

UO‘K: 620.9:628.16:536.2:532.546

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-m.07>

KAPILLYAR STRUKTURAGA EGA G‘OVAKLI MATERIALLAR ASOSIDA QUYOSH SUV CHUCHITGICH QURILMASINING SAMARADORLIGINI OSHIRISH: ADABIYOTLAR SHARHI

Asqarov Murodbek¹ – mustaqil izlanuvchi, E-mail: asqarov.murodbek@gmail.com,

ORCID: 0009-0003-5182-7630, Science ID: MXR-0426-0217;

Iskandarov Zafar Samandarovich² – texnika fanlari doktori, professor,

E-mail: zafarinsk1963@mail.ru, ORCID ID 0009-0000-8757-0548, Science ID: DXR-1025-0008;

Raximov Nurbek Zokirovich¹ – assistent, E-mail: rahimov1570@gmail.com,

ORCID ID 0000-0002-5194-5843, Science ID: MQD-0626-0103.

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

²Toshkent davlat agrar universiteti, Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu adabiyotlar sharhi kapilyar strukturali g‘ovakli materiallar asosidagi quyosh suvini chuchitish qurilmalarining samaradorligini oshirishga bag‘ishlangan 2014–2023-yillar oralig‘idagi 150 dan ortiq ilmiy nashrni qamrab oladi. Tahlil shuni ko‘rsatadiki, gidrofilik to‘qimali va keramik g‘ovakli materiallar kapilyar tortish kuchlaridan foydalanib bug‘lanish yuzasini 3–5 barobar kengaytirish imkonini beradi. Zamonaviy issiqlikni lokalizatsiya qilish (heat localization) tamoyiliga asoslangan tizimlar quyosh energiyasini foydalanish koeffitsiyentini 90% dan oshirishi mumkin. Tadqiqotlar bo‘shlig‘i sifatida g‘ovak o‘lchami, kapilyar naychalar zichligi va qurilma geometriyasining integral ta’siri yetarlicha o‘rganilmagan ekanligi aniqlandi.

Tadqiqotda PRISMA protokoli asosida 2014–2023-yillar oralig‘idagi 847 ta ilmiy nashrdan 156 tasi tanlandi. Oltita turdagi kapilyar g‘ovakli material (gidrofilik to‘qima, keramik g‘ovak, aerogel, mis ko‘pik, ko‘pikli polimer, karbonli material) 1000 W/m² quyosh intensivligida sinovdan o‘tkazildi. Bug‘lanish samaradorligi $\eta = (\dot{m} \cdot h_{fg}) / (G \cdot A)$ formulasi orqali hisoblandi. Materiallar va qurilmalar o‘rtasidagi bog‘liqlik Pearson korrelyatsiya koeffitsiyenti asosida heatmap shaklida vizualizatsiya qilindi.

Gidrofilik to‘qimali materiallar quyosh chuchitgichlari bilan eng yuqori korrelyatsiya (97%) va 91–95% bug‘lanish samaradorligini ko‘rsatdi. Keramik g‘ovak + aerogel kompozit kuniga 7.3 l/m² suv hosildorligiga erishdi. Aerogel qatlami issiqlik yo‘qotishlarini 22% ga kamaytirdi. Besh asosiy tadqiqot bo‘shlig‘i aniqlandi.

Kalit so‘zlar: quyosh chuchitgich, kapilyar struktura, g‘ovakli material, bug‘lanish samaradorligi, issiqlikni lokalizatsiya qilish, gidrofilik yuzalar, interfasiyal bug‘lanish.

UDC: 620.9:628.16:536.2:532.546

ENHANCING THE EFFICIENCY OF SOLAR WATER DESALINATION DEVICES BASED ON CAPILLARY-STRUCTURED POROUS MATERIALS: A LITERATURE REVIEW

Asqarov, Murodbek¹ – Independent Researcher;

Iskandarov, Zafar² – Doctor of Technical Sciences, Professor;

Rakhimov, Nurbek¹ – Assistant Lecturer.

¹Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

²Tashkent State Agrarian University, Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. This literature review covers more than 150 scientific publications from 2014–2023 on improving the efficiency of solar water desalination devices based on porous materials with capillary structure. Analysis reveals that hydrophilic fabric and ceramic porous materials can expand the evaporation surface 3–5 times through capillary forces. Modern systems based on the heat localization principle can achieve solar energy utilization coefficients exceeding 90%. The

identified research gap includes the insufficient study of the integrated effects of pore size, capillary tube density, and device geometry on overall system performance.

Following the PRISMA protocol, 156 publications were selected from 847 identified studies (2014–2023). Six types of capillary porous materials were evaluated under 1000 W/m² solar irradiance. Evaporation efficiency was calculated using $\eta = (\dot{m} \cdot h_{fg}) / (G \cdot A)$. A Pearson correlation heatmap was constructed to visualize device–material compatibility across 8×8 combinations.

Hydrophilic fabric achieved the highest correlation with solar desalination devices (97%) and an evaporation efficiency of 91–95%. The ceramic + aerogel composite reached 7.3 l/m²-day water productivity. Aerogel layers reduced heat losses by 22%. Five key research gaps were identified, including long-term durability and integrated optimization of pore size with device geometry.

Keywords: solar desalination, capillary structure, porous material, evaporation efficiency, heat localization, hydrophilic surfaces, interfacial evaporation.

УДК: 620.9:628.16:536.2:532.546

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ОПРЕСНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Аскарлов Муродбек¹ – самостоятельный соискатель;

Искандаров Зафар Самандарович² – доктор технических наук, профессор;

Рахимов Нурбек Зокирович¹ – ассистент.

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²Ташкентский государственный аграрный университет, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Данный обзор литературы охватывает более 150 научных публикаций за период 2014–2023 годы, посвящённых повышению эффективности солнечных опреснителей воды на основе пористых материалов с капиллярной структурой. Анализ показывает, что гидрофильные тканевые и керамические пористые материалы позволяют расширить поверхность испарения в 3–5 раз за счёт капиллярных сил. Современные системы на основе принципа локализации тепла могут достигать коэффициента использования солнечной энергии свыше 90%. Выявлен научно-исследовательский пробел, связанный с недостаточным изучением комплексного влияния размера пор, плотности капиллярных трубок и геометрии устройства на общую эффективность системы.

По протоколу PRISMA из 847 выявленных публикаций (2014–2023) отобрано 156 работ. Шесть типов капиллярных пористых материалов испытывались при интенсивности солнечного излучения 1000 Вт/м². Эффективность испарения рассчитывалась по формуле $\eta = (\dot{m} \cdot h_{fg}) / (G \cdot A)$. Для оценки совместимости материалов и устройств построена тепловая карта (heatmap) на основе коэффициента корреляции Пирсона (матрица 8×8).

Гидрофильная ткань показала наибольшую корреляцию с солнечными опреснителями (97%) и эффективность испарения 91–95%. Композит керамика + аэрогель обеспечил суточную производительность 7,3 л/м²-сут. Слой аэрогеля снизил тепловые потери на 22%. Выявлено пять ключевых исследовательских пробелов, включая долгосрочную стойкость и комплексную оптимизацию размера пор совместно с геометрией устройства.

Ключевые слова: солнечное опреснение, капиллярная структура, пористый материал, эффективность испарения, локализация тепла, гидрофильные поверхности, межфазное испарение.

Kirish

Toza ichimlik suvi yer yuzidagi eng qimmatli resurslardan biriga aylanib bormoqda. Jahon sog‘liqni saqlash tashkiloti (JSST) ma‘lumotlariga ko‘ra, 2025-yilga kelib dunyo aholisining 40% dan ortig‘i suv tanqisligiga duch kelishi kutilmoqda [1]. Bunday sharoitda quyosh energiyasidan

foydalangan holda sho‘r yoki ifloslanran suvni chuchitish texnologiyalari arzon, karbonsiz va markazsiz (off-grid) yechim sifatida alohida ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi [2].

Quyosh suvini chuchitishning an‘anaviy usullari bu quyosh distillyatori, multi-stage flash (MSF) va reverse osmosis (RO) yuqori energiya sarfi va murakkab infrastruktura talab qilishi sababli keng tarqalmagan [3]. So‘nggi o‘n yilda *interfasial bug‘lanish* yondashuvi katta e‘tiborni jalb qildi: bu texnologiyada issiqlik butun suv hajmini emas, balki faqat bug‘lanish yuzasini qizdiradi, bu esa energiya samaradorligini keskin oshiradi [4].

Kapillyar strukturali g‘ovakli materiallar ushbu yondashuvning markaziy elementi hisoblanadi. Ular bir vaqtning o‘zida uchta funksiyani bajaradi: (1) suvni kapillyar kuchlar orqali bug‘lanish yuzasiga to‘xtovsiz yetkazib berish; (2) quyosh nurini yutish va issiqlikni yuza qatlamida lokalizatsiya qilish; (3) tuz va boshqa eritilmalarning cho‘kishiga to‘sqinlik qilish [5-6]. Biroq mavjud adabiyotlarda material xususiyatlari, kapillyar parametrlar va qurilma geometriyasining integral ta‘siri yetarlicha tahlil qilinmagan, ushbu sharh ana shu kamchilikni bartaraf etishga qaratilgan.

Uslublar va materiallar

Ushbu adabiyotlar sharhi uchun PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) ko‘rsatmalariga asoslangan tizimli qidirish protokoli qo‘llanildi. Qidiruv Web of Science, Scopus, ScienceDirect va Google Scholar ma‘lumotlar bazalarida amalga oshirildi.

Qidirish strategiyasi: (1) Vaqt oralig‘i: 2016–2026 (oxirgi 10 yil), (2) Asosiy kalit so‘zlar: “solar desalination”, “porous material”, “capillary”, “interfacial evaporation”, “heat localization”, (3) Qo‘shimcha kalit so‘zlar: “hydrophilic fabric”, “ceramic foam”, “aerogel”, “metal foam”, “solar still”, (4) Kiritish mezonlari: eksperimental va nazariy maqolalar, muhandislik jurnallari, (5) Chiqarish mezonlari: takroriy nashrlar, to‘liq matni mavjud bo‘lmagan maqolalar.

Dastlabki qidiruvda 847 ta nashr aniqlandi. Sarlavha va abstrakt tanlovidan so‘ng 312 ta, to‘liq matn o‘qilgandan keyin 156 ta maqola tahlilga qabul qilindi. Ulardan 10 ta eng muhim va yangi adabiyot ushbu sharhda asosiy manba sifatida keltirildi.

Natijalar va muhokama

1. Nazariy asoslar: kapillyar fizika va bug‘lanish.

1.1 Kapillyar tortish kuchlari

Kapillyar ko‘tarilish balandligi Washburn tenglamasi orqali ifodalanadi:

$$h = (2\gamma \cos\theta) / (\rho \cdot g \cdot r),$$

bu yerda γ - sirt tarangligi (N/m), θ - aloqa burchagi ($^{\circ}$), ρ - suv zichligi (kg/m^3), g - erkin tushish tezlanishi (m/s^2), r - kapillyar naychaning radiusi (m). Gidrofilik materiallar uchun $\theta < 30^{\circ}$, bu esa yuqori kapillyar ko‘tarilishni ta‘minlaydi [7].

1.2 Issiqlikni lokalizatsiya qilish tamoyili

Zamonaviy quyosh bug‘latgichlarida issiqlik butun suv hajmiga emas, balki faqat suv-havo interfeysiga yetkaziladi. Buning uchun past issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentiga ega ($\lambda < 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) va yuqori quyosh nurini yutish qobiliyatiga ega ($\alpha > 0.90$) materiallar qo‘llaniladi. Aerogel va gidrofilik to‘qimalar bu talablarga eng ko‘p javob beradi [8]. Kapillyar g‘ovakli material asosidagi quyosh chuchitgichning ish printsipi va konstruktiv sxemasi 1-rasmda keltirilgan.

1.3 Bug‘lanish samaradorligi formulasi

$$\eta = (\dot{m} \cdot h_{fg}) / (G \cdot A) \times 100\%,$$

bu yerda $\dot{m}$ - bug‘lanish massaviy tezligi ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$), h_{fg} - buglanish issiqlik sig‘imi ($\approx 2260 \text{ kJ/kg}$ suv uchun), G - quyosh nurlanish intensivligi (W/m^2), A - effektiv bug‘lanish yuzasi (m^2) [9].



1-rasm. Kapillyar g'ovakli material asosidagi quyosh chuchitgichning ish printsipli va konstruktiv sxemasi.

2. G'ovakli materiallarning tasnifi va qiyosiy tahlili

Quyosh chuchitgichlarda ishlatiladigan g'ovakli materiallar ikki asosiy guruhga bo'linadi: organik (polimer asosli) va anorganik (keramik, metall, mineral asosli). Quyidagi 1-jadvalda asosiy materiallarning fizik-kimyoviy xususiyatlari keltirilgan [3, 5-7].

1-jadval. G'ovakli materiallarning qiyosiy fizik-kimyoviy xususiyatlari

Material nomi	G'ovak o'lchami (mkm)	Poroz koef. (ϵ)	Issqlik o'tk. ($W/m \cdot K$)	Bug'lanish sarm. η (%)
Gidrofilik to'qima	50–150	0,70–0,82	0,04–0,08	88–95
Keramik g'ovak	100–300	0,60–0,75	1,2–2,4	80–92
Aerogel kompozit	10–80	0,75–0,90	0,015–0,025	78–88
Mis ko'pik (Metal foam)	200–500	0,65–0,80	15–40	70–82
Ko'pikli polimer (PU)	100–400	0,55–0,70	0,03–0,05	62–75
Karbonli material	20–200	0,60–0,78	5–20	68–80

Manba: [3, 5-10] asosida mualliflar tomonidan tuzilgan.

2.1. Gidrofilik to'qimalar (Hydrophilic fabrics)

Elektrospin usulida ishlab chiqarilgan gidrofilik to'qimalar (polyvinyl alcohol, cellulose asosida) g'ovak o'lchami 50–150 mkm va poroz koeffitsiyenti $\epsilon = 0,70–0,82$ bo'lib, kapillyar tartibda suvni vertikal yo'nalishda 15–20 sm balandlikka ko'tarish imkonini beradi. Xu et al. [5] tomonidan o'tkazilgan tadqiqotda bunday materiallar 1000 W/m^2 quyosh intensivligida 91% bug'lanish samaradorligi ko'rsatdi, bu an'anaviy qora yuzali distillyatorlardan 28% yuqori natija hisoblanadi.

2.2. Keramik g'ovakli materiallar

Keramik g'ovakli plastinkalar (Al_2O_3 , SiC asosida) kimyoviy barqarorligi, yuqori mexanik mustahkamligi va tuz cho'kishiga chidamliligi bilan ajralib turadi. G'ovak o'lchami 100–300 mkm oralig'ida bo'lib, issqlik o'tkazuvchanligi (1,2–2,4 $W/m \cdot K$) tufayli yuzadagi uniform harorat taqsimotini ta'minlaydi. Zhang et al. [7] tadqiqotida keramik + aerogel kompozit 93% samaradorlik va kuniga 7,3 l/ m^2 suv hosildorligini ko'rsatdi.

2.3. Aerogel asosidagi kompozitlar

Aerogel g'oyat past issiqlik o'tkazuvchanligi ($\lambda = 0,015-0,025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) va yuqori poroz koeffitsiyenti ($\varepsilon = 0,75-0,90$) tufayli quyosh chuchitgichlarida issiqlik izolyatsiya qatlami sifatida keng qo'llanilmoqda. Hu et al. [6] grafenli aerogel namunasida qurilmaning issiqlik yo'qotishlarini 22% ga kamaytirdi. Biroq mexanik mo'rtligi va yuqori ishlab chiqarish narxi aerogel qo'llashning asosiy cheklavlari hisoblanadi [8]. Aerogel, gidrofil, keramik kabi tipdagi kompozit materiallar 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Turli g'ovakli materiallar.

3. Adabiyotlardagi ishlash ko'rsatkichlari qiyosi

2-jadvalda 2014–2022-yillar davomida kapillyar g'ovakli materiallar asosidagi quyosh chuchitgichlarning asosiy ishlash ko'rsatkichlari keltirilgan. Jadval shuni ko'rsatadiki, yillar davomida ham suv hosildorligi, ham samaradorlik izchil o'sib bormoqda.

2-jadval. Kapillyar g'ovakli materialli quyosh chuchitgichlarning adabiyotdagi ishlash ko'rsatkichlari.

Tadqiqot (muallif, yil)	Material turi	Suv hosild. ($\text{l/m}^2\cdot\text{kun}$)	Samaradorlik η (%)	Quyosh intensiv. (W/m^2)
Ghasemi et al. [3], 2014	Grafenli ko'pik	2,2	64	1000
Tao et al. [2], 2018	Karbonli nanostruktura	3,6	72	1000

Tadqiqot (muallif, yil)	Material turi	Suv hosild. (l/m ² ·kun)	Samaradorlik η (%)	Quyosh intensiv. (W/m ²)
Xu et al. [5], 2018	Elektrospin to'qima	4,1	79	1000
Li et al. [9], 2020	GO 2D yo'l	5,2	85	1000
Chen et al. [10], 2021	Gidrofilik to'qima (kapillyar)	6,8	91	1000
Zhang et al. [7], 2022	Keramik + aerogel kompozit	7,3	93	1000

Manba: tegishli adabiyotlar asosida mualliflar tomonidan tuzilgan.

2-jadval tahlili asosida uchta muhim tendentsiya kuzatildi: *birinchidan*, gidrofilik to'qima va keramik g'ovak kombinatsiyasi eng yuqori samaradorlikni (> 90%) ta'minlamoqda; *ikkinchidan*, aerogel kompozitlarni qo'shish issiqlik izolyatsiyasini keskin yaxshilaydi; *uchinchidan*, kapillyar yo'naltirilgan tuzilmalar tuz cho'kishini 85% gacha kamaytiradi [9-10].

4. Qurilmalar va materiallar o'zaro bog'liqligi (Korrelyatsiya tahlili).

Adabiyotlar tahlili asosida 8 turdagi qurilma va 8 turdagi g'ovakli material o'rtasidagi samaradorlik korrelyatsiyasi Pearson koeffitsiyenti yordamida hisoblandi va issiqlik xaritasi (heatmap) shaklida vizualizatsiya qilindi (3-rasm). Korrelyatsiya koeffitsiyenti 0% (bog'liqlik yo'q) dan 100% (to'liq mosliq) gacha shkala bo'yicha berildi.



3-rasm. Qurilmalar va g'ovakli materiallar o'zaro bog'liqligi — Pearson korrelyatsiya heatmap (yashil rom bilan optimal juftlik ko'rsatilgan).

3-rasm tahlili shuni ko'rsatdiki, “Quyosh chuchitgich (kapillyar strukturali) — Gidrofilik to'qima” juftligi eng yuqori korrelyatsiya (97%) ga ega. Bu natija ushbu materialning quyosh chuchitgichlari uchun optimal tanlovi ekanligini tasdiqlaydi. Keramik g'ovak ham quyosh chuchitgichlari bilan 92% korrelyatsiyaga ega bo'lib, ikkinchi o'rinda turadi. Aksincha, TiO₂

fotokatalizator hamma qurilmalar bilan nisbatan past bog‘liqlik (28–63%) ko‘rsatadi, chunki u asosan fotokatalitik tozalash jarayonlari uchun optimaldir [6, 9].

5. Tadqiqot bo‘shliqlari

Adabiyotlarning tizimli tahlili natijasida quyidagi asosiy tadqiqot bo‘shliqlari aniqlandi:

1) G‘ovak o‘lchami va kapillyar zichligi optimizatsiyasi: Mavjud tadqiqotlarning 78% i faqat bitta parametрни o‘zgartirgan holda sinov o‘tkazgan. G‘ovak o‘lchami ($r = 10\text{--}500\text{ mkm}$) va kapillyar naycha zichligi ($\rho_{\text{cap}} = 10^2\text{--}10^5\text{ m}^{-2}$) ning o‘zaro ta‘sirini kompleks tadqiq etgan ishlar soni juda cheklangan [3, 5].

2) Uzoq muddatli bardoshlilik: Tuz cho‘kishi va biofouling jarayonlarining 6 oydan ortiq davomiylikda materiallar samaradorligiga ta‘sirini o‘rganuvchi tadqiqotlar umumiy nashrlarning faqat 12% ini tashkil etadi. Ko‘pchilik tajribalar 24–72 soatlik qisqa muddatda amalga oshirilgan [7, 10].

3) Qurilma-material integral modeli: Qurilma geometriyasi (burchak, qopqoq shakli, kondensatsiya yuzasi) va material xususiyatlarini bir vaqtda optimallashtiruvchi kompleks matematik model yaratilmagan. Heatmap tahlili shuni ko‘rsatadiki, aynan shu kombinatsion optimizatsiya 15–20% qo‘shimcha samaradorlik berishi mumkin [6, 8].

4) Narx-samaradorlik tahlili (Techno-economic analysis): Ko‘pchilik tadqiqotlar texnik ko‘rsatkichlarga e‘tibor qaratgan, ammo ishlab chiqarish narxi, o‘rnatish xarajatlari va 10–20 yillik operatsion xarajatlarni hisobga olgan juda kam ish mavjud. Rivojlanayotgan mamlakatlarda qo‘llash uchun narx optimallashtirish hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi [1, 2].

5) Haqiqiy sharoitda (real-world) sinov: laboratoriya sharoitida olingan natijalar ko‘pincha haqiqiy ekspluatatsiya sharoitidan (o‘zgaruvchan quyosh intensivligi, shamol ta‘siri, harorat tsikllari) farq qiladi. Tashqi sharoitlarda uzoq muddatli ishlash bo‘yicha ma‘lumotlar yetarli emas [4, 9].

6. Istiqbolli yo‘nalishlar va muhokama

Adabiyotlar tahlili asosida quyosh suvini chuchitishda g‘ovakli materiallarning to‘rtta istiqbolli rivojlanish yo‘nalishi aniqlanadi:

6.1. Ikki qatlamli (bilayer) kapilyar tizimlar

Yuqori qatlamda yuqori quyosh nurini yutuvchi ($\alpha > 0,95$) va past issiqlik o‘tkazuvchanlikka ega material, quyi qatlamda esa yuqori kapillyar o‘tkazuvchanlikka ega material joylashtiriladi. Chen et al. [10] bunday ikki qatlamli tizimda 94% samaradorlikka erishdi. Ushbu yondashuv “issiqlik gradient” boshqaruvini ta‘minlaydi.

6.2. Fototermal nanomateriallar integratsiyasi

Grafen oksid, Au nanopartikulalar va karbonli nanotrubkalarining g‘ovakli matrisaga inkorporatsiyasi quyosh nurini yutish koeffitsiyentini 0,75 dan 0,98 gacha oshiradi [2, 4]. Biroq nanomateriallarning uzoq muddatli barqarorligi va arzon ishlab chiqarish usullari hali ham ochiq muammo bo‘lib qolmoqda.

6.3. 3D bosib chiqarish (Additive manufacturing)

3D bosib chiqarish texnologiyasi orqali kapillyar kanallar geometriyasini aniq ($\pm 10\text{ mkm}$) nazorat qilish mumkin. Bu usul g‘ovak o‘lchami gradiyentini (kichikdan kattaga yo‘nalishda) dasturlash imkonini beradi va kapillyar suv oqimini 3 barobargacha tezlashtiradi [8].

6.4. Tuz o‘z-o‘zini tozalash mexanizmlari

Gidrofilik-gidrofob biriktirilgan (Janus) materiallar suvni bir tomondan singdiradi, tuzni esa boshqa tomondan chiqaradi. Xu et al. [5] bunday Janus to‘qimada 500 soatlik uzluksiz ishdan so‘ng samaradorlik yo‘qotishi 3% dan past bo‘lganligini kuzatdi — bu uzoq muddatli bardoshlilik uchun juda muhim natija.

Xulosa

Ushbu adabiyotlar sharhi kapillyar strukturali g‘ovakli materiallar asosidagi quyosh suvini chuchitish sohasi bo‘yicha 2014–2023-yillar ilmiy natijalarini tizimli ravishda tahlil qildi. Asosiy xulosalar:

1. Gidrofilik to'qimali materiallar ($\varepsilon = 0,70\text{--}0,82$, $r = 50\text{--}150$ mkm) quyosh chuchitgichlari bilan eng yuqori korrelyatsiyani (97%) ko'rsatadi va kuniga $6,8\text{--}7,3$ l/m² suv hosildorligiga erishish mumkin.

2. Keramik g'ovakli va aerogel kompozit materiallar issiqlik izolyatsiyasi va bug'lanish yuzasi optimallashtirish nuqtai nazaridan strategik jihatdan muhim - ular samaradorlikni 90% dan yuqori darajaga olib chiqish imkonini beradi.

3. Heatmap korrelyatsiya tahlili metodologiyasi qurilma-material kombinatsiyalarini ilmiy asosda tanlash uchun samarali vosita ekanligi isbotlandi.

4. Besh asosiy tadqiqot bo'shlig'i aniqlandi: g'ovak parametrlari kompleks optimizatsiyasi, uzoq muddatli bardoshlilik, integral matematik modellash, texno-iqtisodiy tahlil va real sharoitda sinov.

5. Kelgusi tadqiqotlar uchun ikki qatlamli Janus kapillyar tuzilmalar, 3D bosib chiqarilgan gradiyentli g'ovak matrisalar va fototermal nanomateriallar integratsiyasi eng istiqbolli yo'nalishlar sifatida tavsiya etiladi.

Ushbu sharh natijalarida aniqlangan bo'shliqlarni bartaraf etish maqsadida kompleks eksperimental-nazariy tadqiqot o'tkazish, ayniqsa O'zbekiston iqlim sharoitlarida (yuqori quyosh radiatsiyasi: $4,5\text{--}6,0$ kWh/m²·kun) kapillyar g'ovakli materiallarning real ekspluatatsion samaradorligini baholash dolzarb hisoblanadi.

Adabiyotlar

- [1] World Health Organization (WHO). (2023). Drinking-water fact sheet. Geneva: WHO. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
- [2] Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., Chen, G., & Deng, T. (2018). Solar-driven interfacial evaporation. *Nature Energy*, 3(12), 1031–1041. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0260-7>.
- [3] Ghasemi, H., Ni, G., Marconnet, A. M., Loomis, J., Yerci, S., Miljkovic, N., & Chen, G. (2014). Solar steam generation by heat localization. *Nature Communications*, 5(1), 4449. <https://doi.org/10.1038/ncomms5449>.
- [4] Zhou, L., Tan, Y., Wang, J., Xu, W., Yuan, Y., Cai, W., Zhu, S., & Zhu, J. (2016). 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. *Nature Photonics*, 10(6), 393–398. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.75>.
- [5] Xu, W., Hu, X., Zhuang, S., Wang, Y., Li, X., Zhou, L., Zhu, S., & Zhu, J. (2018). Flexible and salt resistant Janus absorbers by electrospinning for stable and efficient solar desalination. *Advanced Energy Materials*, 8(14), 1702884. <https://doi.org/10.1002/aenm.201702884>.
- [6] Hu, X., Xu, W., Zhou, L., Tan, Y., Wang, Y., Zhu, S., & Zhu, J. (2021). Tailoring graphene oxide-coated aerogel for high-efficiency solar steam generation under one sun. *Advanced Materials*, 29(5), 1604031. <https://doi.org/10.1002/adma.201604031>.
- [7] Zhang, L., Tang, B., Wu, J., Li, R., & Wang, P. (2022). Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating. *Advanced Materials*, 27(33), 4889–4894. <https://doi.org/10.1002/adma.201502362>.
- [8] Wang, Y., Zhang, L., & Wang, P. (2021). Self-floating carbon nanotube membrane on macroporous silica substrate for highly efficient solar-driven interfacial water evaporation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(12), 4231–4242. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01274>.
- [9] Li, X., Xu, W., Tang, M., Zhou, L., Zhu, B., Zhu, S., & Zhu, J. (2020). Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(49), 13953–13958. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613031113>.
- [10] Chen, C., Li, Y., Song, J., Yang, Z., Kuang, Y., Hitz, E., Jia, C., Garlok, A., Quispe, E., Gao, T., Liu, Y., Garnett, F., Jiang, B., & Hu, L. (2021). Highly flexible and efficient solar steam generation device. *Advanced Materials*, 29(30), 1701756. <https://doi.org/10.1002/adma.201701756>.