1	4	6,743	8,643	51,93	2,785	1
		U2	6	7,320	7,987	99,87	2,692	
		U3	8	27,980	12,240	162,20	2,349	
2	Հորատահատող ցցային պատ	U4	4	8,183	10,870	65,58	2,765	2
		U5	6	15,760	11,900	114,30	2,725	
		U6	8	31,370	18,270	177,10	2,346	
3	Դիաֆրագմային պատ	U7	4	7,278	10,420	74,40	2,776	3
		U8	6	7,781	9,252	141,90	2,643	
		U9	8	22,470	11,020	228,50	2,520	

* Ծանոթություն. տեխնոլոգիական բարդության C_c աստիճանները սահմանվել են ինժեներական-փորձագիտական սանդղակով. 1 – ցածր բարդություն, 2 – միջին բարդություն, 3 – բարձր բարդություն

Թվային մոդելավորման արդյունքում ստացված և աղ. 3-ում ներկայացված պատերի տեղափոխությունները, հարակից գրունտի նստվածքը և ընդհանուր կայունության ցուցանիշներն ուղղակիորեն կախված են փորման խորությունից և կառուցվածքների տեսակարար կոշտության ու սեփական քաշի համադրությունից:

4,0 մ խորության մոդելներ (Մ1, Մ4, Մ7). Այս խորության պայմաններում երեք դիտարկվող ամրացման համակարգերն էլ ապահովում են փոստրակի շեպի լիարժեք կայունություն բարձր պաշար: Անվտանգության գործակիցները տատանվում են 2,765-ի (Մ4) և 2,785-ի (Մ1) սահմաններում, ինչը զգալիորեն գերազանցում է նախագծային նորմատիվային նվազագույն պահանջները: Առավելագույն հորիզոնական տեղափոխությունները չեն գերազանցում 8,183 մմ-ը (Մ4), իսկ նստվածքները պահպանվում են 10,87 մմ-ի սահմաններում (Մ4): Գրունտային զանգվածի կողային ակտիվ ճնշումը տվյալ փուլում ցածր է, ինչի հետևանքով պատերի ծոման կոշտության (EI) տարբերությունն էական ազդեցություն չի ունենում համակարգերի ընդհանուր վարքագծի վրա և դրանք գործում են առաձգական կայուն տիրույթում (նկ. 3):



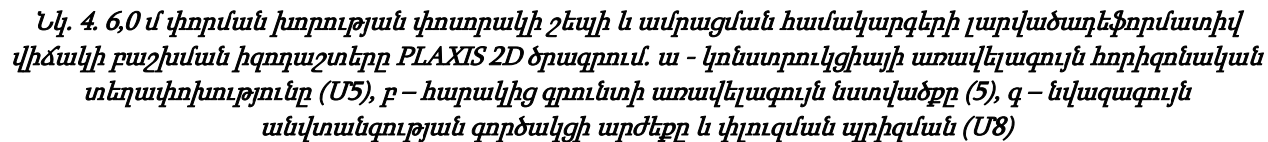
Նկ. 3. 4,0 մ փորման խորության փոստրակի շեպի և ամրացման համակարգերի լարվածադեֆորմատիվ վիճակի բաշխման իզոդաշտերը PLAXIS 2D ծրագրում. ա - կոնստրուկցիայի առավելագույն հորիզոնական տեղափոխությունը (Մ4), բ – հարակից գրունտի առավելագույն նստվածքը (Մ4), գ – նվազագույն անվտանգության գործակիցի արժեքը և փլուզման պրիզման (Մ4)

6,0 մ խորության մոդելներ (Մ2, Մ5, Մ8). փորման խորության մեծացմանը զուգընթաց համակարգերի վարքագծում ի հայտ է գալիս սկզբունքային տարբերություն կոնստրուկցիաների սեփական քաշի և հանգուցային կոշտության առանձնահատկությունների միջև (նկ. 4).

- **Շպունտային պատը (Մ2)** ցուցաբերում է հորիզոնական տեղափոխության բարձր սահմանափակում (7,32 մմ) և անվտանգության միջանկյալ գործակից (2,692) տվյալ խմբում: Սա հիմնավորվում է կոնստրուկցիայի նվազագույն սեփական քաշով ($1,63 \text{ կՆ/մ}^2$), որը չի առաջացնում հավելյալ ուղղահայաց լարումներ հիմնատակում:

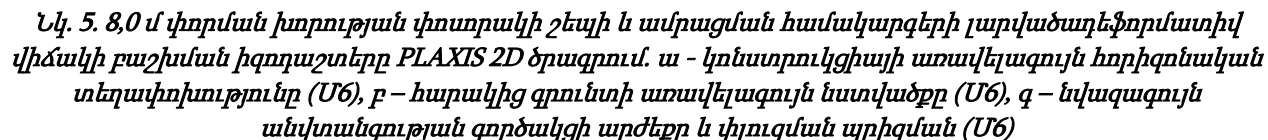
- **Հորատահատող ցցային պատի դեպքում (Մ5)** արձանագրվում է հորիզոնական տեղափոխության աճ՝ մինչև 15,76 մմ, թեև անվտանգության գործակիցը պահպանվում է բարձր մակարդակում (2,725): Հորատահատող ցցային պատի կառուցվածքն ապահովում է լիարժեք կայունություն, սակայն համակարգի միջինացված ծոման կոշտությունը զիջում է դիաֆրագմային պատին: Թույլ գրունտների ճնշման պայմաններում կառուցվածքի հարաբերական ճկունությունը և պատի սեփական զգալի քաշը ($13,45 \text{ կՆ/մ}^2$) բերում են տեղափոխությունների մեծացման և հարակից մակերևույթի նստվածքների աճի՝ մինչև 11,90 մմ:

- **Դիաֆրագմային պատի դեպքում (Մ8).** չնայած բարձր կոշտությանը և փոքր հորիզոնական տեղաշարժին (7,781 մմ), անվտանգության գործակիցը նվազում է մինչև խմբի նվազագույն արժեքը (2,643): Սա հիմնավորվում է կառուցվածքի առավելագույն սեփական քաշով (15 կՆ/մ^2), որը թույլ գրունտում գործում է որպես լրացուցիչ ուղղահայաց բեռնվածք պատի ներքանի տակ՝ արագացնելով պատի ստորին գոտում գրունտի սահքի դիմադրության սպառումը:



- **Դիաֆրագմային պատը (Մ9)** ունի ակնհայտ առավելություն դեֆորմացիաների սահմանակրկման հարցում (22,47 մմ) և ապահովում է անվտանգության բարձր գործակից (2,520): Ար ծոման կոշտությունը (EI) թույլ է տալիս համաչափ վերաբաշխում իրականացնել ողջ ուղղությամբ՝ նվազեցնելով նաև հարակից մակերևույթի նստվածքը մինչև 11,02 մմ:

- **Հորատահատող ցցային պատը (Մ6)** ցուցաբերում է առավելագույն հորիզոնական տեղա-
 ություն (31,37 մմ) և նստվածք (18,27 մմ), իսկ անվտանգության գործակիցը նվազում է մինչև
 նվազագույն արժեքը (2,346): Նշված դինամիկական հաստատում է, որ այս խորություններում
 հատվող ցցերով համակարգի կոշտությունը բավարար չէ թույլ գրունտների մեծ կողային
 անն առանց հավելյալ էլեմենտների դիմադրելու համար:



Նախորդ բաժնում սահմանված մեթոդաբանության համաձայն՝ թվային մոդելավորման արդյունքների բազմաչափ օպտիմալացումն իրականացվել է սահմանված ω_j կշռային գործակիցների կիրառմամբ. պատի հորիզոնական տեղափոխություն՝ $\omega_1 = 0,25$, գրունտի նստվածք՝ $\omega_2 = 0,15$, առավելագույն ծոռո մոմենտ՝ $\omega_3 = 0,15$, անվտանգության գործակից՝ $\omega_4 = 0,35$ և տեխնոլոգիական բարդություն՝ $\omega_5 = 0,10$:

Աղ. 3-ի ելակետային արժեքների վեկտորային նորմավորման փուլում, ըստ համապատասխան բանաձևային ալգորիթմի (1-5), յուրաքանչյուր չափանիշի (սյունակի) համար քառակուսային արմատների հայտարարներն ստացվել են հետևյալ կերպ (6).

$$\begin{aligned}\sqrt{\sum U_x^2} &= \sqrt{6,743^2 + 7,32^2 + \dots + 22,47^2} = 50,91 \\ \sqrt{\sum U_y^2} &= \sqrt{8,643^2 + 7,987^2 + \dots + 11,02^2} = 34,61 \\ \sqrt{\sum M_{max}^2} &= \sqrt{51,3^2 + 99,87^2 + \dots + 228,5^2} = 406,93 \\ \sqrt{\sum M_{sf}^2} &= \sqrt{2,785^2 + 2,692^2 + \dots + 2,52^2} = 7,915 \\ \sqrt{\sum C_c^2} &= \sqrt{1^2 + 1^2 + \dots + 3^2} = 6,48\end{aligned}\quad (6)$$

Բաժանման արդյունքում ստացված անչափելի նորմավորված մատրիցը (R) ունի հետևյալ տեսքը (7).

$$R = \begin{bmatrix} 0,132 & 0,249 & 0,127 & 0,352 & 0,154 \\ 0,144 & 0,230 & 0,245 & 0,340 & 0,154 \\ 0,549 & 0,354 & 0,398 & 0,296 & 0,154 \\ 0,160 & 0,314 & 0,161 & 0,349 & 0,309 \\ 0,309 & 0,343 & 0,280 & 0,344 & 0,309 \\ 0,616 & 0,527 & 0,435 & 0,296 & 0,309 \\ 0,143 & 0,301 & 0,183 & 0,350 & 0,463 \\ 0,153 & 0,267 & 0,349 & 0,344 & 0,463 \\ 0,441 & 0,318 & 0,562 & 0,318 & 0,463 \end{bmatrix} : \quad (7)$$

Նախորդ քայլում ստացված նորմավորված արժեքների և սահմանված չափանիշների կշիռների համադրմամբ ձևավորված կշռված որոշումների մատրիցը (V) ունի հետևյալ տեսքը (8).

$$V = \begin{bmatrix} 0,033 & 0,037 & 0,019 & 0,123 & 0,0154 \\ 0,036 & 0,035 & 0,037 & 0,119 & 0,0154 \\ 0,137 & 0,053 & 0,060 & 0,104 & 0,0154 \\ 0,040 & 0,047 & 0,024 & 0,122 & 0,0309 \\ 0,077 & 0,052 & 0,042 & 0,120 & 0,0309 \\ 0,154 & 0,079 & 0,065 & 0,104 & 0,0309 \\ 0,036 & 0,045 & 0,027 & 0,122 & 0,0463 \\ 0,038 & 0,040 & 0,052 & 0,120 & 0,0463 \\ 0,110 & 0,048 & 0,084 & 0,111 & 0,0463 \end{bmatrix} : \quad (8)$$

Կշռված մատրիցի (8) սյունակային արժեքների հիման վրա, հաշվի առնելով չափանիշների ինժեներական բնույթը, սահմանվել են դրական իդեալական (A^+) և բացասական իդեալական (A^-) լուծումների վեկտորները (9).

$$\begin{aligned}A^+ &= \{0,033, 0,035, 0,019, 0,123, 0,0154\}, \\ A^- &= \{0,154, 0,053, 0,084, 0,104, 0,0463\}:\end{aligned}\quad (9)$$

Յուրաքանչյուր մոդելի համար բազմաչափ հեռավորությունները դրական (A^+) և բացասական (A^-) իդեալական կետերից հաշվարկվել են ըստ (3) և (4) բանաձևերի: Մաթեմատիկական հաշվարկի ընթացքը ցուցադրելու նպատակով ստորև բերված են միայն առաջին մոդելի (Մ1) համար ստացված արտահայտությունները:

$$S_{U1}^+ = \sqrt{(0,033 - 0,033)^2 + (0,037 - 0,035)^2 + (0,019 - 0,019)^2 + (0,123 - 0,123)^2 + (0,0154 - 0,0154)^2} = 0,002,$$

$$S_{U1}^- = \sqrt{(0,033 - 0,154)^2 + (0,037 - 0,053)^2 + (0,019 - 0,084)^2 + (0,123 - 0,104)^2 + (0,0154 - 0,0463)^2} = 0,14296:$$

Մնացած բոլոր դիտարկվող մոդելների (Մ2–Մ9) համար համանման եղանակով ստացված հեռավորությունների վերջնական արժեքները ներկայացված են աղ. 4-ի համապատասխան սյունակներում:

Վերջին քայլով որոշվել է յուրաքանչյուր ամրացման համակարգի մոդելի հարաբերական մոտեցման աստիճանն իդեալական լուծմանը: Որպես հաշվարկային օրինակ ստորև ներկայացված է Մ1 մոդելի օպտիմալության ցուցիչի ստացումը:

$$C_{U1}^* = \frac{0,14296}{0,002 + 0,14296} = 0,986 \approx 1:$$

Ստացված արժեքների նվազման կարգով կատարվել է մոդելների վերջնական դասակարգումը և օպտիմալ տարբերակների ընտրությունը, որոնց ամփոփ ցուցանիշները ներկայացված են աղ. 4-ում:

Աղյուսակ 4

Ամրացման համակարգերի ընտրության բազմաչափ օպտիմալացման արդյունքները

Մոդել	Ամրացման համակարգ	Խորություն, H (մ)	S_i^+	S_i^-	C_i^*
Մ1	Շպունտային պատ	4	0,002	0,143	0,986
Մ4	Հորատահատող ցցային պատ		0,021	0,126	0,857
Մ7	Դիաֆրագմային պատ		0,033	0,123	0,788
Մ2	Շպունտային պատ	6	0,018	0,130	0,877
Մ8	Դիաֆրագմային պատ		0,046	0,122	0,728
Մ5	Հորատահատող ցցային պատ		0,051	0,093	0,645
Մ9	Դիաֆրագմային պատ	8	0,103	0,045	0,306
Մ3	Շպունտային պատ		0,114	0,042	0,267
Մ6	Հորատահատող ցցային պատ		0,135	0,034	0,201

Եզրակացություն

Թույլ զրունտային պայմաններում բարձակային ամրացման համակարգերի երկրամեխանիկական վարքագծի թվային մոդելավորման և TOPSIS մեթոդով բազմաչափ օպտիմալացման արդյունքում հանգել ենք հետևյալ հիմնական եզրակացություններին:

• Թվային մոդելավորման արդյունքները քանակապես փաստում են, որ դիտարկվող ամրացման համակարգերի բոլոր 9 մոդելները գտնվում են նորմատիվային անվտանգ տիրույթում: Նույնիսկ 8,0 մ խորության պայմաններում առավելագույն հորիզոնական տեղափոխությունը (31,37 մ/Մ6) զգալիորեն զիջում է թույլատրելի սահմանային տեղափոխությանը ($H/100 = 80 \text{ մ/Մ}$), իսկ անվտանգության գործակիցները բարձր են: Ամրացման ընտրության խնդիրը ոչ թե ֆիզիկական փլուզման կանխման, այլ տարբեր կոնստրուկտիվ լուծումների միջև արդյունավետ տարբերակի ընտրությունն է, ինչն էլ հիմնավորում է բազմաչափ որոշումների կայացման (TOPSIS) մեթոդի կիրառման անհրաժեշտությունը:

• Պարզ է դարձել, որ կառուցվածքների սեփական մեծ քաշը կայունությունը նվազեցնող լրացուցիչ գործոն է՝ հիմնատակում հավելյալ ուղղահայաց լարումների կուտակման պատճառով 6,0 մ միջանկյալ խորության տակ հորատահատող ցցային և շպունտային պատերը կայունության ցուցանիշով գերազանցում են զգալիորեն մեծ ծոման կոշտություն ունեցող դիաֆրագմային պատին, քանի որ դիաֆրագմայի համեմատաբար մեծ տեսակարար կշիռը (15 կՆ/մ^2) առաջացնում է հավելյալ շոշափող լարումներ պատի ներքանի տակ՝ արագացնելով գրունտի սահքի դիմադրության սպառումը:

• Բազմաչափ օպտիմալացման վերջնական մատրիցը հստակ ցույց է տալիս օպտիմալության չափանիշի անցումը փորման խորության աճին զուգընթաց: 4,0 մ և 6,0 մ խորությունների տակ բացարձակ առավելություն է ստանում շպունտային պատը՝ շնորհիվ իր տեխնոլոգիական պարզության և փոքր սեփական քաշի: Սակայն 8,0 մ խորության պայմաններում, անկախ մեծ տեխնոլոգիական բարդությունից, առաջնային է դառնում դիաֆրագմային պատի բարձր ծոման կոշտությունը:

Սույն հետազոտության արդյունքների հիման վրա, թույլ գրունտային պայմաններում, տարբեր խորության փոստրակների օպտիմալ նախագծման համար առաջարկվում է հետևյալ սխեման. փորման փոքր և միջանկյալ խորությունների դեպքում (4 մ, 6 մ), բարձակային ամրացման համակարգեր ընտրելիս երաշխավորվում է շպունտային պատերի կիրառումը: Ավելի խոր փոստրակների նախագծման դեպքում (8 մ) բարձակային ամրացման համակարգ ընտրելիս առաջնահերթությունը պետք է տալ դիաֆրագմային պատին, իսկ հորատահատող ցցային պատերի կիրառումն այս խորության պայմաններում առանց հավելյալ հենարարների և գրունտային խարխիսների խորհուրդ չի տրվում:

Գրականության ցանկ

- [1] **P. Basnet, P. Adhikari, B.K. Subasna, et al.**, Evaluation of Retaining Wall with Compressible Inclusion Under Static Loading Using PLAXIS 2D, 10.1007/978-981-96-85288_20.
- [2] **P.R. Sangle, S.R. Tonapa, L. Pakalla**, Comparison of Safety Factor Using the Finite Element Method and The Janbu Method, 10.21776/ub.rekayasasipil.2026.020.02.4.
- [3] **Abdul Rahman Shaikh, Gourish Babu Ambiga, Sandeep Talekar, et al.**, Soil-Structure Interaction Using Plaxis 2D Software, International Journal of Scientific Research in Engineering and Management 09(12) (2025) 1-9.

- [4] **Ping Zhao, Yan Sun, Zhanqi Wang, et al.**, Mechanical Characteristics of Deep Excavation Support Structure with Asymmetric Load on Ground Surface, *Symmetry* 2024, 16, 1309.
- [5] **Maryam Gaber, Jamal Alsharef, Salah Hamuda, et al.**, Geotechnical Responses of Soils and Nearby Structures to Deep Excavations: Review and Case Study Analysis, *Alqalam Journal of Medical and Applied Sciences* 9(2) (2026) 324-335
- [6] **Mateusz Miszko, Matylda Tankiewicz**, The influence of Excavation Support Construction on The Settlement of Adjacent Structures, *Acta Sci. Pol. Architectura* 23 (2024) 145–156.
- [7] **Sivani P. Anil Kumar, Midhuna Mani, Sibiya Sabu, et al.**, Settlement Analysis of Soft Clay Using Plaxis 2D: A Case Study from Kochi, *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*.
- [8] **A.Z. Abu, Y.T. Bessimbayev, Z.M. Zhambakina**, Stability Analysis of Riverbank Retaining Structures using Plaxis 2D, https://doi.org/10.51885/3134-8041_JACS_2026_2_2.
- [9] **Jahangir Khazaei, Navid Sadehmiri Nejad**, Selection the appropriate retaining structure using fuzzy TOPSIS approach (Case study: Ilam city), 10.22126/amcen.2025.11033.1017.
- [10] **U. Issa, F. Saeed, Y. Miky, et al.**, Hybrid AHP-Fuzzy TOPSIS Approach for Selecting Deep Excavation Support System, *Buildings* 12(3) (2022) 295.

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ВЫЕМКИ ГРУНТА И УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ПОВЕДЕНИЕ ОТКОСОВ КОТЛОВАНОВ

Айк Стёпаевич Гарибян

Национальный университет архитектуры и строительства Армении, г. Ереван, РА
haykgharibyan759@gmail.com

В данной работе исследуется поведение откосов котлованов при различных глубинах выемки грунта и типах ограждающих конструкций. Целью исследования является оценка влияния различных инженерных решений на напряженно-деформированное состояние (НДС) и коэффициент безопасности откосов. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе PLAXIS 2D с использованием технологии поэтапного строительства (Staged Construction). В рамках исследования рассмотрены три системы ограждения котлованов: шпунтовая стена, буросекущая свайная стена и железобетонная «стена в грунте». Расчеты проведены для идентичных инженерно-геологических условий при трех различных глубинах выемки (4м, 6м и 8м) под воздействием статических нагрузок. Для каждого расчетного случая выполнен сравнительный анализ горизонтальных смещений, внутренних усилий (изгибающих моментов) и коэффициентов безопасности. Полученные результаты были классифицированы с помощью метода многокритериального принятия решений (TOPSIS), что обеспечило объективное и систематизированное сопоставление ограждающих конструкций на различных глубинах. В результате анализа были установлены закономерности влияния увеличения глубины разработки на напряженно-деформированное состояние откосов котлована, а также определены различия в эффективности каждой из рассматриваемых систем крепления.

Ключевые слова: *откос котлована, коэффициент безопасности, удерживающие конструкции, шпунтовая стена, буросекущие сваи, стена в грунте, TOPSIS*

INFLUENCE OF EXCAVATION DEPTH AND RETAINING SYSTEM ON THE BEHAVIOR OF EXCAVATION SLOPES

Hayk Gharibyan

National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, RA

haykgharibyan759@gmail.com

Investigated the structural behavior of excavation slopes under varying excavation depths and lateral retaining configurations. The primary objective is to evaluate the influence of different engineering solutions on the stress-strain state and the overall factor of safety (FoS) of the slopes. Numerical modeling was conducted via the finite element method (FEM) utilizing PLAXIS 2D software, adopting a staged construction sequence. The research evaluates three distinct retaining structures: a sheet pile wall, a secant pile wall, and a reinforced concrete diaphragm wall. Deterministic calculations were performed under identical geotechnical conditions across three excavation depths (4m, 6m, and 8m) subjected to static loading conditions. For each scenario, a comprehensive comparative analysis was carried out, focusing on horizontal displacements, internal structural forces (bending moments), and factors of safety. The synthesized numerical outputs were subsequently ranked using the multi-criteria decision-making (TOPSIS) method, ensuring an objective and systematic comparison of the retaining systems across the investigated depths. The analysis established the behavioral patterns of excavation slope stress-strain state under increasing depth, while quantitatively evaluating the performance differentials among the investigated retaining systems.

Keywords: *excavation slope, factor of safety, retaining structures, sheet pile wall, secant pile wall, diaphragm wall, TOPSIS*

Ղարիբյան Հայկ Ստյոպայի (ՀՀ, ք. Երևան) – ՃՇՀԱՀ, Շինարարական արտադրության տեխնոլոգիայի և կազմակերպման ամբիոն, դասախոս, (+374)77111759, haykgharibyan759@gmail.com

Гарибян Айк Степаневич (РА, г. Ереван) – НУАСА, кафедра Технологий и организации строительного производства, преподаватель, (+374)77111759, haykgharibyan759@gmail.com

Gharibyan Hayk (RA, Yerevan) - NUACA, Chair of Technology and Organisation of Construction Production, lecturer, (+374)77111759, haykgharibyan759@gmail.com

Ներկայացվել է՝ 08.08.2026թ.

Գրախոսվել է՝ 09.09.2026թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 30.09.2026թ.