

UO‘K 662.997

YER OSTI ISSIQLIK ALMASHINUV QURILMALARINING MATEMATIK MODELLARI TAHLILI

Xamrayev Sardor Ixomovich – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent,
ORCID: [0000-0002-0847-9488](https://orcid.org/0000-0002-0847-9488), E-mail: xamrayevs@bk.ru

Ibragimov Umidjon Xikmatullayevich – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent,
ORCID: [0000-0002-8848-0971](https://orcid.org/0000-0002-8848-0971), E-mail: ibragimov_u@rambler.ru

Qarshi-muhandislik iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

***Annotatsiya.** Binolarni isitish va sovitish tizimlarida qayta tiklanadigan energiya manbai sifatida geotermal energiya manbalari keng qo‘llaniladi. Yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining issiqlik xarakteristikasi geotermal issiqlik nasoslarini (GIN) samarali ishlashi uchun eng muhim hisoblanadi. Ushbu maqolada yirik GIN tizimlarda keng qo‘llaniladigan uchta turdagi, vertikal quduqli GIN, qoziqli GIN va gorizontal quduqli GINlari bo‘yicha so‘nggi ishlanmalar tahlili keltirilgan. Shuningdek, turli geologik sharoitlarni inobatga olgan holda issiqlik uzatish jarayonlarini tadqiqot qilish uchun taklif etilgan analitik va sonli modellarining tahlillari keltirilgan.*

***Kalit so‘zlar:** geotermal issiqlik nasoslari, vertikal quduqli geotermal issiqlik nasoslari, gorizontal quduqli issiqlik nasoslari, isitish va sovitish, gorizontal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari.*

УДК 662.997

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Хамраев Сардор Илхомович – доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Ибрагимов Умиджон Хикматуллаевич – доктор философии по техническим наукам (PhD),
доцент

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

***Аннотация.** В системах отопления и охлаждения зданий широко используются источники геотермальной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Тепловые характеристики подземных теплообменных устройств являются наиболее важными для эффективной работы геотермальных тепловых насосов (ГТН). В данной статье представлен анализ последних разработок трех типов ГТН, широко используемых в крупных системах: ГТН с вертикальными скважинами, ГТН с сваями и ГТН с горизонтальными скважинами. Также представлены анализы аналитических и численных моделей, предложенных для исследования процессов теплопередачи с учетом различных геологических условий.*

***Ключевые слова:** геотермальные тепловые насосы, геотермальные тепловые насосы с вертикальными скважинами, тепловые насосы с горизонтальными скважинами, отопление и охлаждение, горизонтальные подземные теплообменные устройства.*

UDC 662.997

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF UNDERGROUND HEAT EXCHANGE DEVICES

Khamrayev, Sardor Ixomovich – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD),
Associate Professor

Ibragimov, Umidjon Khikmatullayevich – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD),
Associate Professor

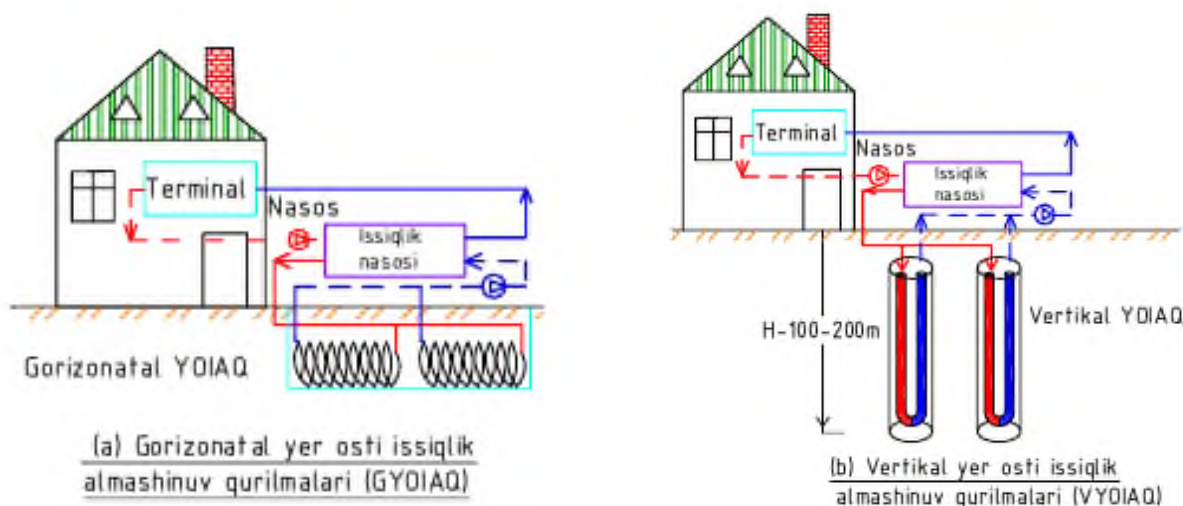
Karshi engineering-economics institute, Karshi city, Uzbekistan

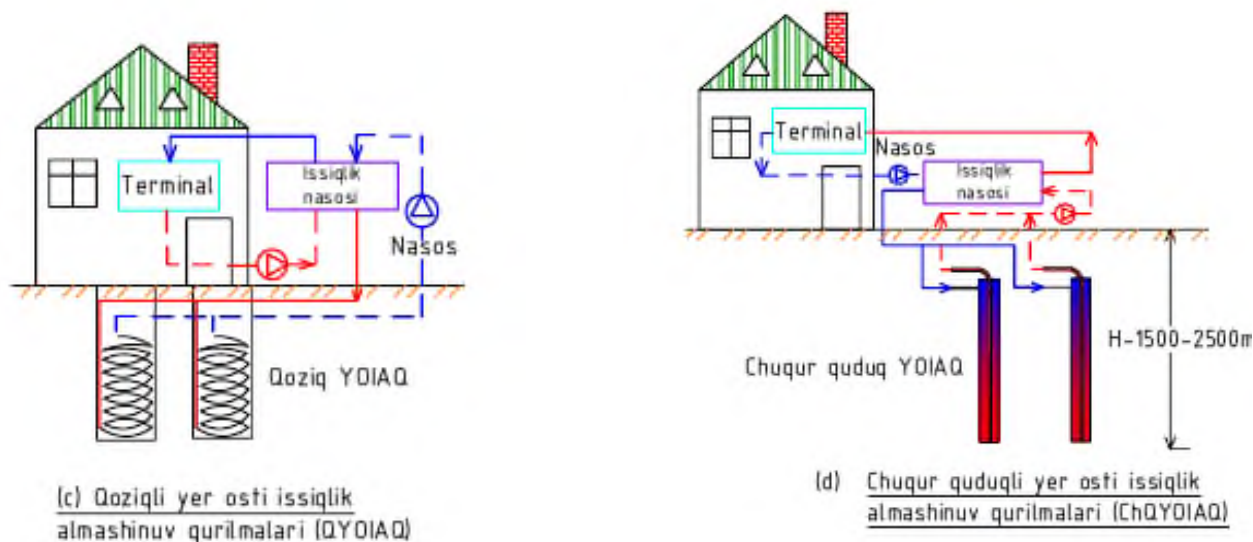
Abstract. Geothermal energy sources are widely used as a renewable energy source in building heating and cooling systems. The thermal characteristics of underground heat exchange devices are crucial for the efficient operation of geothermal heat pumps (GHPs). This article presents an analysis of recent developments in three types of GHPs widely used in large-scale systems: vertical borehole GHPs, pile-based GHPs, and horizontal borehole GHPs. Additionally, analyses of analytical and numerical models proposed for investigating heat transfer processes, taking into account various geological conditions, are presented.

Keywords: geothermal heat pumps, vertical borehole geothermal heat pumps, horizontal borehole heat pumps, heating and cooling, horizontal underground heat exchange devices.

Kirish

Binolarni isitish va sovitish tizimlarida qayta tiklanadigan energiya resurslaridan foydalanishni rivojlantirish, atrof-muhitga taʼsirini va issiqxona gazlari tashlanmalari miqdorini kamaytirish dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi. Foydalanadigan qayta tiklanadigan energiya manbalari ichida geotermal energiya katta qiziqish uygʻotmoqda, bunga sabab geotermal manbaning ishonchliligi va har joyda amalda mavjudligidir. Geotermal energiyadan foydalanishning oltita asosiy kategoriyasi mavjud: geotermal issiqlik nasoslari (GIN) choʻmilish va suzish havzalarida foydalanish, xonalarini isitish, issiqxonalarni isitish, akvakultura uchun havzalarni isitish va sanoatda foydalanish [1]. GINlari dunyoda eng koʻp qoʻllanilib, ularning umumiy oʻrnatilgan quvvati 77547 MVt ni tashkil etadi. Bu qiymat 2020-yilda geotermal energiyadan bevosita foydalanishdagi umumiy oʻrnatilgan quvvatning 71,6 % qismini tashkil etadi. Xalqaro geotermal kongresi (WGC) maʼlumotlariga koʻra ushbu qiymat 2015-yil bilan taqqoslaganda geotermal energiyani yillik isteʼmoli 1,84 marta ortgan. Yashash va savdo binolarida energiya tejash, CO₂ tashlanmalarini kamaytirish va havo ifloslanishini oldini olish uchun GINlari muhim rol oʻynaydi [2]. GINning oddiy tizimi yer osti issiqlik almashinuv qurilmasi, issiqlik nasosi va bino ichidagi issiqlik taʼminoti tizimlaridan iborat. Geotermal energiyadan ochiq foydalanish odatda bilvosita hisoblanadi, bunda asosiy jihoz yer osti issiqlik almashinuv qurilmasi hisoblanadi. GINli tizimlar uchun yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining toʻrtta turi mavjud: gorizontaal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari va chuqur quduqli issiqlik almashinuv qurilmalari (1-rasm).

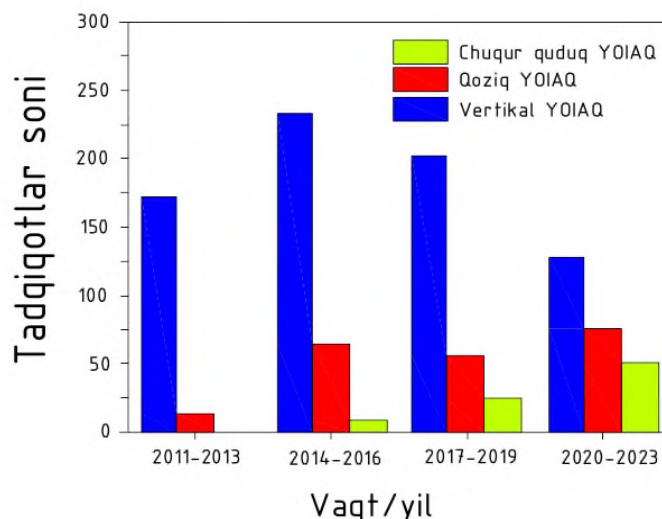




1-rasm. To'rtta turdagi yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining bazaviy sxemalari.

Uslub va materiallar

Gorizonttal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari odatda katta maydonni talab etganligi sababli, dunyoda keng qo'llanilmaydi. Shuning uchun gorizonttal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari to'g'risida to'xtalmaymiz. GINlari to'g'risidagi birinchi ma'lumot 1912-yilda olingan patent hisoblanadi [3]. GIN larni Shimoliy Amerika va Yevropa tez sur'atlarda rivojlanish davri birinchi neft inqirozidan keyin 1970-yillarga to'g'ri keladi. Ko'p sonli tadqiqotlarni aksariyati issiqlik uzatishni modellashtirish va GIN larini loyihalashtirishga qaratilgan. Vertikal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari, qoziqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari va chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalariga bag'ishlangan va Science Direct ma'lumotlar bazasida havola qilingan ilmiy tadqiqot ishlarining hozirgi holati 2-rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. Science Direct ma'lumotlar bazasida havola qilingan ilmiy tadqiqot ishlari

2-rasmdan ko'rinib turibdiki, chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalariga bag'ishlangan tadqiqot ishlarining soni 2016-yilda eng ko'p bo'lib, keyin kamaygan. 2021-yilda chop etilgan maqolalar soni 2016-yil bilan taqqoslansa, ularning soni 40% ga kamaygan. Boshqa tomondan qoziqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari va chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv

qurilmasiga bag‘ishlangan tadqiqotlar hali ham mashhur. Ushbu tahlillarni uchta asosiy kategoriyaga ajratish mumkin. Birinchi kategoriyadagi tahlillar chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini modellashtirish va loyihalash hamda qoziqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini termik sinashda bag‘ishlangan [3-7]. Ikkinchi kategoriyadagi tahlillar energiyani akkumulyatsiyalovchi GIN li gibrid tizimlar [8, 9] va quyosh energiyali GIN lari [10, 11] bilan bog‘liq. Uchinchi kategoriyadagi tahlillar chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari bilan bog‘liq tadqiqot ishlari [12, 13]. Yer osti issiqlik almashinuv qurilmasi va yer o‘rtasidagi issiqlik uzatishni modellashtirish darajasi ham shunga o‘xshash bo‘lib, modellashtirish tajribasini bir-biri bilan taqqoslash mumkin. Shuningdek, GIN ning turli shakllari to‘g‘risidagi bilim muhandislar uchun ham juda foydalidir. Analitik modellashtirish chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining ko‘pgina analitik usullari yoki chiziqlik issiqlik manbaiga [14] yoki silindri issiqlik manbaiga asoslangan. Yakka quduq issiqlik o‘tkazuvchanligining cheksiz chiziqlik manbaini birinchi analitik yechimi Ingersol va Plasslar [15] tomonidan taklif etilgan bo‘lib, u keyingi loyihalash dasturini ishlab chiqish uchun asos bo‘lib xizmat qildi. 1986-yilda Eskilson [16] quduqli tizimni termik tahliliga superpozitsiya tamoyilini kiritdi. O‘zgarmas issiqlik oqimli bitta quduqdagi harorat tebranishlari asosida superpozitsiya tamoyilidan foydalanib, isitish sovitishga o‘zgaruvchan yuklama sharoitida bir nechta quduqda haqiqiy harorat tebranishini olish mumkin edi. Superpozitsiyaning ushbu usuli kichik vertikal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining muhandislik loyihalarida keng qo‘llaniladi, buning sababi usulni fizik mohiyatini tushunarligi va hisoblashni osonligidir [6-17]. Issiqlik manbai ham chiziqlik ham silindrik bo‘lgan modellar quduq devoridagi bir jinsli issiqlik oqimini va chuqur quduqlarda tuproqning bir jinsli issiqlik xususiyatini aniqlash imkonini beradi, bu esa haqiqiy holatdan og‘ishga chetlanishga olib keladi. Abdelaziz va boshqalar chekli chiziqlik manba modeliga va superpozitsiya tamoyiliga asoslanib, turli qatlamlarning ichida harorat reaksiyasini hisoblash uchun yangi ko‘p qatlamli FLS modelini taklif etishdi. Ko‘p qatlamli modelda GIN bir nechta segmentlarga ajratilgan bo‘lib, belgilangan nuqtadagi tuproq haroratining reaksiyasining ushbu barcha segmentlarning alohida hissalarini umumlashtirish yo‘li bilan aniqlash mumkin. Ko‘p qatlamli modelning baholovchi natijalar, chekli elementlar usuli yordamida olingan natijalar bilan yaxshi mos keladi. Ko‘p qatlamli model bo‘yicha o‘lchangan haroratlar, bir jinsli tuproq uchun chekli elementlar modeli bo‘yicha o‘lchangan haroratlar bilan taqqoslanadi. Natijalarga ko‘ra, haroratni o‘lchashdagi noto‘g‘ri baholash 10 dan 25% gacha oraliqda bo‘lib, bunga sabab tuproqni bir jinsli qabul qilinganligidir [18]. Pan va boshqalar [19] ko‘p qatlamli FSL modelga o‘xshash bo‘lgan silindrik issiqlik manbai ko‘p qatlamli modelni taklif etishdi. Ushbu model qatlamsimon tuproqda vertikal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari uchun mo‘ljallangan va integral o‘zgartirish usulidan foydalanib, tuproqning harorat reaksiyasini analitik ifodalash imkonini beradi. Natijalarga ko‘ra, tuproq qatlamlari o‘rtasidagi issiqlik xususiyatlarini turliligicha hisobiga qatlamlar chegaralari orqali vertikal bo‘yicha issiqlikni qo‘shimcha uzatilishi kuzatilgan. Yuqorida keltirilgan analitik modellarda yer osti suvlari oqimining yer osti issiqlik almashinuv qurilmalariga termokonvektiv ta‘sirini inobatga olmaydi. Haqiqatan, yer osti suvlarini mavjud bo‘lishi yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarining issiqlik xarakteristikasiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatdi [20]. Diao va boshqalar [21] yer osti suvlarining ta‘siridan yuzaga keladigan konvektiv samaralarni hisoblash uchun harakatlanuvchi cheksiz chiziqlik manba modelini taklif etishdi va suv bir tekis o‘zgaruvchan cheksiz bir jinsli g‘ovak muhitda tuproq harorati reaksiyasining analitik yechimini olishdi. Satton va boshqalar [22] harakatlanuvchi chiziqlik manbai yechim asosida yer osti suvlarining konveksiyasining inobatga oluvchi tuproq qarshiligi qiymatini baholash modelini ishlab chiqishgan. Birlashtirilgan qiymat yerga ulashdan faqatgina o‘tkazuvchanlik hisobiga farq qiladi.

Tahlil

Chiziqlik manbaning an’anaviy modeli bilan taqqoslaganda yechim shuni ko‘rsatadiki, yer osti suvlarining oqimi issiqlik uzatish jarayoniga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi. Keyinchalik, o‘qiy issiqlik uzatish va yer osti suvlarining oqimini inobatga olish uchun Molina-Xirald va boshqalar [23] cheksiz

chiziqli harakatlanuvchi manbali modelni taklif etishdi. Ushbu model asosan uzoq muddatli modellashtirish uchun ahamiyatli bo‘lib, cheksiz chiziqli harakatlanuvchi manbali model bilan chegaralanishini bartaraf etdi. Yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari turli gidrogeologik va termik xususiyatli quduqlarning chuqurligi bo‘yicha turli qatlamda joylashtirilishi mumkin. Shunday qilib qatlamlar o‘rtasidagi yer osti suvlari oqimidagi farq katta bo‘lganda GIN tizimlarning uzoq muddatli samaradorligini baholash uchun tuproqning bir jinsli emasligini inobatga olish zarur. Vertikal yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari uchun ko‘p plastli geologiyalardagi yer osti suvlarining ta‘sirini inobatga oluvchi takomillashtirilgan modellar ishlab chiqildi [24, 25]. Natijalarni ko‘rsatishicha yer osti suvlarining yuqori tezligi qo‘shni qatlamlarning ichidagi issiqlikdan o‘zaro ta‘sirlashishni susaytiradi. Yer osti suvlari oqimining tezligi yuqori bo‘lgan holatda qatlam o‘rtasida tuproqni bir jinslili bajariladi. Teskari holatda, o‘tish sharoitlarida, ayniqsa qatlam chegaralarida ko‘p qatlamli yondashuv mos keladi. Yer osti suvlari oqimli MFLS modeliga muvofiq, bir nechta nuqtalardagi tekshirilgan harorat tebranish bilan yer osti issiqlik almashinuv qurilmasi orqali o‘tayotgan yer osti suvlari oqimining yo‘nalishi va tezligini aniqlash uchun teskari hisoblash metodologiyasi tadqiqot qilingan [26]. Hisoblashni teskari usulini qo‘llashning xususiyati shundaki, u yer osti suvlarining tezligini aniq qiymatini olishni ta‘minlaydi, keyin yer osti suvlarining baholangan parametrlaridan foydalanib, yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarida issiqlik uzatish samaradorligini tahlil qilish mumkin. Pan va boshqalar [27] tomonidan uchta turli yuqori chegaraviy shartli yangi analitik model ishlab chiqilgan bo‘lib, ushbu model yordamida chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmasida harorat tebranishini tadqiq qilish mumkin. Natijalarga ko‘ra, Dirixle chegaraviy shartlaridan foydalanilganda chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmasida hisoblangan o‘rtacha harorat, Neyman va Robin chegaraviy shartlaridan foydalanilganda qaraganda 14,1% va 8,5% ga kichik.

Munozara

Sonli modellashtirish yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarida issiqlik uzatishni tadqiqot qilishning sonli usullari uzlukli sonli sxemalar asosidagi chekli elementlar usuli yoki chekli farqlar usulida olib boriladi. Kompyuter texnologiyalarini rivojlanishi bilan sonli hisoblashlar issiqlik uzatishni tadqiqot qilishning asosiy vositasiga aylandi va yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini nazariy tadqiqot qilishda asosiy vosita hisoblanadi. Ushbu yo‘nalish juda ham aniq holatni, ya‘ni tuproqning bir jinsli emasligini inobatga oladi va qisqartirilgan shartlar qabul qilmasdan chegaraviy shartlar asosida tadqiqot olib borishni ta‘minlaydi. Birinchi uch o‘lchamli sonli model Xellstrem [28] tomonidan taklif etilgan va u uch qismdan iborat: quduq ichidagi issiqlik almashinuv, alohida quduqlarning mahalliy issiqlik almashinuv va alohida quduqlarni birlashtiruvchi global model. Keyin model TRNSYS dasturida ishlab chiqildi [29]. So‘nggi yillarda turli soddalashtirilgan shartli sonli modellar ishlab chiqildi, masalan yer osti suv oqimlarining harorat gradient modeli [30] va tog‘ jinsi va tuproqning turli qatlamlari modeli [31].

Yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari parallel ulangan holatda aniqlikni saqlagan holatda hisoblash vaqti qisqarishini ta‘minlovchi globus sonli modeli ishlab chiqilgan bo‘lib, ushbu model quduq ichidagi issiqlik almashinuvini 1D –modelini va quduq tashqarisidagi issiqlik almashinuvining 3D- modellarini birlashtirilgani hisoblanadi [32]. CFD model asosida koaksial kichik chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalari sonli tadqiqot qilingan bo‘lib, ushbu tadqiqotda bir nechta konstruktiv parametrlarni, kirishdagi sarfni kirayotgan suyuqlikning harorati, ichki quvur materiali va tashqi quvur diametrini issiqlik uzatish xarakteristikasiga ta‘siri o‘rganilgan [33]. Shunday qilib, muhandislik maqsadlarida yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini loyihalash uchun sonli usullardan foydalanish, uzunlik va vaqt masshtablari kuchli farqlanganligi hisobiga juda noqulay hisoblanadi, shuningdek, sonli usullar uzoq vaqt hisoblashni talab etadi. G- funksiya va qisqa vaqtli qadamli model. Tuproqning harorat reaksiyasini hisoblashni soddallashtirish uchun Eskilson va Klaesson [34-36] G- funksiyani yangi konsepsiyasini kiritdi. Ushbu funksiya tebranishning o‘lchamsiz harorat koeffitsiyenti sifatida aniqlanadi. U quduq devorining harorati va quduqni yerdan chuqurligigacha issiqlikning haqiqiy koeffitsiyenti orqali bog‘langan. Ushbu gibrid model analitik va

sonli yechimlarning birlashtirilganidir. O'zgarmas boshlang'ich va chegaraviy shartli bir jinsli tuproqda yakka quduq uchun koordinataning radial-o'qiy sistemasida nobarqaror chekli farqlar tenglamalaridan foydalanib ikki o'lchamli sonli hisoblash o'tkazilgan. Yechim bazaviy pog'onali issiqlik impulsidan foydalanib olingan. Keyin quduq maydonining yakka impulsiga reaksiyasi G-funksiya yordamida ifodalangan. Keyinchalik Yavuztyurk va Spitlerlar [37] chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarida nobarqaror issiqlik uzatishni modellashtirish uchun qisqa vaqtli qadamli modelni taqdim etishgan bo'lib, uning aniqligi soat yoki kam vaqtga yetadi. Sonli natijalar qisqa vaqt qadamida tebranish koeffitsiyenti orqali ifodalangan. Prieto va Chimminolar [38] ekvivalent quduq usullarini ishlab chiqishdi, ushbu model bir necha soniyada mingdan ortiq quduq konlari uchun haroratni tebranish funksiyasini hisoblash imkonini beradi. Keyinchalik ketma-ket va parallel ulangan quduqlar aralash joylashtirilgan quduq maydonining G-funksiyasini hisoblashning yarim analitik usuli taqdim etildi [39]. Yuqorida ta'kidlanganidek, chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini modellashtirishni eng ko'p ishlatiladigan metodologiyasi bu quduqda issiqlik almashinuv zonasini ikkita qismga ajratishdir: quduq ichidagi barqaror issiqlik almashinuv qismi va quduq tashqarisidagi nobarqaror issiqlik almashinuv qismi uzoq muddatli istiqbolida quduq ichidagi issiqlik jarayonini, tashqi tuproq bilan taqqoslaganda o'lchami va issiqlik sig'imini kichikligi hisobiga barqaror hisoblash mumkin. So'nggi o'n yillikdagi tadqiqotlar yer osti issiqlik almashinuv qurilmasining qisqa vaqtli reaksiyasining tadqiqotiga bag'ishlangan bo'lib, ular gibrid GIN larini optimal konstruksiyasini aniqlashga, joylardagi tebranishini sinashga, soatbay modellashtirish va ishni optimal boshqarishga qaratilgan [40]. Elektrik o'xshashlik yondashuvidan foydalanib, quduqning issiqlik sig'imini hisoblash uchun takomillashtirilgan "quvvatlar qarshiligi modeli" ishlab chiqildi [41]. Rostlangan quvvatli va termik qarshilikli yangi model nobarqaror holatda issiqlik uzatish masalasini yechish uchun ishlatiladi. Yer osti issiqlik almashinuv qurilmasidagi issiqlik jarayonlarini tadqiqot qilish uchun Li va boshqalar kompozit muhitli chiziqli manba modelini taklif etishdi [42]. Ushbu model nafaqat eritma issiqlik sig'imining ta'sirini, balki tuproq va eritma o'rtasidagi farqni ham inobatga oladi, shuningdek U-simon quvurlarning turli konfiguratsiyalarini modellashtirish imkonini beradi.

Xulosa

Ushbu tahliliy maqolada vertikal quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmalarini modellashtirish bo'yicha erishilgan so'nggi yutuqlar va tadqiqotlar tahlil qilindi. Chuqur quduqli yer osti issiqlik almashinuv qurilmasidagi issiqlik uzatish jarayonlarini to'liq tadqiqot qilish uchun aniqlik darajasi turlicha bo'lgan analitik modellar bilan taqqoslanganda muhandislik loyihalarida kam qo'llanishi asoslandi, uning o'rniga g – funksiyadan foydalanish maqsadga muvofiqligi asoslandi.

Adabiyotlar

- [1] J.W. Lund, A.N. Toth, Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review, *Geothermics* 90 (2021) 101915.
- [2] Khamraev S.I, Ibragimov U.Kh, Kamolov B.I. Removal of hydrodynamic lesions of a heated floor with a solar collector // APEC-V-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1070(2022) 012018 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1070/1/012018.
- [3] Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S.I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-412-421>.
- [4] Y. Yuan, X. Cao, L. Sun, et al., Ground source heat pump system: a review of simulation in China, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (9) (2012) 6814–6822.
- [5] H. Yang, P. Cui, Z. Fang, Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems, *Appl. Energy* 87 (1) (2010) 16–27.

- [6] M. Li, A.C.K. Lai, Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): a perspective of time and space scales, *Appl. Energy* 151 (2015) 178–191.
- [7] E. Atam, L. Helsen, Ground-coupled heat pumps: part 1 –Literature review and research challenges in modeling and optimal control, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54 (2016) 1653–1667.
- [8] N. Zhu, P. Hu, L. Xu, et al., Recent research and applications of ground source heat pump integrated with thermal energy storage systems: a review, *Appl. Therm. Eng.* 71 (1) (2014) 142–151.
- [9] S.K. Soni, M. Pandey, V.N. Bartaria, Hybrid ground coupled heat exchanger systems for space heating/cooling applications: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60 (2016) 724–738.
- [10] G. Nouri, Y. Noorollahi, H. Yousefi, Solar assisted ground source heat pump systems a review, *Appl. Therm. Eng.* 163 (2019) 114351.
- [11] S.K. Shah, L. Aye, B. Rismanchi, Seasonal thermal energy storage system for cold climate zones: a review of recent developments, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 97 (2018) 38–49.
- [12] I. Tomac, M. Sauter, A review on challenges in the assessment of geomechanical
- [13] rock performance for deep geothermal reservoir development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 3972–3980.
- [14] M.R.A. Sapinska-Sliwa, A. Gonet, et al., Deep borehole heat exchangers - a conceptual and comparative review, *Int. J. Air Cond. Refrig.* 24 (1) (2016).
- [15] H. Zeng, N. Diao, Z. Fang, A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers, *Heat Transf. Asian Res.* 31 (7) (2002) 558–567.
- [16] L.R. Ingersoll, H.J. Plass, Theory of ground pipe heat source for the heat pump, *Heat. Pip. Air Cond.* 20 (1948) 4.
- [17] P. Eskilson, Superposition borehole model, Manual for Computer Code, University of Lund, Lund, Sweden, 1986.
- [18] J. Luo, J. Rohn, W. Xiang, et al., A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems, *Energy Build.* 117 (2016) 160–175.
- [19] S.L. Abdelaziz, T.Y. Ozudogru, C.G. Olgun, et al., Multilayer finite line source model
- [20] for vertical heat exchangers, *Geothermics* 51 (2014) 406–416.
- [21] A. Pan, J.S. McCartney, L. Lu, et al., A novel analytical multilayer cylindrical heat source model for vertical ground heat exchangers installed in layered ground, *Energy* 200 (2020).
- [22] Z. Zhao, Y.F. Lin, A. Stumpf, et al., Assessing impacts of groundwater on geothermal heat exchangers: a review of methodology and modeling, *Renew. Energy* 190 (2022) 121–147.
- [23] N. Diao, Q. Li, Z. Fang, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *Int. J. Therm. Sci.* 43 (12) (2004) 1203–1211.
- [24] M.G. Sutton, D.W. Nutter, R.J. Couvillion, A ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow, *J. Energy Resour. Technol.* 125 (3) (2003) 183–189.
- [25] N. Molina-Giraldo, P. Blum, K. Zhu, et al., A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection, *Int. J. Therm. Sci.* 50 (12) (2011) 2506–2513.
- [26] J. Hu, An improved analytical model for vertical borehole ground heat exchanger with multiple-layer substrates and groundwater flow, *Appl. Energy* 202 (2017) 537–549.
- [27] S. Erol, B. Francois, Multilayer analytical model for vertical ground heat exchanger with groundwater flow, *Geothermics* 71 (2018) 294–305.
- [28] W. Zhang, H. Yang, N. Diao, et al., Exploration on the reverse calculation method of groundwater velocity by means of the moving line heat source, *Int. J. Therm. of vertical water flow, Renew. Energy* 172 (2021) 1046–1062.
- [29] A. Pan, L. Lu, Y. Tian, A new analytical model for short vertical ground heat exchangers with Neumann and Robin boundary conditions on ground surface, *Int. J. Therm. Sci.* (2020) 152.
- [30] G. Hellström, Ground heat storage:thermal analysis of duct storage system, in: *Physics & Astronomy*, University of Lund, Lund, Sweden, 1991, p. 262.

- [31] S.A. Klein, et al., TRNSYS Manual, A Transient Simulation Program, Solar Engineering Laboratory. University of Wisconsin-Madison, Madison, 1996.
- [32] I.I. Stylianou, S. Tassou, P. Christodoulides, et al., Modeling of vertical ground heat exchangers in the presence of groundwater flow and underground temperature gradient, *Energy Build.* 192 (2019) 15–30.
- [33] K. Chen, J. Zheng, J. Li, et al., Numerical study on the heat performance of enhanced coaxial borehole heat exchanger and double U borehole heat exchanger, *Appl. Therm. Eng.* 203 (2022) 117916.
- [34] M. Chwieduk, New global thermal numerical model of vertical U-tube ground heat exchanger, *Renew. Energy* 168 (2021) 343–352.
- [35] G. Li, J. Yang, X. Zhu, et al., Numerical study on the heat transfer performance of coaxial shallow borehole heat exchanger, *Energy Built Environ.* 2 (4) (2021) 445–455.
- [36] P. Eskilson, J. Claesson, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, University of Lund, 1987 PhD Doctoral Thesis.
- [37] P. Eskilson, J. Claesson, Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes, *Numer. Heat Transf.* 13 (2) (1988) 149–165.
- [38] J. Claesson, P. Eskilson, Thermal analysis of heat extraction boreholes, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling ENERSTOCK 85*, Toronto (Canada), Public Works, 1985, pp. 222–227. September 22-26.
- [39] C. Yavuzturk, J.D. Spitler, A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers, *ASHRAE Trans.* 105 (2) (1999) 475–485.
- [40] C. Prieto, M. Cimmino, Thermal interactions in large irregular fields of geothermal boreholes: the method of equivalent boreholes, *J. Build. Perform. Simul.* 14 (4) (2021) 446–460.
- [41] M. Cimmino, Semi-analytical method for g-function calculation of bore fields with series and parallel-connected boreholes, *Sci. Technol. Built Environ.* 25 (8) (2019) 1007–1022.
- [42] M. Li, A.C.K. Lai, Analytical model for short-time responses of ground heat exchangers with U-shaped tubes: model development and validation, *Appl. Energy* 104 (2013) 510–516.
- [43] A. Zarrella, M. Scarpa, M. De Carli, Short time step analysis of vertical groundcoupled heat exchangers: the approach of CaRM, *Renew. Energy* 36 (9) (2011) 2357–2367.
- [44] J. Wei, L. Wang, L. Jia, et al., A new analytical model for short-time response of vertical ground heat exchangers using equivalent diameter method, *Energy Build.* 119 (2016) 13–19.