# POLIFUNKSIONAL BINAR MIKROTO‘LDIRGICHLARNI QO‘LLAB BETONLARNI MODIFIKATSIYALASH

Choriyev Alibek

***Annotatsiya.*** *Maqolada suv bilan doimiy aloqada ishlaydigan beton konstruksiyalar uchun mikrokremnezyom va ohaktosh kukunidan iborat binar mikroto‘ldirgichning polifunksional ta’siri gidravlik nuqtai nazardan baholandi. Pauers modeli, Kats–Tompson bog‘lanishi, Darsi qonuni va Uoshbern tenglamasiga tayangan hisoblash-tahliliy usul orqali olti xil tarkib (nazorat, ikkita yakka qo‘shimchali va uchta binar) kapillyar g‘ovaklik, kritik g‘ovak diametri, filtratsiya koeffitsiyenti, bosim ostida suv kirish chuqurligi hamda kapillyar so‘rilish bo‘yicha taqqoslandi. Mikrokremnezyom va ohaktosh kukuni 1:2 nisbatda (jami 24 %) qo‘llanganda klinker miqdori 24 % kamayib, siqilishdagi mustahkamlik nazorat darajasida qolishi, filtratsiya koeffitsiyenti esa taxminan 3,5 baravar pasayishi hisoblandi. Ohaktosh kukunining yakka o‘zi esa suv o‘tkazuvchanlikni yomonlashtirdi. Natijalar modelga asoslangani sababli GOST 12730.5 va EN 12390-8 bo‘yicha tajribada tasdiqlanishi lozim.*

***Kalit so‘zlar:*** *beton, binar mikroto‘ldirgich, mikrokremnezyom, ohaktosh kukuni, filtratsiya koeffitsiyenti, suv o‘tkazuvchanlik, kapillyar so‘rilish, gidrotexnik beton.*

***Abstract.*** *The multifunctional action of a binary microfiller (silica fume + limestone powder) in concrete exposed to water was assessed from a hydraulic standpoint. A computational–analytical framework combining Powers’ volume balance, the Katz–Thompson relation, Darcy’s law and Washburn capillary flow was applied to six mixes at a constant water–binder ratio of 0.45. The 1:2 binary blend with 24 % total replacement reduced clinker content by 24 % and, according to the model, kept compressive strength at the control level while lowering hydraulic conductivity by a factor of about 3.5. Limestone powder alone raised permeability. The predictions require experimental verification.*

***Аннотация.*** *С гидравлических позиций оценено полифункциональное действие бинарного микронаполнителя (микрокремнезём + известняковая мука) в бетоне, эксплуатируемом в контакте с водой. Расчётно-аналитическая схема на основе модели Пауэрса, соотношения Катца–Томпсона, закона Дарси и уравнения Уошберна применена к шести составам при В/В = 0,45. Бинарная смесь с суммарной заменой 24 % (соотношение 1:2)*

*снижает расход клинкера на 24 % и, по расчёту, сохраняет прочность на уровне контрольного состава при снижении коэффициента фильтрации примерно в 3,5 раза. Известняковая мука в чистом виде проницаемость повышает. Результаты требуют экспериментальной проверки.*

## 1. Kirish

Suv omborlari, sug‘orish kanallari, damba va suv o‘tkazgich inshootlarining beton qoplamasi umrining ko‘p qismini bosim ostida yoki namlangan holatda o‘tkazadi. Bunday sharoitda betonning chidamliligini mustahkamlik emas, birinchi navbatda suvning g‘ovaklar tizimi orqali ko‘chish tezligi belgilaydi. Filtratsiyalanayotgan suv sement toshidan portlandit va boshqa eruvchan fazalarni yuvib chiqaradi, sulfat va xlorid ionlarini chuqurlikka olib boradi, muzlash-erish sikllarida esa g‘ovaklarni to‘yintirib, ichki kuchlanishlar hosil qiladi [3, 4]. Shu bois zamonaviy yondashuvda beton tarkibi suv o‘tkazuvchanlik ko‘rsatkichlari — filtratsiya koeffitsiyenti, suvning bosim ostida kirish chuqurligi va kapillyar so‘rilish tezligi — orqali loyihalanadi.

Betonning g‘ovaklar tuzilmasini yaxshilashning eng keng tarqalgan yo‘li — sementning bir qismini yoki bog‘lovchiga qo‘shimcha ravishda mayda dispers materiallar kiritishdir. Mikrokremnezyom pozzolan faolligi va juda yuqori solishtirma yuzasi tufayli sement toshining kapillyar g‘ovaklarini ikkilamchi C–S–H bilan to‘ldiradi va o‘tish zonasini zichlaydi [6, 11]. Ohaktosh kukuni esa asosan fizik vazifa bajaradi: u zarralar o‘rtasidagi bo‘shliqni to‘ldiradi, gidratatsiya mahsulotlari uchun qo‘shimcha nuqtalar yaratadi va karboalyuminatlar hosil bo‘lishiga yordam beradi [5, 7]. Har bir komponent yakka holda qo‘llanganda uning kamchiligi ham yaqqol ko‘rinadi: mikrokremnezyom suv talabini va qisqarish xavfini oshiradi, ohaktosh kukuni esa o‘zgarmas suv-bog‘lovchi nisbatida bog‘lovchi hajmini “suyultirib”, mustahkamlikni pasaytiradi.

Ikki komponentni birgalikda qo‘llash ularning vazifalarini bir-birini to‘ldiradigan qilib taqsimlash imkonini beradi, shu sababli bunday qo‘shimchani polifunksional binar mikroto‘ldirgich deb atash o‘rinli. Biroq mavjud tadqiqotlarning ko‘pchiligi samarani siqilishdagi mustahkamlik orqali baholaydi; gidravlik ko‘rsatkichlar esa odatda alohida, tarqoq holda keltiriladi va binar tizim uchun ularni mustahkamlik hamda klinker sarfi bilan bir butun sifatida ko‘rib chiqqan ishlar kam. **Ushbu ishning maqsadi** — mikrokremnezyom va ohaktosh kukunidan iborat binar mikroto‘ldirgich bilan modifikatsiyalangan betonning suv o‘tkazuvchanlik xususiyatlarini miqdoriy baholash hamda mustahkamlikni saqlagan holda klinker sarfini kamaytiradigan tarkib sohasini aniqlashdan iborat.

## 2. Materiallar va usullar

### *2.1. Xomashyo va tarkiblar*

Hisoblashda quyidagi xomashyo xossalari qabul qilindi: CEM I 42,5 turidagi portlandsement (zichligi 3,15 g/sm³), mikrokremnezyom ($SiO_2 \geq 85$ %, zichligi 2,20 g/sm³, BET yuzasi taxminan 20 m²/g) va ohaktosh kukuni ($CaCO_3 \geq 95$ %, zichligi 2,70 g/sm³, medianali o‘lchami 8–12 mkm). Barcha tarkiblarda umumiy bog‘lovchi miqdori 400 kg/m³, suv-bog‘lovchi nisbati (S/B) esa 0,45 deb olindi, ya’ni suv sarfi 180 kg/m³ ni tashkil etadi. Olti tarkib 1-jadvalda keltirilgan; binar tarkiblarda mikrokremnezyom va ohaktosh kukuni nisbati 1:2 qilib tanlandi.

**1-jadval.** Tadqiq etilgan tarkiblar (bog‘lovchi massasiga nisbatan, %)

| Tarkib | Sement (klinker), % | Mikrokremnezyom, % | Ohaktosh kukuni, % | Izoh |
|---|---|---|---|---|
| C0 | 100 | 0 | 0 | Nazorat |
| S8 | 92 | 8 | 0 | Yakka pozzolan |
| L15 | 85 | 0 | 15 | Yakka filler |
| B1 | 88 | 4 | 8 | Binar |
| B2 | 82 | 6 | 12 | Binar |
| B3 | 76 | 8 | 16 | Binar |

### *2.2. Hisoblash modeli*

Tadqiqot hisoblash-tahliliy xarakterga ega: tajriba o‘lchovlari o‘tkazilmagan, har bir ko‘rsatkich g‘ovaklar tuzilmasini tavsiflovchi klassik bog‘lanishlar orqali topildi. Sement toshining kapillyar g‘ovakligi Pauers hajmiy balansi [1, 2] asosida, 1000 g bog‘lovchiga nisbatan hisoblandi:

$$\varepsilon_{kap} = V_{kap} / V_0, \quad V_{kap} = W - 0{,}36 \cdot \alpha_s \cdot m_s - \beta_p \cdot \alpha_p \cdot m_{MK} \qquad (1)$$

bunda $W$ — suv hajmi, sm³; $m_s$ va $m_{MK}$ — sement va mikrokremnezyom massasi, g; $\alpha_s$ va $\alpha_p$ — sementning gidratatsiya darajasi hamda mikrokremnezyomning pozzolan reaksiyasi darajasi (28 sutkada); $\beta_p = 0{,}90$ sm³/g — reaksiyaga kirishgan 1 g mikrokremnezyomning kapillyar hajmni kamaytirishi; $V_0$ — pastaning boshlang‘ich hajmi. Gel-fazoviy nisbat $X$ orqali siqilishdagi mustahkamlik esa Pauers bog‘lanishi bilan baholandi [2]:

$$X = V_g / (V_g + V_{kap}), \quad f_c = A \cdot X^3, \quad A = 130 \text{ MPa} \qquad (2)$$

Filtratsiya xossalari uchun avval pastaning o‘tkazuvchanligi Kats–Tompson bog‘lanishi [8] bilan, so‘ng beton uchun o‘tish zonasi tuzatmasi kiritilgan holda topildi:

$$k_p = d_c^2 \cdot \varepsilon_{kap}^{2,5} / 226, \quad k = f_{OZ} \cdot k_p \qquad (3)$$

Bu yerda $d_c$ — kritik g‘ovak diametri, $f_{OZ} = 0{,}50 \cdot [1 - 0{,}012 \cdot (MK + 0{,}5 \cdot OK)]$ — o‘tish zonasi va tortuoz yo‘l tuzatmasi (MK va OK — mikrokremnezyom va

ohaktosh kukuni miqdori, %). Filtratsiya koeffitsiyenti $K_w$ Darsi qonuni, suvning bosim ostida kirish chuqurligi $h$ esa porshenli oqim sxemasi bo‘yicha aniqlandi:

$$K_w = k \cdot \rho \cdot g / \mu, \quad h = \sqrt{(2 \cdot k \cdot P \cdot t / (\mu \cdot \varphi_e))} \qquad (4)$$

$P$ = 0,5 MPa va $t$ = 72 soat qabul qilindi — bu EN 12390-8 [15] sinov rejimiga mos keladi; $\mu = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, $\varphi_e$ = 0,10 (suv bilan to‘ladigan samarali g‘ovaklik). Kapillyar so‘rilish Uoshbern tenglamasi [9] va sorbtivlik tushunchasi [10] orqali ifodalandi:

$$i = S \cdot \sqrt{t}, \quad S = \varphi_e \cdot \xi \cdot \sqrt{(r_{eff} \cdot \gamma \cdot \cos\theta / (2\mu))} \qquad (5)$$

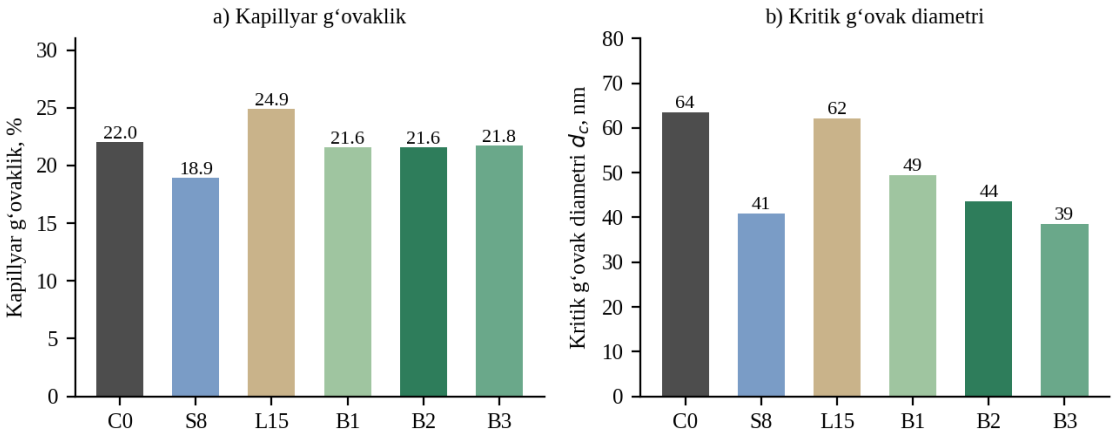
bunda $r_{eff} = d_c/2$, $\gamma$ = 0,0728 N/m, $\cos\theta = 1$, $\xi$ = 0,18 — g‘ovak kanallarining egri-bugriligi va torayishini hisobga oluvchi koeffitsiyent.

Modelning kirish parametrlari adabiyotlarda keltirilgan tendensiyalarga mos holda tanlangan, shu sababli ular aniq bir laboratoriya ma’lumotlari emas, balki tayanch taxminlar sifatida qaralishi kerak. Sementning gidratatsiya darajasi mayda filler ta’sirida (zarralar sirtida kristallanish markazlari paydo bo‘lishi va sement donalari uchun suv ulushining ortishi) oshadi [7]: $\alpha_s = 0{,}78 + 0{,}0025 \cdot MK + 0{,}0040 \cdot OK$. Pozzolan reaksiyasi darajasi mikrokremnezyom miqdori ortishi bilan pasayadi, ohaktosh kukuni bo‘lganda esa biroz ortadi: $\alpha_p = 0{,}62 - 0{,}012 \cdot MK + 0{,}004 \cdot OK$. Kritik g‘ovak diametri $d_c = 100 \cdot (\varepsilon_{kap}/0{,}347) \cdot (1 - 6\Pi) \cdot (1 - 0{,}9 \cdot OK/100)$ ifodasi bilan berildi, bunda $\Pi = \alpha_p \cdot MK/100$ — reaksiyaga kirishgan pozzolan ulushi. Bu bog‘lanishlar nazorat tarkib uchun odatdagi tartibdagi qiymatlarni ($K_w \approx 10^{-12}$ m/s, $h \approx$ 20–25 mm) beradigan qilib moslangan; shundan so‘ng boshqa tarkiblar uchun hech qanday qo‘shimcha sozlash kiritilmadi.

## 3. Natijalar

### *3.1. G‘ovaklar tuzilmasi va mustahkamlik*

Nazorat tarkibda kapillyar g‘ovaklik 22,0 % ni, kritik g‘ovak diametri 64 nm ni tashkil etdi (1-rasm). Mikrokremnezyomning yakka o‘zi (S8) g‘ovaklikni 18,9 % gacha, $d_c$ ni esa 41 nm gacha kamaytirdi. Ohaktosh kukuni (L15) teskari natija berdi: g‘ovaklik 24,9 % gacha ortdi, $d_c$ deyarli o‘zgarmadi (62 nm). Binar tarkiblarda umumiy g‘ovaklik nazoratga yaqin (21,6–21,8 %) qolgan bo‘lsa-da, g‘ovaklar ancha mayda bo‘lib chiqdi: B1, B2 va B3 uchun $d_c$ mos ravishda 49, 44 va 39 nm.

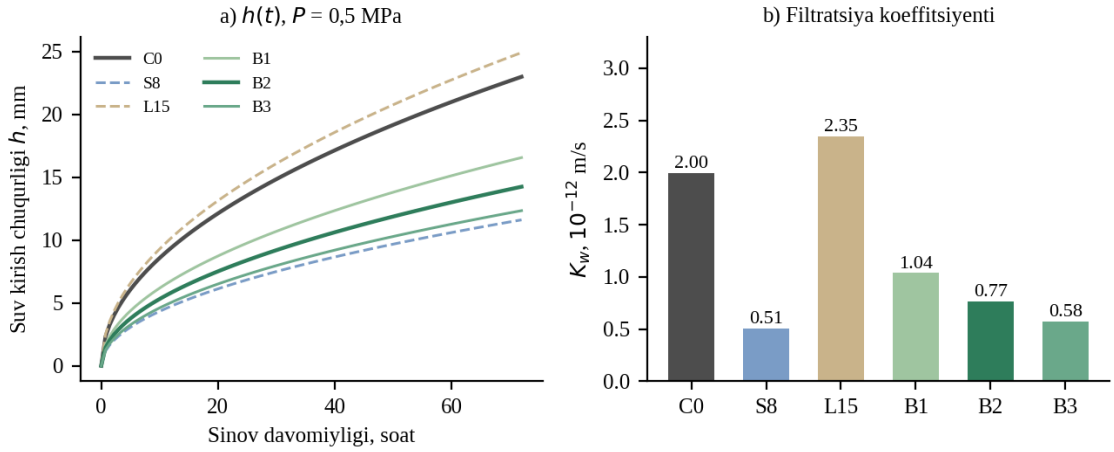



**1-rasm.** Tarkiblar bo‘yicha kapillyar g‘ovaklik (a) va kritik g‘ovak diametri (b), 28 sutka (hisoblash natijasi)

Hisoblangan siqilishdagi mustahkamlik nazoratda 56,7 MPa, S8 da 65,9 MPa, L15 da esa atigi 47,6 MPa bo‘ldi (2-jadval). Binar tarkiblarda bu ko‘rsatkich 56,6–57,5 MPa oralig‘ida, ya’ni nazorat darajasida qoldi, vaholanki klinker ulushi 12 dan 24 % gacha kamaytirilgan.

### *3.2. Bosim ostida filtratsiya*

Filtratsiya koeffitsiyenti nazorat tarkibda $2{,}00\cdot10^{-12}$ m/s ga teng bo‘ldi. S8 tarkibda u $0{,}51\cdot10^{-12}$ m/s gacha (−75 %) tushdi, L15 da esa $2{,}35\cdot10^{-12}$ m/s gacha (+17 %) oshdi. Binar tarkiblarda pasayish ketma-ket kuchaydi: B1 da −48 %, B2 da −62 %, B3 da −71 % (2-rasm, b). EN 12390-8 rejimida suvning kirish chuqurligi nazoratda 23,0 mm, B3 da 12,3 mm, S8 da 11,6 mm bo‘ldi; chuqurlik vaqtning kvadrat ildiziga proporsional o‘sgani uchun egri chiziqlar 2-rasm, a da parabolik ko‘rinishga ega.




**2-rasm.** Suv kirish chuqurligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi (a) va filtratsiya koeffitsiyenti (b), $P$ = 0,5 MPa

**2-jadval.** Hisoblangan ko‘rsatkichlar (28 sutka, S/B = 0,45)

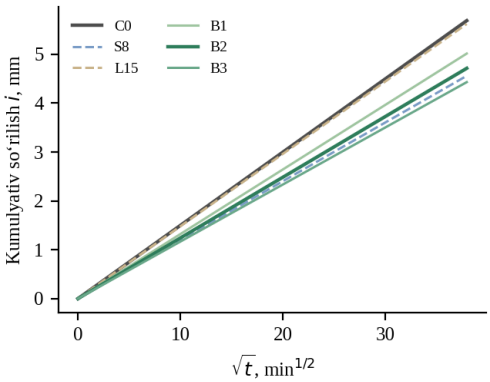
| Tarkib | $\varepsilon_{kap}$, % | $d_c$, nm | $f_c$, MPa | $K_w$, $10^{-12}$ m/s | $K_w/K_{w,0}$ | h, mm | S, mm/min$^{1/2}$ | Klinker sarfi, kg/(m³·MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C0 | 22,0 | 63,5 | 56,7 | 2,00 | 1,00 | 23,0 | 0,150 | 7,06 |
| S8 | 18,9 | 40,8 | 65,9 | 0,51 | 0,25 | 11,6 | 0,120 | 5,58 |
| L15 | 24,9 | 62,0 | 47,6 | 2,35 | 1,17 | 24,9 | 0,148 | 7,14 |
| B1 | 21,6 | 49,4 | 57,5 | 1,04 | 0,52 | 16,6 | 0,132 | 6,12 |
| B2 | 21,6 | 43,6 | 57,3 | 0,77 | 0,38 | 14,2 | 0,124 | 5,72 |
| B3 | 21,8 | 38,5 | 56,6 | 0,58 | 0,29 | 12,3 | 0,117 | 5,37 |

### *3.3. Kapillyar so‘rilish*

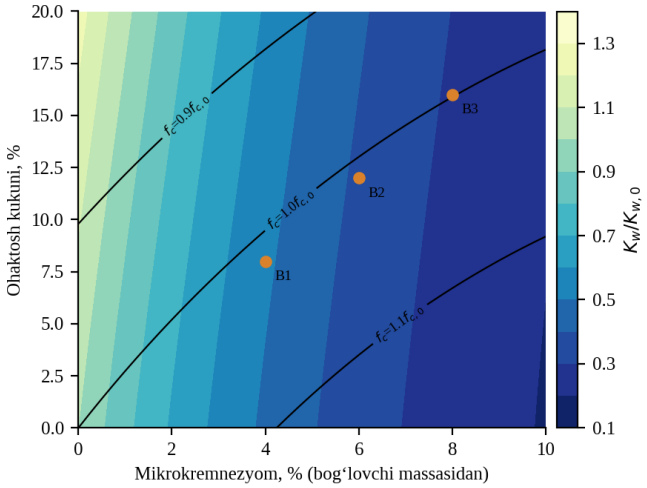
Sorbtivlik nazoratda 0,150 mm/min$^{1/2}$, S8 da 0,120, B3 da 0,117 mm/min$^{1/2}$ ni tashkil etdi (3-rasm). Farq filtratsiyadagiga qaraganda ancha kichik: sorbtivlik g‘ovak radiusining kvadrat ildiziga bog‘liq bo‘lgani uchun g‘ovaklar o‘lchamining 1,6 baravar kichrayishi uni atigi 22 % ga kamaytiradi. Boshqacha aytganda, mikrokremnezyomli tizimlar bosim ostidagi oqimni kapillyar tortilishga nisbatan ancha kuchliroq cheklaydi.

### *3.4. Binar tizimning samarali sohasi*

4-rasmda mikrokremnezyom (0–10 %) va ohaktosh kukuni (0–20 %) miqdorlari bo‘yicha nisbiy filtratsiya koeffitsiyenti va mustahkamlik chiziqlari birga tasvirlangan. $f_c = f_{c,0}$ egri chizig‘idan yuqorida va chapda joylashgan tarkiblar nazoratdan kuchsizroq bo‘ladi; shu chiziqdan pastda va o‘ngda esa mustahkamlik saqlanadi yoki ortadi. Binar nuqtalar (B1–B3) ushbu chiziq yaqinida yotadi va o‘ngga siljigan sari $K_w$ kamayadi. Klinker sarfini bir birlik mustahkamlikka nisbatan olsak (2-jadval, oxirgi ustun), nazoratda 7,06 kg/(m³·MPa) talab qilingan bo‘lsa, B3 da 5,37, S8 da 5,58 kg/(m³·MPa) yetarli bo‘lgan; L15 da bu ko‘rsatkich nazoratdan ham yomon (7,14).




**3-rasm.** Kumulyativ kapillyar so‘rilish




**4-rasm.** Nisbiy $K_w$ (rang) va nisbiy mustahkamlik (chiziqlar)

## 4. Muhokama

Hisob natijalarining asosiy mazmuni shundan iboratki, mikroto‘ldirgichning suv o‘tkazuvchanlikka ta’siri uning umumiy g‘ovaklikka ta’siridan ko‘ra ko‘proq g‘ovaklar o‘lchamiga bog‘liq. B2 va B3 tarkiblarda kapillyar g‘ovaklik nazoratdan deyarli farq qilmaydi, filtratsiya koeffitsiyenti esa taxminan 2,6–3,5 baravar kam. Buning sababi (3)-ifodadan ko‘rinadi: $k$ kritik diametrning kvadratiga proporsional, shu bois $d_c$ ning 10 % o‘zgarishi $K_w$ ni taxminan 20 % ga o‘zgartiradi. Demak, binar tizimning vazifasi g‘ovaklarni “kamaytirish” emas, balki ularni mayda va bir-biri bilan kam bog‘langan holga keltirishdir. Bu xulosa pozzolanli pastalarda g‘ovak tarmog‘ining uzilishi haqidagi klassik tasavvurlarga [1, 17] mos keladi.

Ohaktosh kukunining yakka holdagi natijasi ham e’tiborga loyiq. O‘zgarmas S/B da sementni 15 % ga almashtirish faol bog‘lovchi hajmini kamaytiradi, filler esa gidratatsiya darajasini faqat qisman oshiradi, natijada g‘ovaklik ortadi va mustahkamlik 16 % ga pasayadi. Bu holat dispers qo‘shimchalarning “suyultirish” va “kimyoviy” ta’sirlarini ajratib ko‘rsatgan ishlardagi kuzatuvlarga mos [7]. Ohaktosh kukuni binar tizimda boshqacha vazifa bajaradi: mikrokremnezyom bilan birga qo‘llanganda uning mustahkamlikka salbiy hissasi mikrokremnezyomning pozzolan hissasi bilan qoplanadi, bunda ohaktosh kukuni klinker sarfini kamaytirish va zarralar o‘lchamlari taqsimotini kengaytirish (Andreasen tipidagi zichlanish [13]) vositasi bo‘lib qoladi.

Shu bilan birga, S8 tarkibi hamma gidravlik ko‘rsatkichlar bo‘yicha binar tarkiblardan ustun chiqqanini yashirib bo‘lmaydi: uning filtratsiya koeffitsiyenti eng past, mustahkamligi eng yuqori. Binar tizimning afzalligi boshqa joyda. Birinchidan, S8 da klinker 8 % ga, B3 da esa 24 % ga kamaygan; sement ishlab chiqarishdagi $CO_2$ chiqindilarining asosiy qismi aynan klinkerga to‘g‘ri kelishini hisobga olsak [12], bu farq sezilarli. Ikkinchidan, ohaktosh kukuni hisobiga mikrokremnezyom

miqdorini 10 % dan oshirmasdan, S8 ga yaqin filtratsiya darajasiga erishish mumkin (4-rasmda B3 dan o‘ngdagi sohada). Mikrokremnezyom miqdori ko‘paygani sari suv talabi va avtogen qisqarish xavfi ortishi ma’lum [11, 14]; bunday qisqarishdan paydo bo‘ladigan mikroyoriqlar esa filtratsiya uchun eng qisqa yo‘l bo‘lib xizmat qiladi. Ushbu model yoriqlarni hisobga olmaydi, shu sababli yuqori mikrokremnezyom dozalarida hisoblangan $K_w$ qiymatlari ancha optimistik bo‘lishi mumkin.

Natijalarni talqin qilishda quyidagi cheklovlarni nazarda tutish zarur. Birinchi, kirish bog‘lanishlari (gidratatsiya va pozzolan reaksiyasi darajalari, $d_c$ ifodasi, $f_{OZ}$) adabiyotlardagi tendensiyalar asosida moslangan va aniq materiallar uchun laboratoriya o‘lchovlari (simob porozimetriyasi, termogravimetriya, shuningdek, GOST 12730.5 [16] va EN 12390-8 [15] bo‘yicha sinovlar) bilan kalibrlanishi kerak. Ikkinchi, reologiya, yoriqbardoshlik, xlorid va sulfat diffuziyasi, sovuqbardoshlik tahlilga kiritilmagan. Uchinchi, nisbiy tavsiyalar (masalan, 1:2 nisbat) mahalliy mikrokremnezyom va ohaktosh xomashyosining haqiqiy zarra o‘lchamlari va kimyoviy tarkibiga qarab o‘zgarishi mumkin. Shunga qaramay, taqdim etilgan sxema tajribalar sonini kamaytirish va tarkiblarni dastlabki saralash uchun ishlatilishi mumkin.

**5. Xulosa**

1) Mikrokremnezyom va ohaktosh kukuni asosidagi binar mikroto‘ldirgich (1:2, jami 24 %) kapillyar g‘ovaklikni nazorat darajasida (21,8 % ga qarshi 22,0 %) saqlagan holda kritik g‘ovak diametrini 64 nm dan 39 nm gacha kamaytiradi; filtratsiya koeffitsiyenti $2{,}00\cdot10^{-12}$ dan $0{,}58\cdot10^{-12}$ m/s gacha (taxminan 3,5 baravar) pasayadi.

2) Hisoblangan siqilishdagi mustahkamlik binar tarkiblarda 56,6–57,5 MPa bo‘lib, nazorat (56,7 MPa) bilan teng; klinker sarfi 12–24 % ga kamayadi, bir MPa mustahkamlikka klinker sarfi esa 7,06 dan 5,37 kg/(m³·MPa) gacha tushadi.

3) Ohaktosh kukuni yakka holda qo‘llanganda suv o‘tkazuvchanlik 17 % ga oshadi va mustahkamlik pasayadi, ya’ni uning samarasi faqat mikrokremnezyom bilan birgalikda namoyon bo‘ladi.

4) Sorbtivlik bosim ostidagi filtratsiyaga qaraganda mikroto‘ldirgichga kamroq sezgir (nazoratga nisbatan −22 % gacha), shuning uchun gidrotexnik beton uchun tarkibni filtratsiya koeffitsiyenti va kirish chuqurligi bo‘yicha baholash ma’qul.

5) Olingan natijalar hisoblash modeliga asoslangan; ularni tasdiqlash uchun tanlangan tarkiblar (C0, S8, B2, B3) bo‘yicha GOST 12730.5 va EN 12390-8 sinovlari, shuningdek, simob porozimetriyasi o‘tkazilishi lozim.

## Adabiyotlar

1. Powers T.C., Brownyard T.L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste // Journal of the American Concrete Institute. 1946–1947. Vol. 43.

2. Powers T.C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste // Journal of the American Ceramic Society. 1958. Vol. 41, No. 1. P. 1–6.

3. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. Harlow: Pearson Education, 2011. 846 p.

4. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 675 p.

5. Scrivener K.L., Juilland P., Monteiro P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. P. 38–56.

6. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D. Supplementary cementitious materials // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41, No. 12. P. 1244–1256.

7. Cyr M., Lawrence P., Ringot E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36, No. 2. P. 264–277.

8. Katz A.J., Thompson A.H. Quantitative prediction of permeability in porous rock // Physical Review B. 1986. Vol. 34, No. 11. P. 8179–8181.

9. Washburn E.W. The dynamics of capillary flow // Physical Review. 1921. Vol. 17, No. 3. P. 273–283.

10. Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review // Magazine of Concrete Research. 1989. Vol. 41, No. 147. P. 51–61.

11. Siddique R. Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties // Resources, Conservation and Recycling. 2011. Vol. 55, No. 11. P. 923–932.

12. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-$CO_2$ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. P. 2–26.

13. Andreasen A.H.M., Andersen J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern // Kolloid-Zeitschrift. 1930. Bd. 50. S. 217–228.

14. Aïtcin P.-C. Binders for Durable and Sustainable Concrete. London: Taylor & Francis, 2008. 528 p.

15. EN 12390-8:2019. Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure. Brussels: CEN, 2019.

16. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. М.: Стандартинформ, 2018.

17. Bentz D.P., Garboczi E.J. Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model // Cement and Concrete Research. 1991. Vol. 21, No. 2–3. P. 325–344.