ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉSTERVEZET

ZÓNAI VIKTOR

Talajszondás hőszivattyú energetikai vizsgálata

Témavezető: Dr. habil. Sánta Róbert

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2026.11.15

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS 6

A tudományos probléma megfogalmazás 6

Célkitűzések 8

A téma kutatásának hipotézisei 9

Kutatási módszerek 12

1 SZAKIRODALMI HÁTTÉR 13

1.1 Energia- és klímapolitikai háttér 13

1.2 Talajszondás hőszivattyús rendszerek szerepe és működési alapjaik 15

1.3 Rendszerelméleti input–output szemlélet hőszivattyús rendszereknél 18

1.4 A talajszondás hőszivattyús rendszerek modellezési lehetőségei 21

1.4.1 Analitikus modellek 22

1.4.2 Numerikus modellek 23

1.4.3 Válaszfüggvény és hibrid modellek 25

1.5 Thermal Response Test vizsgálatok és klasszikus paraméterazonosítás 28

1.6 Bibliometriai elemzés 29

1.6.1 Az elemzés adatbázisa és módszertani kerete 30

1.6.2 Keresési stratégia és publikációs halmaz 30

1.6.3 Tudományos kapcsolatok és kiemelt publikációk 31

1.6.4 Publikációs trendek és kutatási irányok 32

2 MÉRÉSI INFRASTRUKTÚRA, TEREPI ADATGYŰJTÉS ÉS ÜZEMI FELTÉTELEK 34

2.1 Mélységfelbontású hőmérséklet-monitorozó rendszer felépítése 34

2.1.1 Érzékelőkalibrálás és a mérési bizonytalanság meghatározása 35

2.2 A vizsgált talajszondás hőszivattyús rendszer helyszíni és furatmező bemutatása 37

2.2.1 A mérőrendszer terepi telepítése és mechanikai védelme 39

2.2.2 Mérési fázisok, hidraulikai üzemállapotok és adatgyűjtési intervallumok 40

2.3 Mélységfüggő hőmérsékletprofilok és a mérési adatok előzetes értékelése ... 42

3 ÜZEMI HŐMÉRSÉKLETADATOKON ALAPULÓ MÉLYSÉGFÜGGŐ HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ-AZONOSÍTÁSA ... 45

3.1 Matematikai modell ... 45

3.1.1 Folyadékoldali energiamérleg és vonalmenti-hőáram ... 45

3.1.2 Furatfal-hőmérséklet rekonstrukciója ... 47

3.1.3 Irányadó hővezetési egyenlet ... 47

3.1.4 Perem- és kezdeti feltételek ... 48

3.1.5 Perturbációs hőmérséklet bevezetése ... 48

3.1.6 Radiális rács logaritmikus osztása ... 49

3.1.7 Térbeli diszkretizálás hengerkoordinátában ... 49

3.1.8 Belső perem diszkretizálása ... 50

3.1.9 Időbeli diszkretizálás – Crank Nicolson séma ... 50

3.1.10 Modellkimenet – Furatfali hőmérséklet ... 51

3.1.11 A talaj hővezetési tényezőjének becslése ... 51

3.1.12 Simítás mélység mentén – Regularizáció ... 52

3.2 A módszer eredményeként előálló mélységfüggő hővezetési tényezőprofil ... 52

3.2.1 Szegmensenkénti hővezetési tényezőprofil ... 54

3.3 Az 1. tézis megfogalmazása ... 58

4 A MÉLYSÉGFÜGGŐ HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ-AZONOSÍTÁS TRT-VALIDÁCIÓJA ÉS ALKALMAZHATÓSÁGI FELTÉTELEI ... 59

4.1 Referencia TRT-vizsgálat bemutatása ... 59

4.2 Energia-súlyozott λeff meghatározása a szegmensenkénti $\lambda(z)$ profilból ... 61

4.3 A TRT és az inverziós módszer eredményeinek összehasonlítása ... 62

4.4 A furat-termikus ellenállás Rb hatásának vizsgálata ... 64

4.5 A radiális rácsfelbontás hatása ... 65

4.6 Jel–zaj viszony és Monte Carlo-alapú zajérzékenység 66
4.7 A $\lambda(z)$ rekonstrukció alkalmazhatósági feltételei és érvényességi tartománya 68
4.8 A 2. tézis megfogalmazása 72
5 A VISSZATÉRŐ ÁGI PARAZITA EXOTERM ZÓNA MÉRÉSALAPÚ AZONOSÍTÁSA 73
5.1 A parazita exoterm hőcsere fizikai értelmezése 73
5.2 Szegmensenkénti vonalmenti hőáram 74
5.3 Időintegrált szegmensenergia és bizonytalanságvezérelt osztályozás 75
5.4 Az exoterm átmeneti mélység meghatározása 76
5.5 Exoterm veszteség, átlagos veszteségteljesítmény és forrásoldali hőmérséklet-egyenérték 77
5.6 COP-hatás becslése Carnot-skálázott helyettesítő modellel 77
5.7 Eredmények két üzemi állapotra 78
5.7.1 Időintegrált vonalmenti hőmennyiség és átmeneti mélység 79
5.7.2 Exoterm veszteségmutatók: $Eexo$, $Pexo, avg$ és $\Delta Tout$ 80
5.7.3 COP-hatás Carnot-skálázott helyettesítő modellel 81
5.8 A 3. tézis megfogalmazása 81
6 AZ EXOTERM MÉLYSÉGINDIKÁTOR ROBUSZTUSSÁGI ÉS ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATA 82
6.1 A globális visszatérő ági jel szerepe az időablak-választásban 82
6.2 Időablak-érzékenységi vizsgálat 83
6.3 A küszöbskálázó tényező érzékenysége 87
6.4 Mintavételi ritkítás és hiányadat-kezelés hatása 91
6.5 A módszer alkalmazhatósági feltételei és korlátai 94
6.6 A 4. tézis megfogalmazása 97
7 ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK 97
7.1 Új tudományos eredmények 97

7.2 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlások és további fejlesztési irányok 99
IRODALOMJEGYZÉK 102
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK 118
TÁBLÁZATJEGYZÉK 125
ÁBRAJEGYZÉK 126
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS 129

BEVEZETÉS

A tudományos probléma megfogalmazás

A talajszondás hőszivattyús rendszerek a korszerű, energiahatékony és alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőellátási megoldások közé tartoznak. [1–3] Alkalmazásuk különösen indokolt az épületenergetikai korszerűsítések, a fosszilis energiahordozóktól való függőség mérséklése, valamint a megújuló energiaforrások részarányának növelése szempontjából [4–6]. A rendszer hatékony működésének egyik meghatározó eleme a talajszonda, amely a hőhordozó közeg és a környező talaj közötti hőátadási kapcsolatot biztosítja. [2,7] Ennek hőtechnikai viselkedése közvetlenül befolyásolja a hőszivattyú forrásoldali hőmérsékletszintjét, teljesítménytényezőjét és hosszú távú üzembiztonságát. [2,3,7]

A talajszondás rendszerek tervezése és üzemeltetése során ugyanakkor továbbra is jelentős bizonytalanságot okoz, hogy a talajszondák valós üzemi viselkedése több, egymással kölcsönhatásban álló tényező eredőjeként alakul ki. [8,9] A talaj hővezetési tulajdonságai mélység szerint változhatnak [8–11], a furat kialakítása, a kitöltőanyag, a csőgeometria, a hőhordozó közeg áramlási viszonyai, valamint az időben változó üzemállapotok egyaránt befolyásolják a mért hőmérsékleti választ. [8–10,12,13] A hagyományos kiértékelési módszerek, főleg a teljes furathosszra vonatkozó effektív paramétereket szolgáltató TRT-vizsgálatok, értékes tervezési információt adnak [8–10], azonban korlátozottan képesek feltárni a fúrólyuk mentén jelentkező mélységfüggő hőtechnikai eltéréseket. [14–17]

A tudományos probléma egyik lényeges eleme ezért az, hogy a talajszondák hőtechnikai viselkedését a gyakorlatban gyakran globális, átlagolt jellemzőkkel írják le, miközben a tényleges hőátadási folyamatok mélység szerint tagoltak. [8–11,18–20] A teljes furathosszra vonatkozó átlagos hővezetési tényező önmagában nem mutatja meg, hogy a szonda mely szakaszai vesznek részt intenzívebben a hőfelvételben vagy hőleadásban, illetve hol jelentkeznek hőtechnikailag kedvezőbb vagy kedvezőtlenebb zónák. [8–11] Ez különösen rétegzett talajszerkezet, változó nedvességtartalom, eltérő furatkialakítás vagy hosszú távú üzemi terhelés esetén okozhat tervezési és üzemeltetési bizonytalanságot. [2,7–9,11]

További problémát jelent, hogy az üzemelő rendszerekből származó mérési adatok közvetlenül nem tekinthetők laboratóriumi körülmények között előállított, jól kontrollált

adatsoroknak. Az üzemi hőmérséklet-idősorok tranziens hatásokat, hidraulikai ingadozásokat, mérési zajt, hiányzó adatszakaszokat és különböző üzemállapotokból származó hatásokat tartalmazhatnak [21–25]. Emiatt a mélység szerint felbontott hőmérsékletmérések mérnöki értelmezése csak akkor lehet megbízható, ha a mérési bizonytalanság, az adatminőség, az időablak-választás és a hidraulikai terhelés hatása is figyelembevételre kerül. [21–25] [ZV1, ZV2]

A tudományos probléma másik fontos eleme a visszatérő ág mentén kialakuló kedvezőtlen hőtechnikai viselkedés azonosítása. Fűtési üzemben a visszatérő ágban áramló hőhordozó közegnek ideális esetben hőt kellene felvennie a környező talajból. Valós üzemi körülmények között azonban előfordulhat, hogy a sekélyebb szakaszokon a folyadék hőt ad le a környezetének, ami veszteségjellegű folyamatként értelmezhető. [ZV2] Ennek helye, kiterjedése és energetikai hatása hagyományos, csak belépő és kilépő hőmérsékletekre épülő mérésekből nem határozható meg kellő részletességgel. [9,11,18,19,21] Ezért szükség van olyan diagnosztikai módszerre, amely a többmélységű hőmérsékletadatokból képes lokalizálni és számszerűsíteni a visszatérő ágban jelentkező parazita hőleadási zónát. [21]

Mindezek alapján a kutatásom tudományos problémája abban foglalható össze, hogy a talajszondás hőszivattyús rendszerek valós üzemi működéséből származó többmélységű hőmérsékletadatok jelenleg csak korlátozottan hasznosulnak a talajszonda mélységfüggő hőtechnikai viselkedésének meghatározásában. Nem áll rendelkezésre széles körben alkalmazott, mérés- és modellalapú kiértékelési keret, amely az üzemi hőmérséklet-idősorokból szegmensenkénti vonalmenti hőáramot, mélységfüggő effektív hővezetési tényezőprofilt, valamint visszatérő ági parazita hőleadási indikátorokat határozna meg úgy, hogy közben az eredmények TRT-vizsgálattal összevethetők, mérési bizonytalansággal értelmezhetők és üzemi monitoring célra is alkalmazhatók legyenek. [9,10,26]

A disszertációm ezért arra a problémára keres választ, hogy miként nyerhető ki a többmélységű, valós üzemi hőmérsékletmérésekből olyan mérnöki szempontból értelmezhető többletinformáció, amely támogatja a talajszonda hőtechnikai állapotának részletesebb értékelését, a tervezési paraméterek pontosítását, a parazita hőleadási jelenségek felismerését, valamint az üzemeltetési döntések megalapozását. [ZV1, ZV2]

Célkitűzések

A disszertációm fő célja olyan mérés- és modellalapú kiértékelési eljárások kidolgozása és igazolása, amelyek üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszer többmélységű hőmérsékletmérései alapján lehetővé teszik a talajszonda mélység szerint változó hőtechnikai viselkedésének részletesebb értelmezését. A kutatás középpontjában az áll, hogy a valós üzemi körülmények között rögzített hőmérséklet-idősorokból olyan mérnöki szempontból értelmezhető információk legyenek kinyerhetők, amelyek a hagyományos, teljes furathosszra átlagolt jellemzők mellett többletinformációt adnak a talajszonda működéséről.

A célom nem a standard TRT-vizsgálatok kiváltása, hanem azok kiegészítése olyan mélység szerint felbontott kiértékelési módszerrel, amely a talajszonda mentén kialakuló lokális hőátadási viszonyokat is értelmezhetővé teszi. Ennek megfelelően a kutatás egyik fő célkitűzése annak vizsgálata, hogy az üzemi hőmérsékletadatokból meghatározható-e olyan mélységfüggő effektív hővezetési tényezőprofil, $\lambda(z)$, amely fizikai szempontból értelmezhető, TRT-eredményekkel összevethető, és mérnöki alkalmazásra alkalmas információt szolgáltat a talajszonda környezetének hőtechnikai tulajdonságairól.

A kitűzött cél eléréséhez a furathőcserélőt, másnéven talajszondát tengelyirányban szegmensekre bontom, és a mért előremenő és visszatérő ági hőmérsékletadatok, valamint a térfogatáram felhasználásával szegmensenkénti vonalmenti hőáramot határozok meg. Ezt a folyadékoldali energiamérlegből származtatott, időben változó hőterhelést tranziens radiális hővezetési modellel kapcsolom össze. A modell segítségével inverz azonosítási eljárást dolgozok ki a talaj effektív hővezetési tényezőjének mélység szerinti becslésére. Célom, hogy a módszerrel ne csupán egyetlen, teljes furathosszra vonatkozó átlagérték, hanem a szonda mentén értelmezhető $\lambda(z)$ profil legyen előállítható.

További célkitűzésem, hogy a mélység szerint felbontott inverziós eredményeket közvetlenül összehasonlíthatóvá tegyem a standard TRT-vizsgálatból származó effektív hővezetési tényezővel. Ennek érdekében energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőt vezetek be, amely a szegmensenkénti $\lambda(z)$ értékeket az adott szegmensek hőátadási folyamatban betöltött relatív szerepe szerint veszi figyelembe. A célom annak igazolása, hogy a mélységfüggő módszer eredményei nemcsak lokális értelmezésre alkalmasak, hanem a hagyományos TRT-eredményekkel is konzisztens kapcsolatba hozhatók.

A disszertáció másik kiemelt célja a visszatérő ágban kialakuló parazita hőleadási viselkedés mérésalapú azonosítása. Fűtési üzemben a visszatérő ágban áramló hőhordozó közeg ideális esetben hőt vesz fel a környező talajból, ugyanakkor valós üzemi körülmények között a sekélyebb szakaszokon veszteségjellegű hőleadás is kialakulhat. Célom olyan diagnosztikai eljárás kidolgozása, amely a visszatérő ági, többmélységű hőmérsékletadatokból képes meghatározni a parazita hőleadási zóna kiterjedését, az exoterm–endoterm átmeneti mélységet, valamint a jelenség energetikai jelentőségét.

Ennek érdekében a visszatérő ág mentén szegmensenként meghatározott vonalmenti hőáramot időben integrálom, majd az így kapott időintegrált vonalmenti hőmennyiség alapján osztályozom az egyes szegmenseket exoterm, endoterm vagy bizonytalan viselkedésű tartományként. A véletlenszerű előjelváltások és a mérési zaj hatásának csökkentése érdekében célom egy bizonytalanságalapú küszöbölési eljárás alkalmazása, amely figyelembe veszi a hőmérsékletmérés bizonytalanságát, és ezzel reprodukálhatóbbá teszi a szegmensenkénti besorolást. A parazita hőleadási zóna energetikai értelmezéséhez a veszteségjellegű hőleadást átlagos veszteségteljesítményként, forrásoldali hőmérséklet-egyenértékként és becsült COP-hatásként is értékelem.

A kutatás további célja a kidolgozott módszerek megbízhatósági és alkalmazhatósági feltételeinek meghatározása. Ennek keretében vizsgálom a hidraulikai terhelés, a jel–zaj viszony, a furat-termikus ellenállás, a radiális rácsfelbontás, a kiértékelési időablak, a bizonytalansági küszöbskálázás, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatását. Célom annak kijelölése, hogy a javasolt eljárások milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett adnak megbízható, mérnöki szempontból értelmezhető eredményt.

A téma kutatásának hipotézisei

A kutatásomat arra az alapfeltevésre építettem, hogy egy üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszerből, megfelelően kialakított többmélységű mérőrendszer esetén, a hagyományos, teljes furathosszra átlagolt paraméterezésnél részletesebb hőtechnikai információ nyerhető ki. Feltételeztem, hogy a különböző mélységekben rögzített tranziens hőmérséklet-idősorok a folyadékoldali energiamérleggel és megfelelő hővezetési modellel együtt értelmezve alkalmasak a talajszonda mentén kialakuló lokális hőátadási viszonyok számszerűsítésére. Ezt akkor is vizsgálhatónak tartottam, ha a mérési adatok zajt, tranziens üzemi hatásokat és hiányos adatszakaszokat tartalmaznak, illetve,

ha a talajrétegződésre vonatkozó részletes geológiai adatok csak korlátozottan állnak rendelkezésre.

1. hipotézis

Feltételezem, hogy a talajszonda tengelyirányú szegmentálásával, a szegmensenként meghatározott időfüggő vonalmenti hőáram, valamint egy egydimenziós, radiális, tranziens hővezetési modell összekapcsolásával olyan inverz azonosítási eljárás alakítható ki, amely üzem közben mért többmélységű hőmérsékletadatok alapján képes a talaj effektív hővezetési tényezőjének mélységfüggő profilját, $\lambda(z)$-t, előállítani a teljes vizsgált szondahossz mentén.

Feltételezem továbbá, hogy a kapott $\lambda(z)$ profil nem csupán matematikai illesztési eredményként értelmezhető, hanem megfelelő jel–zaj viszony és stabil hidraulikai üzemállapot mellett képes megjeleníteni a furat menti hőtechnikailag eltérő zónákat is. Ennek alapján a többmélységű üzemi hőmérsékletmérés a hagyományos, átlagolt hővezetési tényezőnél részletesebb információt szolgáltathat a talajszonda környezetének hőtechnikai viselkedéséről.

2. hipotézis

Feltételezem, hogy a szegmensenként meghatározott mélységfüggő hővezetési tényezőprofilból olyan energia-súlyozott effektív hővezetési tényező képezhető, amely közvetlenül összehasonlítható a standard Thermal Response Test, azaz TRT-vizsgálat által szolgáltatott effektív hővezetési tényezővel.

Feltételezem, hogy megfelelő üzemállapot-választás, elegendő jel–zaj viszony és megfelelő adatminőség mellett az üzemi mérési adatokon alapuló inverziós módszerrel kapott energia-súlyozott effektív hővezetési tényező a TRT-referenciaértékkel összevethető pontosságú eredményt ad. Valószínűsítem továbbá, hogy a módszer megbízhatóságát elsősorban a hidraulikai terhelés, a mérési zaj, a furat-termikus ellenállás bizonytalansága és a numerikus modellparaméterek megválasztása befolyásolja, ezért ezek hatása érzékenységi vizsgálatokkal feltárható.

3. hipotézis

Feltételezem, hogy a szimpla U-csöves talajszonda visszatérő ágában kialakuló parazita hőleadási viselkedés objektív és reprodukálható módon azonosítható a többmélységű visszatérő ági hőmérsékletadatok alapján. Ennek feltételezésem szerint az az alapja, hogy

a visszatérő ág szegmentálásával, a szegmensenkénti entalpiaváltozásból számított vonalmenti hőáram időintegrálásával meghatározható az egyes szakaszok nettó hőleadó vagy hőfelvevő jellege.

Feltételezem, hogy az időintegrált vonalmenti hőmennyiség alapján az egyes szegmensek exoterm, endoterm vagy bizonytalan viselkedésű tartományként osztályozhatók. Azt is feltételezem, hogy a mérési zajból eredő véletlenszerű előjelváltások hatása mérsékelhető, ha az osztályozás nem kizárólag az előjel alapján történik, hanem a mérési bizonytalanságból levezetett küszöbértéket is figyelembe veszi. Ennek alapján meghatározhatóvá válhat a visszatérő ág mentén az a parazita hőleadási átmeneti mélység, amely a veszteségjellegű hőleadási tartomány és a hasznos hőfelvételi tartomány határát jellemzi.

Feltételezem továbbá, hogy a parazita hőleadási zóna nemcsak lokális hőtechnikai jelenségként, hanem energetikai szempontból is értelmezhető. Ennek megfelelően a szignifikánsan exoterm szegmensekhez tartozó időintegrált hőmennyiségekből átlagos veszteségteljesítmény, forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és becsült COP-hatás képezhető, amelyek a jelenség rendszerszintű következményeit is jellemezhetik.

4. hipotézis

Feltételezem, hogy a parazita hőleadási átmeneti mélység és az ahhoz kapcsolódó energetikai mutatók megbízhatósága nem kizárólag a számítási algoritmustól, hanem az üzemi és adatminőségi feltételektől is függ. Különösen a kiértékelési időablak megválasztása, a kezdeti tranziens szakasz kizárása, a bizonytalansági küszöbskálázás, a mintavételi sűrűség és a hiányzó adatok kezelése befolyásolhatja a kapott eredmények értelmezhetőségét.

Feltételezem, hogy megfelelően megválasztott, stabil üzemi időablak mellett a parazita hőleadási átmeneti mélység robusztusabb indikátorként viselkedik, mint a teljesítményjellegű mutatók. Úgy gondolom, hogy érzékenységi és robusztussági vizsgálatokkal kijelölhetők azok az alkalmazhatósági feltételek, amelyek mellett a módszer üzemi monitoring- és döntéstámogatási célra megbízhatóan használható. Ennek alapján a módszer nemcsak a parazita hőleadási zóna lokalizálására, hanem a kiértékelési eredmények érvényességi tartományának meghatározására is alkalmas lehet.

A fenti hipotézisek igazolásához a disszertációmban terepi mérési adatokon alapuló adatfeldolgozási, inverz modellezési, TRT-összehasonlítási, bizonytalanságalapú osztályozási, valamint robusztussági és érzékenységi vizsgálatokat alkalmazok.

Kutatási módszerek

A kutatásom módszertani alapját a szakirodalmi feldolgozás, a terepi mérési adatgyűjtés, az üzemi hőmérséklet-idősorok előfeldolgozása, a folyadékoldali energiamérlegen alapuló szegmensenkénti kiértékelés, az inverz hővezetési modellezés, valamint a validációs és érzékenységi vizsgálatok alkották. A módszerek célja az volt, hogy az üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszerből származó többmélységű mérési adatokból mérnöki szempontból értelmezhető hőtechnikai és energetikai mutatókat származtassak.

Első lépésként feldolgoztam a talajszondás hőszivattyús rendszerek, a talajszondák, a TRT-vizsgálatok, a mélységfüggő hőmérséklet-monitorozás és az inverz hővezetési modellezés vonatkozó szakirodalmát. A szakirodalmi áttekintés célja a kutatási probléma pontosítása, a meglévő módszerek korlátainak feltárása, valamint a saját mérés- és modellalapú kiértékelési eljárás megalapozása volt. A kutatás mérési alapját egy üzemelő, U-csöves talajszondás hőszivattyús rendszer terepi adatbázisa adta. A vizsgált talajszonda előremenő és visszatérő ágában több mélységben hőmérséklet-idősorok kerültek rögzítésre. A hőmérsékleti adatokat a hidraulikai üzemállapotokkal együtt értékeltem, figyelembe véve a mérőrendszer kalibrálását, a mérési bizonytalanságot, az adatminőséget és az alkalmazott kiértékelési időablakokat. A talajszondát tengelyirányban szegmensekre bontottam, majd a folyadékoldali energiamérleg alapján meghatároztam az egyes szegmensekhez tartozó időfüggő vonalmenti hőáramot. Ezt a mennyiséget használtam fel egyrészt a mélységfüggő hővezetési tényezőprofil meghatározásához, másrészt a visszatérő ágban kialakuló hőleadási és hőfelvételi folyamatok értelmezéséhez.

A talaj effektív hővezetési tényezőjének mélységfüggő meghatározásához egydimenziós, radiális, tranziens hővezetési modellt alkalmaztam. A modell és a mért adatokból származtatott szegmensenkénti hőterhelés összekapcsolásával inverz azonosítási eljárást dolgoztam ki, amelynek eredményeként előállt a talajszonda mentén értelmezhető $\lambda(z)$ profil. A kapott mélységfüggő eredményeket energia-súlyozott effektív hővezetési tényezővé alakítottam, hogy azok közvetlenül összehasonlíthatók legyenek a referencia TRT-vizsgálatból származó értékkel. A módszer megbízhatóságát érzékenységi

vizsgálatokkal ellenőriztem. Vizsgáltam a furat-termikus ellenállás, a radiális rácsfelbontás, a hidraulikai terhelés, a jel–zaj viszony és a mérési bizonytalanság hatását a rekonstruált hővezetési tényezőprofilra. A zajérzékenység értékeléséhez Monte Carlo-alapú vizsgálatot alkalmaztam.

A visszatérő ágban kialakuló parazita hőleadási zóna azonosításához külön diagnosztikai eljárást dolgoztam ki. A visszatérő ági szegmensekhez tartozó vonalmenti hőáramot idő szerint integráltam, majd az időintegrált vonalmenti hőmennyiség alapján az egyes szakaszokat exoterm, endoterm vagy bizonytalan viselkedésű tartományként osztályoztam. A mérési zajból eredő téves előjelváltások csökkentésére bizonytalanságalapú küszöbölést alkalmaztam. Ennek segítségével meghatároztam az exoterm–endoterm átmeneti mélységet, valamint a parazita hőleadás energetikai hatását átlagos veszteségteljesítmény, forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és becsült COP-hatás formájában. Végül robusztussági és alkalmazhatósági vizsgálatokat végeztem annak meghatározására, hogy a kidolgozott módszerek milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett adnak megbízható eredményt. Ennek keretében értékeltem a kiértékelési időablak, a küszöbskálázó tényező, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatását.

1 SZAKIRODALMI HÁTTÉR

1.1 Energia- és klímapolitikai háttér

Az éghajlatváltozás mérséklése, a fenntartható fejlődés előmozdítása és az energiaellátás biztonságának erősítése a 21. század meghatározó globális és európai kihívásai közé tartozik [27,28]. Az energiaszektor, a közlekedés, az ipari folyamatok és az épületek hőellátása jelentős mértékben támaszkodik fosszilis energiahordozókra, amelyek felhasználása hozzájárul az üvegházhatású gázok kibocsátásához és a globális felmelegedés gyorsulásához [27,28]. Ennek következtében az energiafelhasználás csökkentése, az energiahatékonyság növelése és a fosszilis energiahordozók kiváltása nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági, társadalmi, ellátásbiztonsági és műszaki fejlesztési kérdés is [28,29].

Az Európai Unió energia- és klímapolitikája erre a kihívásra átfogó célrendszerrel válaszol [29,30]. Az Európai Zöld Megállapodás központi célja az üvegházhatású gázok kibocsátásának jelentős mérséklése, az energiahatékonyság javítása és a megújuló energiaforrások részarányának növelése [30,31]. Az uniós célkitűzések szerint 2050-re el kell érni a klímasemlegességet, 2030-ra pedig legalább 55%-kal kell csökkenteni a nettó

üvegházhatásúgáz-kibocsátást az 1990-es szinthez képest [31]. E célok teljesítésében kiemelt szerepet kapnak azok a technológiák és szabályozási megoldások, amelyek az energiafogyasztás mérséklését, az energiahatékonyság növelését és a megújuló energiaforrások szélesebb körű hasznosítását támogatják [32–34].

Az épületállomány az egyik legkiemeltebb terület az energiaátmenet szempontjából, mivel az épületek energiaellátása jelentős részt képvisel az Európai Unió teljes energiafogyasztásában [33,35]. Az Európai Bizottság adatai szerint az uniós energiafogyasztás megközelítőleg 40%-a az épületekhez kapcsolódik, miközben az épületállomány a földgázfelhasználásban is számottevő szerepet játszik [33,34]. A lakóépületek energiafelhasználásának meghatározó része fűtésre, hűtésre és használati melegvíz-előállításra fordítódik, ezért az épületgépészeti hőellátó rendszerek korszerűsítése az épületenergetikai átmenet egyik központi műszaki feladatának tekinthető [36,37].

Az épületgépészeti rendszerek dekarbonizációja alapvetően két, egymással összefüggő irányra épül. Az első az épületek hőigényének csökkentése, amely az épületszerkezetek hőtechnikai korszerűsítésével, a nyílászárók cseréjével, a légzárás javításával, hővisszanyerős szellőztetéssel, hidraulikai beszabályozással és intelligens szabályozási rendszerek alkalmazásával érhető el [33,34] [ZV3]. A második irány a hőellátás karbonintenzitásának mérséklése, amely a földgázra vagy más fosszilis energiahordozókra épülő hőtermelés részleges vagy teljes kiváltását célozza meg [37,38]. Ebben fontos szerepet kaphatnak a megújuló energiaforrások, a környezeti hő, a hulladékhő, valamint az alacsony karbonintenzitású villamos energiával működtetett technológiák [37–39].

A megújuló energiaforrások közül a geotermikus energia különösen kedvező tulajdonságokkal rendelkezik, mivel helyben rendelkezésre áll, viszonylag stabil hőforrást biztosít, és kevésbé függ az időjárási ingadozásoktól [40–42]. A sekélygeotermikus energiát hasznosító talajszondás hőszivattyús rendszerek a felszín alatti talajt hőforrásként, illetve hőnyelőként alkalmazzák [40–42] [ZV4]. A primer oldali hőmérséklet stabilitása csökkentheti a hőszivattyú által áthidalandó hőmérséklet-különbséget, ami javíthatja a COP-értéket és az éves rendszerhatásfokot [42] [ZV2, ZV3]. Magyarország esetében a hőszivattyús és geotermikus rendszerek alkalmazása különösen indokolt, mivel a frissített Nemzeti Energia- és Klímaterv az épületek hőigényének

csökkentése mellett a tiszta villamos energiával működtetett hőszivattyúk alkalmazását is fontos beavatkozási irányként jelöli meg [41].

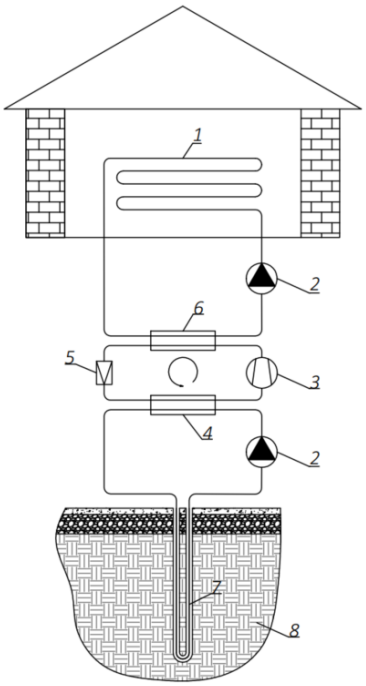
A talajszondás hőszivattyús rendszerek teljesítménye ugyanakkor számos egymással összefüggő tényezőtől függ [43–45] [ZV2]. Meghatározó szerepe van többek között a talaj hővezetési tényezőjének, térfogati hőkapacitásának, a furat hőellenállásának, a tömedékelő anyag minőségének, a talajrétegződésnek, a talajvízmozgásnak, a szondageometriának, a térfogatáramnak, valamint a fűtési és hűtési terhelések időbeli lefutásának [43–46] [ZV2]. A mérnöki gyakorlatban alkalmazott egyszerűsített modellek és átlagolt paraméterek hasznosak lehetnek előzetes méretezésre és rendszerszintű összehasonlításra, ugyanakkor nem minden esetben képesek feltárni a mélységfüggő, rétegzett és időben változó hőtechnikai jelenségeket [45,47,48] [ZV2].

1.2 Talajszondás hőszivattyús rendszerek szerepe és működési alapjaik

A hőszivattyús rendszerek a korszerű, energiahatékony épületgépészeti technológiák meghatározó elemei, mivel képesek alacsony hőmérsékletszintű környezeti hőforrásokból hőt kinyerni, majd azt magasabb hőmérsékletszintre emelve fűtési, használati melegvíz-termelési vagy technológiai célokra hasznosítani [49,50]. A hőforrás jellege alapján megkülönböztethetők többek között levegő-, víz- és talajhő-hasznosító rendszerek [44,50,51]. Ezek közül a talajszondás hőszivattyús rendszerek különös jelentőséggel bírnak, mivel a talaj hőmérséklete a felszín alatti mélységekben a külső levegőhöz képest kisebb időbeli ingadozást mutat, ezáltal kedvezőbb és stabilabb hőforrási feltételeket biztosíthat [44,51].

A talajszondás hőszivattyús rendszerek működése alapvetően két egymással kapcsolódó hőtechnikai részfolyamatra bontható. Az első a talaj és a furathőcserélő közötti hőátadás, amely során a primer kör hőhordozó közege hőt vesz fel a talajból fűtési üzemben, illetve hőt ad le a talaj irányába hűtési üzemben [44,51–53]. A második részfolyamat a kompresszoros hőszivattyús körfolyamat, amely a primer oldalon rendelkezésre álló alacsonyabb hőmérsékletszintű hőt a szekunder, vagyis az épület fűtési rendszere számára hasznosítható hőmérsékletszintre emeli [49,50,54]. A kompresszoros hőszivattyú zárt termodinamikai körfolyamatként működik, amelynek fő szerkezeti elemei az elpárologtató, a kompresszor, a kondenzátor és a fojtószelep [54,55]. Az elpárologtatóban a hűtőközeg hőt vesz fel az alacsony hőmérsékletű primer oldali hőforrásból, miközben elpárolog. Ezt követően a kompresszor a hűtőközeg nyomását és hőmérsékletét

megnöveli. A kondenzátorban a magasabb hőmérsékletű hűtőközeg hőt ad le a fűtési rendszer irányába, majd a fojtószelepen keresztül nyomása és hőmérséklete lecsökken, és a körfolyamat ismételten az elpárologtatóban folytatódik [54,55]. A talajszondás hőszivattyús rendszer fő alrendszereit és energiaáramait a 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Talajszondás hőszivattyús rendszer fő alrendszerei, saját szerkesztés [ZV3]

A talajszondás rendszerek energiaforrása a sekély földtani környezet hőtároló képességéhez kapcsolódik. A talaj hőmérsékleti viszonyait a felszín közeli tartományban elsősorban a szezonális hőmérséklet-ingadozás, a napsugárzásból származó hőtárolás, a talaj nedvességtartalma, a talajrétegek hővezetési tulajdonságai, valamint a mélyebb rétegekből származó geotermikus hőáram együttesen határozzák meg [44,51–53]. Nagyobb mélységben a külső meteorológiai hatások csillapodnak, ezért a talaj hőmérséklete időben kiegyenlítettebbé válik [44,51]. Ez a hőmérsékleti stabilitás az egyik legfontosabb előnye a talajszondás hőszivattyús rendszereknek a levegős hőszivattyúkkal szemben [44,50,51].

A technológia fejlődésében jelentős szerepet játszottak a kompresszorok, hőcserélők, szabályozási rendszerek és hőhordozó közegek fejlesztései [54,55]. Az 1970-es évek olajválságai, valamint az energiaellátási és energiahatékonysági szempontok erősödése jelentős szerepet játszottak a hőszivattyús technológiák iránti érdeklődés növekedésében, különösen azokban az országokban, ahol a hőszivattyúkat az energiahatékonyság és az ellátásbiztonság javításának eszközeként támogatták [56,57]. A korszerű kompresszorok,

a fejlettebb hőcserélő-kialakítások és az optimalizált szabályozási stratégiák [58] révén a talajszondás hőszivattyús rendszerek ma már nemcsak családi házak, hanem nagyobb épületek, intézmények és ipari létesítmények energiaellátásában is alkalmazhatók [44,51,54,59].

A hőszivattyús rendszer energetikai hatékonyságát leggyakrabban a teljesítménytényezővel, vagyis a COP-értékkel jellemzik [60]. Fűtési üzemben a COP a hasznosított fűtési hőteljesítmény és a működtetéshez szükséges villamos teljesítmény hányadosaként értelmezhető:

$$COP = \frac{Q_{leadott}}{P_{felvett}} \tag{1}$$

A kompresszor a hőszivattyús körfolyamat egyik legfontosabb eleme, mivel közvetlenül meghatározza a hűtőközeg tömegáramát, a nyomásviszonyt, a szükséges villamos teljesítményt és az elérhető hőmérsékletszintet [54]. Modellezési szempontból a kompresszor különböző részletezettséggel írható le. A feketedoboz-modellek elsősorban a mért vagy gyártói adatok alapján a bemeneti és kimeneti jellemzők kapcsolatát írják le, míg a fehérdoboz-modellek a tömeg-, energia- és impulzusmérlegeken, valamint a hűtőközeg termodinamikai állapotváltozásain alapulnak [55]. A részletesebb fizikai modellek lehetőséget adnak arra, hogy a kompresszor működését ne csak üzemi pontok alapján, hanem a körfolyamat egészével összefüggésben lehessen vizsgálni [55].

A kompresszortípus megválasztása szintén érdemi hatással lehet a hőszivattyús rendszer energetikai teljesítményére [54]. A scroll és dugattyús kompresszorral működő rendszerek összehasonlító vizsgálat alapján azonos peremfeltételek mellett a scroll kompresszorral üzemelő rendszer COP-értékei 11,27–31,66%-kal magasabbnak adódtak, mint a dugattyús kompresszorral működő rendszer esetében [ZV5]. Ugyanezen vizsgálatban a dugattyús kompresszor villamos teljesítményfelvétele 7,11–35,25%-kal nagyobb volt a scroll kompresszorhoz képest [ZV5]. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a kompresszor típusa, üzemi tartománya és hatásfoka jelentős mértékben befolyásolhatja a hőszivattyús rendszer energiafelhasználását [ZV5]. Nagyobb hőmérséklet-emelési igény vagy kedvezőtlenebb forrásoldali hőmérsékletszint esetén a kétfokozatú kompressziós hőszivattyús kialakítás is releváns műszaki megoldás lehet, mivel a kompressziós munka és a nyomásviszony megosztása kedvezően befolyásolhatja a körfolyamat energetikai viselkedését [ZV6].

A COP változása azonban nem kizárólag a kompresszor jellemzőiből vezethető le. A primer és szekunder oldali hőmérsékletszintek alapvetően meghatározzák a hőszivattyús körfolyamat termodinamikai feltételeit [49,61,62]. Minél alacsonyabb az elpárologtatási hőmérséklet, illetve minél magasabb a kondenzációs hőmérséklet, annál nagyobb nyomásviszonyt kell a kompresszornak biztosítania [55,62]. Ez növeli a kompressziós munkát, és általában a COP csökkenéséhez vezet [55,61,62]. Ebből következik, hogy a hőforrás oldali hőmérsékleti viszonyok javítása, valamint a hőleadó rendszer alacsonyabb előremenő hőmérsékleten történő üzemeltetése kedvezően befolyásolhatja a rendszer hatásfokát [49,61,62].

Talajszondás hőszivattyús rendszerek esetében ezért a hőszivattyú és a talajszonda működése nem értelmezhető egymástól függetlenül [44,51]. A talajszonda hőtechnikai viselkedése közvetlenül meghatározza a primer oldali előremenő és visszatérő hőmérsékleteket, ezáltal befolyásolja az elpárologtató hőmérsékleti feltételeit, a kompresszor nyomásviszonyát, villamos teljesítményfelvételét és végső soron a teljes rendszer COP-értékét [44,51–53,63]. Ha a talajszonda környezetében kedvezőtlen hőtechnikai jelenségek, például lokális lehűlés, hőtorlódás, nem megfelelő regeneráció vagy hosszú távú hőmérséklet-eltolódás jelentkeznek, azok a forrásoldali hőmérséklet romlásán keresztül a hőszivattyú teljes energetikai teljesítményére hatással lehetnek [52,53,63].

A talajszondás hőszivattyús rendszerek valós üzemi viselkedése tehát nem vezethető vissza egyetlen komponens működésére, hanem a talaj, a talajszonda, a primer kör, a hőszivattyús körfolyamat és a szekunder oldali hőleadás kölcsönhatásaként értelmezhető [44,51–53]. Ez indokolja egy olyan rendszerelméleti megközelítés alkalmazását, amely a hőszivattyús rendszert bemeneti és kimeneti mennyiségek, valamint az ezek közötti kapcsolatok alapján írja le [44,54,55].

1.3 Rendszerelméleti input–output szemlélet hőszivattyús rendszereknél

A talajszondás hőszivattyús rendszerek működése egymással szoros kölcsönhatásban álló hőtechnikai, hidraulikai és termodinamikai folyamatok eredményeként írható le [64,65]. A rendszerben az energiaáramlás a hőforrás oldaláról indul, a hőszivattyús körfolyamaton keresztül magasabb hőmérsékletszintre kerül, majd a fogyasztói oldalon hasznosul. A rendszerelméleti megközelítés előnye, hogy a komplex fizikai folyamatokat bemeneti és

kimeneti mennyiségek, valamint az ezek közötti kapcsolatok alapján teszi értelmezhetővé [55]. Ez olyan üzemelő rendszerek esetében fontos, ahol a cél nem elsősorban a rendszer geometriai vagy létesítési paramétereinek meghatározása, hanem a működés elemzése, értékelése és optimalizálása. A hőszivattyús rendszerek rendszerszintű vizsgálata során három fő áramlási kör különíthető el [55,64] [ZV7]:

- Primer kör: A hőforrás és az elpárologtató közötti kapcsolatot biztosítja. Talajszondás rendszerek esetében ez a kör a talajszondán keresztül létesít kapcsolatot a talajjal, és a hőhordozó közeg segítségével szállítja a talajból kinyert hőt a hőszivattyú felé.
- Hűtőközeg ciklus: A rendszer központi energiaátalakító egysége. A zárt körfolyamatban áramló hűtőközeg az elpárologtatóban hőt vesz fel a primer oldaltól, a kompresszorban magasabb nyomás- és hőmérsékletszintre kerül, majd a kondenzátorban hőt ad le a szekunder oldal felé. A fojtószelep ezt követően csökkenti a hűtőközeg nyomását, ezáltal biztosítva a körfolyamat ismétlődésének feltételeit.
- Szekunder kör: A hőszivattyú által előállított hasznos hőenergia elosztását végzi a fogyasztói oldalon. Ennek kialakítása jelentős hatást gyakorol a rendszer energiahatékonyságára, mivel a szükséges előremenő hőmérséklet közvetlenül befolyásolja a kondenzációs hőmérsékletet, ezáltal pedig a kompresszor munkáját és a hőszivattyú COP-értékét.

A hőszivattyús rendszerek matematikai modellezésére alapvetően fehérdoboz-, feketedoboz- és szürkedoboz-modellek alkalmazhatók. A fehérdoboz-modellek fizikai alapú megközelítést képviselnek, vagyis a rendszer működését a tömeg-, energia- és impulzusmérlegek, valamint a termodinamikai összefüggések alapján írják le. A feketedoboz-modellek ezzel szemben elsősorban mérési adatok alapján, a bemeneti és kimeneti változók közötti empirikus kapcsolatokat azonosítják, anélkül, hogy a belső fizikai folyamatokat részletesen leírnák. A szürkedoboz-modellek a két megközelítés előnyeit ötvözik. A fizikai törvényszerűségeket adatvezérelt vagy azonosított részmodellekkel egészítik ki. Az input–output modellezés rendszerszintű alapjait és kapcsolódó terminológiáját többek között Zadeh és Polak is tárgyalja [66].

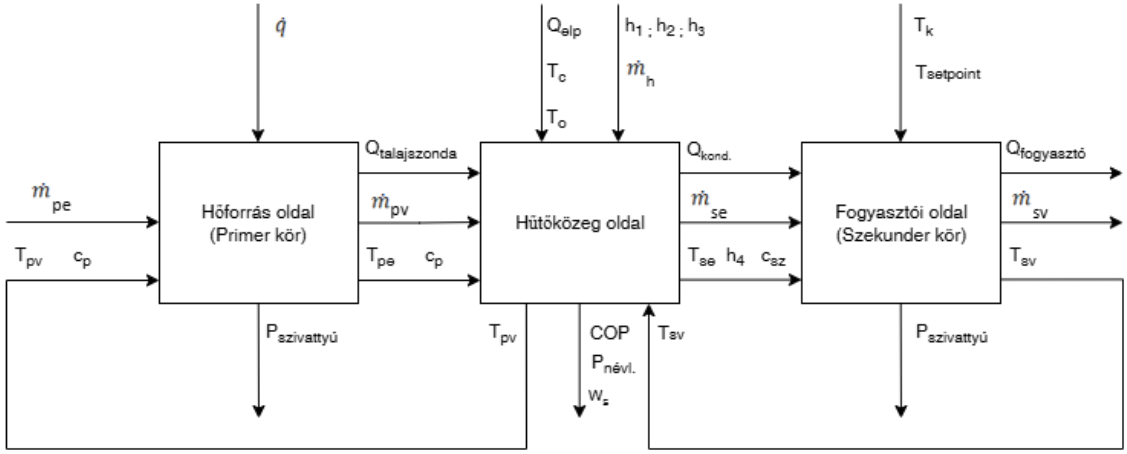
A talajszondás hőszivattyús rendszerek anyag- és energiaáramainak összefüggései fehérdoboz-modell alkalmazásával írhatók le [67] [ZV3]. Az ilyen típusú modell célja

nem feltétlenül egy új rendszer tervezési méretezése, hanem egy meglévő, üzemelő rendszer működésének energetikai elemzése, valamint az üzemeltetés optimalizálásának megalapozása [68] [ZV3]. Ennek megfelelően a talajszonda geometriai jellemzői, a telepítési mélység, a furatkiosztás és a rendszer fő szerkezeti adottságai adott paraméterként vehetők figyelembe [ZV3]. A vizsgálatok középpontjába azok az üzemi változók helyezhetők, amelyek a rendszer működése során mérhetők, befolyásolhatók, illetve szabályozási szempontból felhasználhatók. [ZV3]

A fehérdoboz-modell alapját komponensenként felírt transzformációs összefüggések képezik. [ZV3] Ezek az egyenletek azt írják le, hogy az adott komponens bemeneti változóiból, a rendszerparaméterekből és az esetleges döntési változókból milyen kimeneti mennyiségek határozhatók meg. [ZV3] A primer oldalon ilyen összefüggésekkel kapcsolható össze például a talajszondába belépő és onnan kilépő hőhordozó hőmérséklete, a térfogatáram, valamint a talajból kinyert hőteljesítmény [ZV3]. A hőszivattyús körfolyamat esetében a bemeneti hőmérsékleti feltételek, a kompresszor teljesítményfelvétele és a kondenzátor oldali hőleadás közötti kapcsolat határozható meg. A szekunder oldalon pedig a fogyasztói hőigény, a térfogatáram, valamint az előremenő és visszatérő hőmérsékletek közötti összefüggések írják le a rendszer működését [ZV3].

Meglévő rendszerek esetében a modell döntési változói elsősorban az üzemeltetéshez és a szabályozáshoz kapcsolhatók [ZV3]. Ilyen változóként értelmezhető például a keringtető szivattyúk üzemi állapota, a térfogatáram, az előremenő hőmérséklet beállítása, a hőszivattyú kapcsolási logikája vagy az üzemmód megválasztása. Új rendszerek tervezésekor ezzel szemben a talajszonda kialakításával összefüggő paraméterek, például a furathossz, a furatszám, a szondakiosztás vagy a csőgeometria is döntési változóként kezelhetők. Üzemelő rendszerek esetében azonban a hangsúly jellemzően a mérési adatokon alapuló vizsgálaton, az energetikai teljesítmény értékelésén és az üzemeltetési stratégia fejlesztésén van [ZV3]. Egy üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszer optimalizálásának alapfeltétele, hogy a rendszer működését meghatározó bemeneti és kimeneti változók, valamint az ezek közötti kapcsolatok egyértelműen azonosíthatók legyenek. Ennek érdekében különösen fontos az input–output szemlélet alkalmazása, mivel ez lehetővé teszi annak feltárását, hogy mely üzemi paraméterek befolyásolják közvetlenül vagy közvetetten a rendszer energetikai teljesítményét [66] [ZV3].

A rendszerelméleti input–output szemlélet alkalmas arra, hogy a talajszondás hőszivattyús rendszer a hőforrástól a fogyasztói oldalig egységes energetikai rendszerként legyen értelmezhető [66]. A 2. ábra egy üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszer input–output szemléletű fehérdoboz-modelljét szemlélteti, kiemelve a fő alrendszerek közötti anyag- és energiaáramokat, valamint a bemeneti és kimeneti változók szerepét [ZV3].



2. ábra: Üzemben lévő talajszondás hőszivattyús rendszer input–output szemléletű fehérdoboz-modellje, saját szerkesztés [ZV3]

1.4 A talajszondás hőszivattyús rendszerek modellezési lehetőségei

A talajszondás hőszivattyús rendszerek vizsgálatában a modellezés központi szerepet tölt be, mivel a rendszer energetikai teljesítményét nem csupán a hőszivattyú berendezés jellemzői, hanem a talaj, a furatkitöltő anyag, a csőfal és a hőhordozó közeg közötti összetett hőátadási folyamatok is meghatározzák [44,53,65,69,70]. A talajszonda hőtechnikai viselkedése ezért közvetlenül befolyásolja a hőszivattyú elpárologtatási hőmérsékletét, a kompresszor munkáját és a rendszer teljesítménytényezőjét [44,69].

A modellezés alapvető célja a hőhordozó közeg hőmérséklet-változásának, a kinyerhető vagy leadható hőteljesítménynek, valamint a furat és a környező talaj hőtechnikai ellenállásainak meghatározása [65,70]. A talajszonda környezetében kialakuló hőáram a furat és a földtani közeg közötti hőmérséklet-különbség következménye. A hő a talajon, a furatkitöltő anyagon, a csőfalon, végül pedig a csőben áramló hőhordozó közeg konvektív hőátadásán keresztül jut el a folyadékig [69,70]. Ennek mérnöki leírásában kiemelt szerepe van a furat termikus ellenállásának, amely a hőhordozó közeg és a furatfal közötti hőmérséklet-különbséget kapcsolja össze az egységnyi furathosszra vonatkoztatott hőárammal [70].

A szakirodalomban a talajszondák működésének leírására több, egymástól eltérő részletezettségű modellcsalád alakult ki [44,65]. Ezek közös kiindulópontja a hővezetés és hőátadás törvényszerűségeinek alkalmazása, ugyanakkor jelentősen különböznek abban, hogy milyen geometriai egyszerűsítéseket, peremfeltételeket, talaj- és furatparamétereket, illetve számítási időléptéket vesznek figyelembe. A modellezési megközelítések ezért nem egymás kizárólagos alternatívái, hanem eltérő mérnöki és kutatási célokra alkalmazható eszközök [65].

A talajszonda-modellek pontosságát nagymértékben meghatározza a rendelkezésre álló bemeneti adatok minősége. Ilyen adatok többek között a talaj hővezetési tényezője, térfogati hőkapacitása, a furatátmérő, a csőgeometria, a csövek közötti távolság, a furatkitöltő anyag hővezetési tényezője, valamint a hőhordozó közeg áramlási viszonyai [53,69,70]. A részletesebb modellek nagyobb pontosságot biztosíthatnak, ugyanakkor több bemeneti adatot, nagyobb számítási kapacitást és gondosabb validálást igényelnek. Ezzel szemben az egyszerűbb modellek gyorsabb számítást tesznek lehetővé, de csak korlátozottan képesek leírni a valós rendszer térbeli és időbeli összetettségét [65].

1.4.1 Analitikus modellek

Az analitikus modellek a talajszonda hőtechnikai viselkedését egyszerűsített geometriai és fizikai feltételezések mellett, zárt alakú vagy félig explicit összefüggésekkel írják le [71–73]. Előnyük, hogy viszonylag kis számítási igénnyel alkalmazhatók, ezért különösen hasznosak előzetes méretezési feladatokban, paraméterérzékenységi vizsgálatokban, valamint Thermal Response Test eredmények kiértékelésében [47,74]. Segítségükkel gyorsan vizsgálható például a talaj hővezetési tényezőjének, a furat termikus ellenállásának vagy a hőterhelés időtartamának hatása a kialakuló hőmérséklet-válaszra [47,75].

Az analitikus modellek klasszikus alapját a végtelen hosszúságú vonalforrás-modell, más néven Kelvin-féle vonalforrás-közelítés adja [71,72]. Ez a modell a furatot végtelen hosszú hőforrásként vagy hőnyelőként értelmezi homogén, végtelen kiterjedésű közegben. A modell legnagyobb előnye az egyszerűsége és számítási gyorsasága, ugyanakkor több jelentős idealizálással él. A furat valós geometriáját, a csőfal és a hőhordozó közeg hőkapacitását, valamint a furat tengelyirányú hővezetését jellemzően elhanyagolja [47,71].

A hengerforrás-modell a vonalforrás-modellnél részletesebb megközelítést képvisel, mivel a furatot végtelen hosszúságú hengerként veszi figyelembe, amelynek felületén hőáram lép be vagy ki a talajba [47,72]. Ez a modell pontosabban kezeli a furat sugárirányú méretét, ugyanakkor továbbra is homogén talajt, egyszerűsített geometriát és idealizált peremfeltételeket feltételez. Emiatt elsősorban olyan esetekben alkalmazható hatékonyan, amikor a furat körüli sugárirányú hőterjedés közelítő leírása elegendő [47].

A véges vonalforrás-modell az analitikus modellek fejlettebb változatának tekinthető, mivel figyelembe veszi a furat véges hosszából adódó véghatásokat [73,74]. Ez különösen hosszabb időtávú vizsgálatoknál fontos, amikor a furat alsó és felső végének hatása már nem hanyagolható el. Eskilson munkája meghatározó szerepet játszott a véges vonalforrás-közelítések és a későbbi response-factor modellek kialakulásában [73].

Az analitikus modellek közé sorolhatók azok az állandósult állapotú furatellenállás-modellek is, amelyek a furat termikus ellenállásának meghatározására szolgálnak [75–77]. Ilyen például az ekvivalens átmérő módszere, a kísérleti és numerikus eredményekből származtatott alakfaktor-alapú megközelítés, valamint a multipólus módszer. Ezek a módszerek a furaton belüli hőátadási folyamatokat, a csőelrendezést és a furatkitöltő anyag hatását különböző részletességgel veszik figyelembe.

Az analitikus modellek fő korlátja, hogy a számíthatóság érdekében általában homogén talajt, állandó vagy egyszerűsített hőáramot, idealizált geometriát és korlátozott peremfeltételeket feltételeznek [47,65]. Emiatt önmagukban csak korlátozottan alkalmasak rétegzett talaj, talajvízáramlás, összetett furatmező-geometria vagy gyorsan változó üzemi terhelések részletes leírására [53,65]. Mérnöki szempontból azonban továbbra is nélkülözhetetlenek, mivel átlátható kapcsolatot teremtenek a fő hőtechnikai paraméterek és a mért vagy számított hőmérséklet-válasz között.

1.4.2 Numerikus modellek

A numerikus modellek akkor kerülnek előtérbe, amikor a vizsgált rendszer geometriája, anyagi összetétele, peremfeltételei vagy időfüggő terhelései az analitikus megoldásokkal már nem kezelhetők megfelelő pontossággal [65,78,79]. A numerikus módszerek a hővezetési, hőátadási és adott esetben áramlási egyenleteket térben és időben diszkretizálják, majd közelítő megoldást adnak a hőmérsékletmező, a hőáram és a folyadékáramlás változásaira [78–80]. Előnyük a részletesség és rugalmasság, hátrányuk

viszont a nagyobb számítási igény, a modellalkotási bizonytalanság, valamint a bemeneti adatok iránti fokozott érzékenység.

A véges differencia módszer a hővezetési problémák egyik legegyszerűbb numerikus megközelítése [80,81]. A módszer a vizsgált tér- és időtartományt rácsra bontja, majd a differenciálegyenletek deriváltjait különbségi hányadosokkal közelíti:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \tag{3}$$

Ha ezeket behelyettesítjük a hővezetési egyenletbe, a véges differencia egyenletet kapjuk:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \tag{4}$$

ahol T_i^{n+1} az i-edik rácspont hőmérséklete az n-edik időszinten, α a hődiffuzivitás, Δt az időlépés, míg Δx a térbeli rácstávolság. Az explicit módszer numerikus stabilitása érdekében az időlépést úgy kell megválasztani, hogy teljesüljön a Fourier-számra vonatkozó stabilitási feltétel:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \tag{5}$$

Ez a feltétel biztosítja, hogy a számítás során a hőmérsékleti mező ne váljon numerikusan instabillá, vagyis az időléptetés ne eredményezzen fizikailag irreális oszcillációkat vagy divergáló megoldást. A módszer jól alkalmazható egyszerűbb geometriák, valamint időben változó hőterhelések vizsgálatára, különösen akkor, ha a cél nem a teljes háromdimenziós geometria részletes leírása, hanem a tranziens hőmérsékletválasz közelítő meghatározása. A számítás pontosságát ugyanakkor jelentősen befolyásolja a térbeli rácsfelbontás, az időlépés megválasztása, valamint a stabilitási feltétel teljesülése.

Véges elem - FEM

A véges elem módszer a talajszondás rendszerek részletesebb vizsgálatára alkalmas, mivel bonyolultabb geometriák, eltérő anyagtulajdonságú rétegek és összetettebb peremfeltételek kezelését is lehetővé teszi [82–85]. Al-Khoury és munkatársai

háromdimenziós véges elem megfogalmazást dolgoztak ki egyszeres és kettős U-csöves talajszondák modellezésére, amely állandósult hőáramok vizsgálatára és tranziens számításokra is alkalmazható [82,83]. A véges elem modellek előnye, hogy a furat, a furatkitöltő anyag, a csőfal és a környező talaj kölcsönhatásai részletesen ábrázolhatók [84,85]. Alkalmazásukhoz azonban pontos geometriai, rétegtani, hőtechnikai és üzemi adatok szükségesek.

Véges térfogat - FVM

A véges térfogat módszer elsősorban akkor előnyös, ha a hővezetés mellett az áramlási és anyagtranszport-folyamatok leírása is fontos [86,87]. A módszer a vizsgált tartományt kontrolltérfogatokra bontja, és a megmaradási törvényeket ezekre a térfogatokra írja fel [86]. Emiatt jól illeszkedik a CFD-alapú szimulációkhoz, valamint azokhoz a feladatokhoz, ahol a hőhordozó közeg áramlási viszonyai, a turbulens hőátadás vagy a talajvízmozgás hatása is szerepet kap [86–89]. A véges térfogat módszer különösen alkalmas lehet a hőhordozó közeg és a csőfal közötti konvektív hőátadás részletes vizsgálatára, ugyanakkor mérnöki alkalmazását gyakran a nagy számítási kapacitásigény és a validálható bemeneti adatok hiánya korlátozza [87–90].

A numerikus modellek fontos előnye, hogy alkalmasak lehetnek a valós üzemi körülmények részletesebb leképezésére. Segítségükkel vizsgálható a talajrétegek eltérő hővezetési tényezője, a furatmezőn belüli kölcsönhatás, a talajvízáramlás hatása, valamint a hőterhelés időbeli változása [87,90,91]. Ugyanakkor a nagy részletesség nem feltétlenül jelent automatikusan nagyobb megbízhatóságot. A numerikus modell eredményeinek értelmezéséhez minden esetben szükséges a modell validálása mérési adatokkal, valamint a bemeneti paraméterek bizonytalanságának figyelembevétele.

1.4.3 Válaszfüggvény és hibrid modellek

Az analitikus és numerikus modellek között átmenetet képeznek a válaszfüggvény, illetve hibrid modellek. Ezek a módszerek előre meghatározott válaszfüggvényeket alkalmaznak a hőáram és a hőmérsékletválasz kapcsolatának leírására [73,92–94]. A legismertebb ilyen megközelítés a g-függvény alapú modellezés, amelyet Eskilson vezetett be a furatmezők hosszú távú hőtechnikai vizsgálatára [73]. A g-függvény dimenziótlan formában fejezi ki, hogy adott furatgeometria, furattávolság és időskála mellett milyen hőmérsékletválasz várható a talajban:

$$T_{bw} - T_g = \frac{q}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}, \frac{D}{H}\right) \quad (6)$$

A válaszfüggvény modellek gyakorlati előnye, hogy kedvező kompromisszumot teremtenek a számítási sebesség és a furatmező-szintű pontosság között. Ezért széles körben alkalmazhatók éves energiaszimulációkban és tervezőszoftverekben, ahol a terhelési profilok hosszú időtartamú hatását kell figyelembe venni [92–95]. A módszer lehetővé teszi, hogy a furatmező hőtechnikai viselkedése ne minden időlépésben részletes térbeli numerikus számítással, hanem előre meghatározott válaszfüggvények segítségével legyen figyelembe vehető.

A hibrid modellek az analitikus, numerikus és adatvezérelt megközelítések előnyeit kapcsolják össze. Yavuzturk és Spitler rövid időlépésű válaszfüggvény-modellje például egy tranziens, kétdimenziós implicit véges térfogatú modellre építve hozott létre rövid időlépésű hőmérsékleti válaszfüggvényeket vertikális talajhőcserélők energetikai szimulációjához [92]. Az ilyen modellek különösen hasznosak lehetnek akkor, ha a cél a hosszú távú üzem gyors szimulációja, ugyanakkor szükséges a furatmező dinamikus hőmérsékletválaszának közelítő figyelembevétele is.

A válaszfüggvény és hibrid modellek korlátja, hogy a válaszfüggvények jellemzően előre definiált furatmező-elrendezésekre, idealizált talajviszonyokra és meghatározott peremfeltételekre vonatkoznak [73,93]. Emiatt a helyi rétegzettség, a talajvízáramlás, a nem homogén furatkitöltés vagy az egyes furatok eltérő üzemi állapota csak korlátozottan jeleníthető meg bennük. Ennek ellenére ezek a modellek a gyakorlati tervezésben és hosszú távú energetikai elemzésekben kiemelt szerepet töltenek be, mivel a teljes éves vagy többéves üzem hatása viszonylag kis számítási igénnyel értékelhető.

A talajszondás hőszivattyús rendszerek modellezésében alkalmazott módszer kiválasztását minden esetben a vizsgálat célja, a rendelkezésre álló bemeneti adatok részletessége, valamint az elvárt pontosság határozza meg. Előzetes méretezési feladatokhoz, paraméterérzékenységi vizsgálatokhoz és Thermal Response Test eredmények kiértékeléséhez az analitikus modellek általában megfelelőek, mivel gyorsan számíthatók, és jól értelmezhető kapcsolatot teremtenek a fő hőtechnikai paraméterek és a kialakuló hőmérséklet-válasz között [93]. Részletes furatgeometria, rétegzett talaj, talajvízáramlás, lokális hőtechnikai jelenségek vagy összetett peremfeltételek vizsgálata esetén ugyanakkor numerikus modellek alkalmazása válik indokolttá. Éves

energiaszimulációkhoz, hosszú távú üzemértékeléshez és furatmező-szintű teljesítménybecsléshez a válaszfüggvény, illetve hibrid modellek kínálnak kedvező kompromisszumot a számítási sebesség és a mérnöki pontosság között [93–96].

A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítható, hogy a talajszondás rendszerek vizsgálatára nem határozható meg univerzálisan legjobb modell. A modell részletességének növelése önmagában nem garantálja a számítási eredmények nagyobb megbízhatóságát, különösen akkor, ha a szükséges bemeneti adatok bizonytalanok, vagy csak becsléssel állnak rendelkezésre. A modellezés minőségét ezért nem kizárólag a választott matematikai módszer határozza meg, hanem a mérési adatok megbízhatósága, a helyi talajparaméterek ismerete, a hidraulikai viszonyok pontos leírása, valamint az üzemi terhelési adatok időbeli felbontása és pontossága is. Bemeneti adathiány esetén a túlzottan részletes modellek hamis pontosságérzetet kelthetnek, ezért a modellválasztás során mindig mérlegelni kell a vizsgálati cél, az adatellátottság és a modell bonyolultsága közötti összhangot. Az egyes modellezési megközelítések főbb alkalmazási területeit, előnyeit és korlátait az 1. táblázat foglalja össze.

1. Táblázat: A talajszondás hőszivattyús rendszerek modellezési megközelítéseinek összehasonlítása

Megközelítés	Jellemző módszerek	Tipikus alkalmazás	Előny	Korlát
Analitikus modellek	Vonalforrás, hengerforrás, véges vonalforrás, állandósult furatellenállás-modellek	Előzetes méretezés, TRT-kiértékelés, paraméterérzékenység	Gyors számítás, átlátható fizikai összefüggések	Erős egyszerűsítések: homogén talaj, idealizált geometria, állandó hőáram
Numerikus véges differencia modellek	Explicit/implicit FDM, radiális vagy axiális-radiális rács	Tranziens hővezetés, időfüggő terhelések, egyszerűbb geometriák	Jó számítási hatékonyság, viszonylag egyszerű implementáció	Stabilitási feltételek, rácsfüggés, korlátozott geometriai rugalmasság
Numerikus véges elem modellek	2D/3D FEM, kapcsolt hő- és talajvízáramlási modellek	Részletes furat- és talajmodell, rétegzettség, komplex peremfeltételek	Nagy geometriai rugalmasság, részletes lokális vizsgálat	Nagy számítási igény, pontos bemeneti adatok és modellezési tapasztalat szükséges

Numerikus véges térfogat modellek	FVM/CFD alapú hő- és áramlástani szimulációk	Áramlási, konvektív hőátadási és anyagtranszport-folyamatok vizsgálata	Megmaradási törvények közvetlen kezelése, összetett áramlási jelenségek	Nagy számítási és validálási igény, érzékeny peremfeltételek
Válaszfüggvény / hibrid modellek	g-függvények, előre számított válaszfüggvények, éves szimulációs modellek	Furatmezők és hosszú távú üzem szimulációja	Gyors éves számítás, tervezőszoftverekben jól alkalmazható	Előre definiált geometriákra és idealizált feltételekre korlátozott pontosság

A táblázat alapján megállapítható, hogy a különböző modellezési eljárások nem egymást kizáró alternatívák, hanem eltérő részletességű és eltérő célokra alkalmas eszközök. A gyakorlati mérnöki és kutatási feladatokban gyakran indokolt több modellalkotási szint együttes alkalmazása.

1.5 Thermal Response Test vizsgálatok és klasszikus paraméterazonosítás

A talajszondás hőszivattyús rendszerek tervezése és modellezése szempontjából alapvető jelentőségű a talaj és a furathőcserélő hőtechnikai paramétereinek megbízható meghatározása [97–99]. Ezek közül kiemelt szerepe van a talaj effektív hővezetési tényezőjének, valamint a furat termikus ellenállásának, mivel e paraméterek közvetlenül befolyásolják a talajszonda hőfelvételi vagy hőleadási képességét, a primer oldali hőmérsékletszinteket és ezen keresztül a hőszivattyús rendszer energetikai teljesítményét [97–99]. A geotermikus furatok hőtechnikai tulajdonságainak meghatározására a gyakorlatban legelterjedtebb módszer a Thermal Response Test, vagyis a termikus választeszt, amely az iparág egyik alapvető referenciaeljárásának tekinthető [99].

A Thermal Response Test célja, hogy ellenőrzött üzemi körülmények között meghatározza a furat és a környező talaj hosszabb időtávú hőmérséklet-válaszát. A vizsgálat során a furathőcserélőben keringtetett hőhordozó közegbe közel állandó hőteljesítményt táplálnak be, miközben mérik a közeg belépő és kilépő hőmérsékletét, a térfogatáramot, valamint a betáplált hőteljesítményt [99]. A mérési adatok alapján meghatározható a talaj effektív hővezetési tényezője (λ_{eff}), valamint a furat termikus ellenállása (R_b). A módszer előnye az egyszerű mérési felépítés, a viszonylag kis műszerezettségi igény és az, hogy a teljes furathosszra vonatkozó integrált hőátadási paramétereket szolgáltat [97–99].

A TRT-mérések klasszikus kiértékelése a radiális hővezetés elméletén, azon belül leggyakrabban a Kelvin-féle végtelen vonalforrás-megoldáson alapul [97,98]. A modell a furatot végtelen hosszú vonal menti hőforrásként vagy hőnyelőként közelíti, amely homogén, végtelen kiterjedésű közegben helyezkedik el. A hőterhelés hatására a furat környezetében kialakuló hőmérséklet-változás az alábbi összefüggéssel írható le [97,99]:

$$\Delta T_{(r,t)} = \frac{q}{4\pi\lambda H} \int_{p}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \tag{7}$$

ahol a dimenziótlan időváltozó definíciója:

$$p = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \tag{8}$$

Ahol q a hőbetáplálási teljesítményt, λ a talaj hővezetési tényezőjét, H a fúrólyukhosszt, α pedig a talaj hődiffuzivitását jelöli. Bár a TRT jól megalapozott, a geotermikus iparban kiterjedten alkalmazott módszer, alapvető korlátai szintén jól ismertek [74,100]. Mivel a tesztet hosszú időtartamú, közel állandósult áramlási feltételek mellett végzik, és a rendszer egészére vonatkozó termikus választ értékeli, az eredő λ_{eff} paraméter a teljes fúrólyukra vonatkozó egyetlen, integrált értéket képvisel, nem pedig mélységfüggő jellemzőket [74,100]. Következésképpen a módszer eredendően nem képes feloldani a geológiai rétegződést vagy kimutatni a termikus tulajdonságok függőleges heterogenitását.

Ez a korlát indokolja olyan fejlett, nagy felbontású, szegmensenkénti inverziós technikák fejlesztését és alkalmazását, amelyek egyetlen tömbszerű paraméter helyett mélységfüggő hővezetési tényező profilok meghatározását teszik lehetővé. [ZV1]

1.6 Bibliometriai elemzés

A bibliometriai elemzés célja annak feltárása, hogy a nemzetközi szakirodalomban milyen kutatási irányok, publikációs trendek és tudományos kapcsolódási pontok jellemzik a GSHP-rendszerek matematikai modellezésével [71,72,101] és optimalizálásával [102,103] foglalkozó tanulmányokat. A vizsgálat nemcsak a tudományos közösség aktuális érdeklődési területeinek azonosítását teszi lehetővé, hanem rámutat azokra a kutatási hiányterületekre is, amelyek további fejlesztést igényelnek a talajhő-hasznosító hőszivattyús technológia hatékonyságának, üzembiztonságának és gazdaságosságának növelése érdekében [ZV4].

1.6.1 Az elemzés adatbázisa és módszertani kerete

A kutatás adatelemzési keretrendszere a Web of Science (WoS) adatbázis [104] és a VOSviewer szoftver [105,106] együttes alkalmazására épült. A Web of Science adatbázis kiválasztását az indokolta, hogy széles tudományterületi lefedettséget és strukturált bibliográfiai adatokat biztosít, amelyek alkalmasak bibliometriai elemzések elvégzésére [104]. Ez lehetővé teszi a GSHP-rendszerekhez kapcsolódó mérnöki, energetikai, környezettudományi és alkalmazott informatikai kutatási irányok együttes vizsgálatát.

A WoS adatbázis további előnye, hogy a bibliometriai elemzéshez szükséges adatok strukturált formában érhetők el [104]. Ez megkönnyíti az adatok exportálását és feldolgozását, valamint a VOSviewer szoftverbe történő importálását. A VOSviewer alkalmas kulcsszó együttelőfordulási hálózatok, szerzői és intézményi kapcsolatok, valamint idézettségi és együttműködési mintázatok vizualizálására, ezáltal támogatja a kutatási terület szerkezeti és tematikus feltérképezését [106].

A bibliometriai vizsgálat elsődleges célja átfogó kép kialakítása volt a GSHP-rendszerek matematikai modellezésével és optimalizálásával kapcsolatos tudományos publikációkról, különös tekintettel az állandósult és tranziens állapotokban lejátszódó folyamatok modellezésére. A keresési stratégia kialakítása során kiemelt figyelmet kapott a megfelelő kulcsszavak és keresőkifejezések kiválasztása, mivel ezek alapvetően meghatározzák a találati halmaz relevanciáját és értelmezhetőségét.

1.6.2 Keresési stratégia és publikációs halmaz

A szakirodalmi keresés az elmúlt évtizedben megjelent, GSHP-rendszerek optimalizálásával és matematikai modellezésével foglalkozó publikációkra irányult [ZV4]. A vizsgálat során két külön keresési irány került meghatározásra. Az egyik az optimalizálással, a másik a matematikai modellezéssel kapcsolatos tudományos közleményeket azonosította. Az áttekintő cikkek kizárásra kerültek, így az elemzés elsősorban eredeti kutatási eredményeket közlő tanulmányokra épült [ZV4].

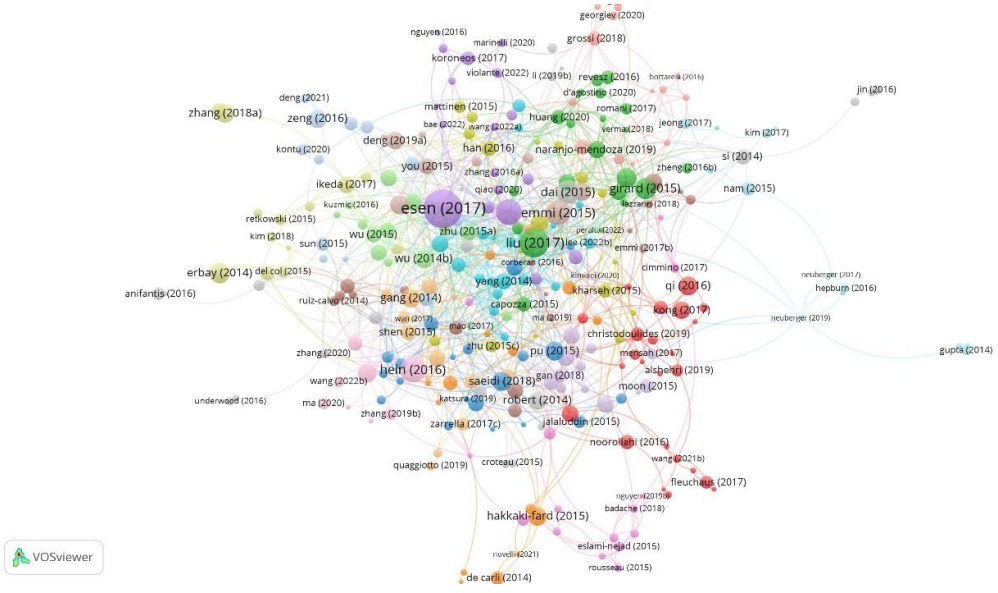
Az optimalizálási témakörben végzett keresés 2138 tételt, míg a matematikai modellezéshez kapcsolódó keresés 2019 tételt azonosított [ZV4]. A két publikációs halmaz között jelentős tematikus átfedés mutatkozott, ami arra utal, hogy a GSHP-rendszerek kutatásában a matematikai modellezés és az optimalizálás szorosan összekapcsolódó területek [ZV4]. Ez a kapcsolat műszaki szempontból is indokolt, mivel az optimalizálási feladatok megfogalmazásához általában olyan modellre van szükség,

amely képes leírni a rendszer bemeneti változói, belső állapotai és kimeneti teljesítményjellemzői közötti kapcsolatokat [11-15].

A publikációs adatok alapján megállapítható, hogy a GSHP-rendszerek optimalizálása és matematikai modellezése iránt jelentős tudományos érdeklődés mutatkozik [ZV4]. A kutatási aktivitás növekedése azt jelzi, hogy a hőszivattyús rendszerek teljesítményének javítása, energiafogyasztásának csökkentése és szabályozási stratégiáinak fejlesztése egyre fontosabb kutatási cél [ZV4]. A modellezés és optimalizálás együttes megjelenése arra utal, hogy a két megközelítés egymást kiegészítve járulhat hozzá a rendszerek hatékonyabb tervezéséhez és üzemeltetéséhez.

1.6.3 Tudományos kapcsolatok és kiemelt publikációk

Az elemzés [ZV4] rávilágított arra, hogy a GSHP-rendszerek kutatásában a matematikai modellezés, az optimalizálás, a mesterséges intelligencia alapú módszerek és a hibrid energiaellátási rendszerek egyre gyakrabban jelennek meg egymással összekapcsolódó témakörökként. Ezt a kapcsolatot szemlélteti a 3. ábra, amely a talajszondás hőszivattyús rendszerek matematikai modellezésével foglalkozó publikációk hálózatát mutatja be az elmúlt 10 évre vonatkozóan. Az ábrán látható csomópontok az egyes publikációkat, míg a közöttük húzódó kapcsolatok az idézettségi, illetve tématerületi összefüggéseket jelzik. Az idézettségi vizsgálat alapján a legkiemelkedőbb publikációk közé tartozik Esen és munkatársai [107] tanulmánya, amely 304 idézetet kapott [ZV4]. A kutatás mesterséges intelligencia alapú módszerekkel vizsgálta spirál típusú talajhőcserélők teljesítményét, különös tekintettel a napenergiával támogatott GSHP-rendszerek vízszintes és függőleges konfigurációinak összehasonlítására.



3. ábra: A talajszondás hőszivattyús rendszerek matematikai modellezésével foglalkozó publikációk hálózata az elmúlt 10 évben, saját szerkesztés [ZV4]

Az ANN, vagyis mesterséges neurális hálózat, valamint az ANFIS, vagyis adaptív neuro-fuzzy következtetési rendszer alkalmazhatóságát vizsgálták. A modellek teljesítményének összehasonlítása alapján az ANFIS-megközelítés kedvezőbb eredményeket mutatott a vizsgált teljesítménymutatók, többek között a CRR és az (R^2) értékek alapján, különösen hibrid tanulási algoritmusok alkalmazása esetén. A tanulmány jelentősége abban áll, hogy rámutatott az adatvezérelt modellezési technikák GSHP-rendszerekre történő alkalmazhatóságára, valamint arra, hogy e módszerek más nemlineáris energetikai rendszerek elemzésében is hasznosíthatók lehetnek.

A jelentős hivatkozással rendelkező munkák közé tartozik Cai és munkatársai [108] kutatása is, amely 238 idézetet kapott [ZV4]. Ez a tanulmány Bayes-hálók alkalmazásával foglalkozott a hőszivattyús rendszerek diagnosztikai folyamatainak fejlesztése érdekében. A kutatás különösen a több, egyidejűleg fennálló hiba felismerésére és kezelésére helyezte a hangsúlyt. A kétrétegű hálózati struktúra lehetővé tette a szenzoradatok és az emberi megfigyelések együttes figyelembevételét, ami fontos lépést jelenthet a hőszivattyús rendszerek üzembiztonságának és diagnosztikai pontosságának növelésében.

Liu és munkatársai [109] a hideg éghajlati övezetekben alkalmazott hibrid hőszivattyús rendszereket vizsgálták, míg Ren és munkatársai [110] a napenergia, a geotermikus energia és a földgáz integrált alkalmazásának lehetőségeit elemezték az energiahatékonyság javítása, a költségek csökkentése és a környezeti terhelés mérséklése érdekében. Wang és munkatársai [111], valamint Holmberg és munkatársai [112] a technológiai fejlesztések és szimulációs technikák szerepét emelték ki, különösen a mélyebb fúrási megoldások és a hőátadási jellemzők javítása szempontjából.

1.6.4 Publikációs trendek és kutatási irányok

Az elmúlt évtized publikációs trendjei azt mutatják, hogy a GSHP-rendszerekkel kapcsolatos kutatások egyre inkább a hatékonyságnövelés, az optimalizálás, az új modellezési technikák és a megújuló energiaforrások integrációja felé tolódnak el [ZV4]. A folyóiratcikkek tematikus tartalma alapján növekvő figyelem irányul a rendszerhatékonyság javítására, a hőcserélők hőtechnikai viselkedésének részletesebb leírására, valamint a különböző hibrid energiaellátási megoldások vizsgálatára [ZV4].

A kutatási terület interdiszciplináris jellege is egyre erőteljesebben megjelenik. A GSHP-rendszerek vizsgálata nem kizárólag hőtechnikai vagy épületgépészeti kérdésként jelenik meg, hanem összekapcsolódik a környezeti hatások értékelésével, a gazdaságossági elemzésekkel, az irányítástechnikai megoldásokkal és az adatvezérelt módszerekkel [ZV4]. Ez a tendencia összhangban áll azzal a műszaki igénnyel, hogy a hőszivattyús rendszerek ne csak névleges üzemi pontok alapján, hanem változó környezeti és felhasználói feltételek mellett is értékelhetők és optimalizálhatók legyenek [ZV4].

A publikációs trendek alapján a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás alkalmazása egyre nagyobb szerepet kap a hőszivattyús rendszerek teljesítménybecslésében, diagnosztikájában és szabályozásában [ZV4]. Az adatvezérelt módszerek különösen azokban az esetekben lehetnek hasznosak, amikor a rendszer viselkedése nemlineáris, a bemeneti változók között összetett kölcsönhatások állnak fenn, vagy a fizikai alapú modellalkotás a rendelkezésre álló adatok hiánya miatt korlátozott.

1.6.5. Kapcsolódás a talajszonda mélységfüggő vizsgálatához

Az elemzés eredményei alapján a GSHP-rendszerek teljesítményének javítása szempontjából kiemelt jelentőségű a talajszondák geometriai kialakítása, mélysége, elrendezése és hőtechnikai viselkedése. A szonda mélységének növekedésével a talajhőmérséklet általában kedvezőbbé válhat, ami potenciálisan nagyobb hőkinyerési lehetőséget biztosíthat [ZV4]. Ugyanakkor a szonda mentén kialakuló hőmérséklet-eloszlás, a visszatérő ágban fellépő hőveszteség, valamint a felszínhez közeledve változó talajhőmérséklet jelentős hatást gyakorolhat a rendszer tényleges energetikai teljesítményére [ZV2].

A talajszonda környezetében lejátszódó hengerszimmetrikus hővezetési folyamatok modellezése alapvető fontosságú a talaj és a hőhordozó közeg közötti hőátadási mechanizmusok megértéséhez [92,113]. Az U-csöves szondák esetében azonban nemcsak a talajból történő hőfelvétel, hanem a szondaágak közötti hőátadás és a visszatérő ág mentén jelentkező hőmérsékletváltozás is befolyásolhatja a primer oldali kilépő hőmérsékletet. Ez a jelenség különösen fontos lehet olyan rendszereknél, ahol a furat mentén több mélységben rendelkezésre állnak hőmérsékleti mérési adatok, mivel ezek lehetővé teszik a mélységfüggő hőtechnikai viselkedés részletesebb elemzését.

A mélységoptimalizálás szempontjából ezért nem elegendő a talajszonda teljes hosszára vonatkozó átlagos hőtechnikai paraméterek ismerete [ZV1]. A tervezési és üzemeltetési

döntések megalapozásához szükség van annak vizsgálatára is, hogy a különböző mélységtartományok milyen mértékben járulnak hozzá a hőkinyeréshez, illetve hol jelentkezhetnek olyan hőtechnikai veszteségek vagy korlátozó tényezők, amelyek rontják a rendszer hatékonyságát [ZV1, ZV2]. Ez a megközelítés közvetlenül kapcsolódik a korábbi fejezetben bemutatott TRT-módszer korlátaihoz, mivel a klasszikus TRT a teljes furathosszra vonatkozó effektív értékeket szolgáltat, de nem ad közvetlen információt a hőtechnikai tulajdonságok mélység szerinti változásáról [ZV1].

2 MÉRÉSI INFRASTRUKTÚRA, TEREPI ADATGYŰJTÉS ÉS ÜZEMI FELTÉTELEK

2.1 Mélységfelbontású hőmérséklet-monitorozó rendszer felépítése

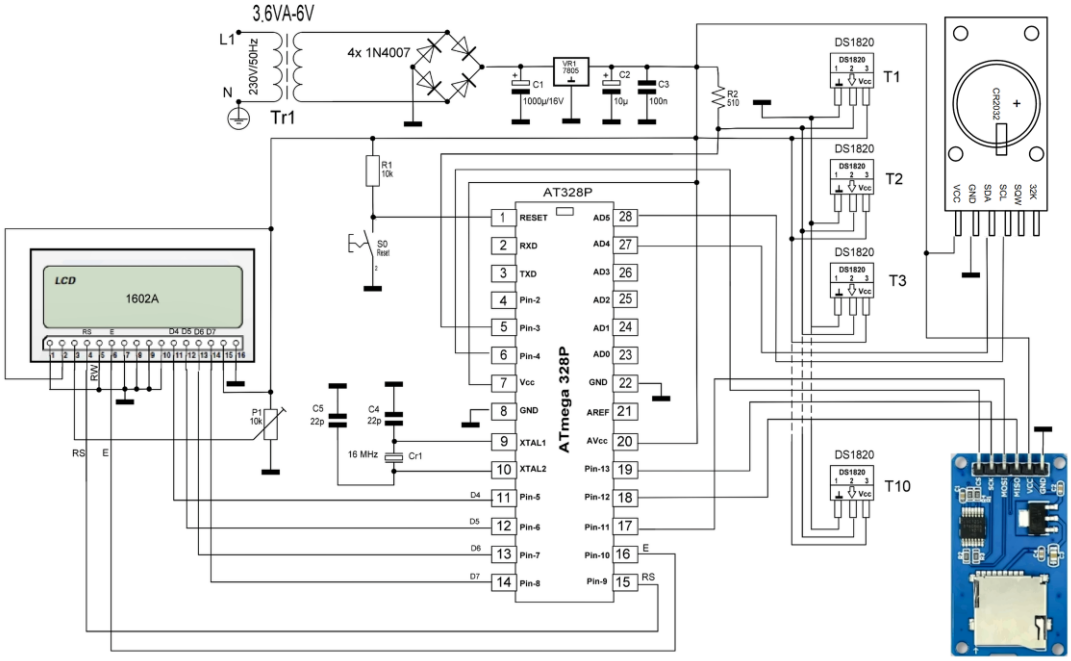
A vizsgált U-csöves talajszonda valós üzemi körülmények között kialakuló tranziens termo-hidraulikai viselkedésének vizsgálatához terepi alkalmazásra alkalmas, digitális hőmérsékletmérő és adatgyűjtő rendszert alakítottam ki. A mérőrendszer tervezése során alapvető követelmény volt a hosszú távú terepi üzemeltethetőség, a stabil adatgyűjtés, valamint az, hogy a fúrólyuk mentén kialakuló hőmérsékleteloszlás mélység szerint felbontható módon legyen rögzíthető. A fúrólyuk menti hőmérsékletprofilok mérése a geotermikus rendszerek diagnosztikájában és üzemi állapotértékelésében kiemelt jelentőségű, a közelmúltban több mérésalapú geotermikus vizsgálatban is eredményesen alkalmaztak hasonló mélységfelbontású hőmérsékletmérési eljárásokat [114–116].

A mérőrendszer az U-csöves talajszonda mindkét ágán elhelyezett digitális hőmérséklet-érzékelőkből épül fel. Az előremenő, tehát lefelé áramló, belépő ágon tíz darab DS18B20 típusú digitális hőmérséklet-érzékelőt helyezkedik el 10 m-es mélységi osztással. Ezzel azonos kialakításban a visszatérő, tehát a felfelé áramló, kilépő ágon további tíz érzékelő biztosította a hőmérséklet-idősorok rögzítését. Az így kialakított mérési konfiguráció lehetővé teszi a 100 m mélységű U-szonda teljes hossza mentén a mélységfüggő hőmérsékletprofil monitorozását. A két csőág szimmetrikus műszerezése kiemelten fontos a szegmensenkénti hőmérséklet-változások, valamint az ezekből számítható hőáram- és hőátadási jellemzők kiértékelése szempontjából.

Az érzékelők adatkommunikációja „OneWire” protokollon keresztül valósult meg. Ez a megoldás egyszerű kábelezési struktúrát biztosít, miközben kültéri, terepi mérési környezetben is alkalmas megbízható adatátvitelre [21,22]. Az adatgyűjtési és rendszervezérlési feladatokat ATmega328P alapú mikrokontroller látta el. A

mikrokontroller végezte az érzékelők azonosítását, a mérési ciklusok időzítését, valamint a mért adatok valós idejű megjelenítését. A hőmérsékletadatok helyi tárolása SD-kártyára történt, megközelítőleg 750 ms-os mintavételi időközzel. Mivel minden DS18B20 érzékelő egyedi digitális azonosítóval rendelkezik, a rögzített adatok egyértelműen hozzárendelhetők voltak az adott érzékelőhöz és annak mélységi pozíciójához.

A felszíni adatgyűjtő egység időjárásálló védőházban helyezkedik el, amely biztosította az elektronikai elemek védelmét a terepi környezetben fellépő nedvesség, por, páralecsapódás és hőmérsékleti ingadozások hatásaival szemben. A mérőegység külső tápellátással működött, az érzékelőhálózathoz pedig ipari csatlakozón keresztül kapcsolódott. A kialakítás lehetővé tette a mérőrendszer biztonságos terepi üzemeltetését, valamint a hosszabb időtartamú mérési kampányok során szükséges folyamatos és megbízható adatgyűjtést. A mérőrendszer teljes kapcsolási rajzát az 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: A fejlesztett mérőegység kapcsolási rajza, saját szerkesztés [ZV1, ZV2]

2.1.1 Érzékelőkalibrálás és a mérési bizonytalanság meghatározása

A DS18B20 típusú digitális hőmérséklet-érzékelők robusztus kialakításuk, egyszerű illeszthetőségük és kedvező terepi alkalmazhatóságuk miatt széles körben alkalmazhatók környezeti és geotermikus hőmérsékletmérési, valamint adatgyűjtési feladatokban [22]. Ugyanakkor mérési pontosságukat több tényező is befolyásolhatja, többek között a kábelhossz, a környezeti hatások, valamint az egyes érzékelők közötti gyártási és működési eltérések [23–25]. E bizonytalansági források mérséklése és a mélységfüggő

hőmérsékletprofilok megbízható kiértékelése érdekében a terepi telepítést megelőzően kétlépcsős kalibrálási eljárást alkalmaztam.

1. Gyári pontosság ellenőrzése

Első lépésként szükséges volt az egyes érzékelők gyári pontosságának meghatározása. A DS18B20 érzékelők névleges pontossága a gyártói adatok alapján a –10 és +85 °C közötti hőmérséklet-tartományban ±0,5 °C. A tényleges mérési eltérések meghatározásához minden érzékelőt termosztatikus kalibráló fürdőben vizsgáltam, referenciaeszközként A osztályú Pt100 ellenálláshőmérőt alkalmazva. A kalibrálási mérési pontok alapján az érzékelők tényleges eltérése jellemzően ±0,15–0,25 °C tartományban adódott. Ez az eredmény összhangban van az alacsony költségű digitális hőmérséklet-érzékelők, illetve a DS18B20 szenzorok laboratóriumi ellenőrzésével és kalibrálásával foglalkozó újabb vizsgálatok megállapításaival [23–25].

2. Rendszerszintű kalibrálás

A második lépésben a teljes mérési lánc rendszerszintű kalibrálására került sor. Erre azért volt szükség, mert az érzékelők önálló pontosságán túl a teljes mérőrendszer működése a kábelezés, a csatlakozások, a kommunikációs busz, valamint az adatgyűjtő egység által is befolyásolható. A húsz érzékelőből álló mérőlánc integrálását követően az összes érzékelő egyidejűleg, jól kevert és állandó hőmérsékletű vízfürdőbe került bemerítésre. A rendszerszintű kalibrálás célja a kábelezésből és a rendszerkapcsolatokból származó esetleges torzítások, például a jelcsillapítás, a parazita kapacitások és a csatlakozási bizonytalanságok hatásának számszerűsítése volt. Az egyes érzékelőkre meghatározott lineáris korrekciós tényezők a mikrokontroller memóriájában kerültek tárolásra, így a korrekciók a terepi adatgyűjtés során közvetlenül alkalmazhatók voltak. A rendszerszintű kalibrálás eredményeként az érzékelők közötti relatív eltérés ±0,05 °C értékre csökkent.

A mérőrendszer teljes bizonytalanságát nem kizárólag az érzékelők egyedi pontossága határozza meg, hanem több, egymással összegződő hatás eredőjeként értelmezhető:

- Kábelhossz: A terepi kialakításban a teljes kábelezés hossza elérte a 110 m-t. A hosszú kábelezés jelidő-késéseket, illetve kis nagyságrendű elektromos eltolódásokat okozhat, amelyek hőmérsékleti egyenértéke a vizsgálatok alapján 0,02 °C alatt maradt.
- Termikus kontaktellenállás: További bizonytalansági forrásként az érzékelőfej és a mérendő közeg közötti termikus kontaktellenállás jelentkezik, amelyet az érzékelőfej tömítéséhez és mechanikai védelméhez alkalmazott anyag is befolyásol. Ennek hatása megközelítőleg ±0,03 °C értékre becsülhető.

- Környezeti zaj: A terepi környezetből származó nedvesség, páralecsapódás és tranziens elektromágneses zavarok hatása a terepi mérési megbízhatóságra vonatkozó szakirodalmi ajánlások alapján került figyelembevételre.

A szenzorok egyedi pontosságát, a rendszerszintű kalibrálás eredményét, a kábelezésből származó hatásokat, a termikus kontaktellenállást és a környezeti zavarokat együttesen figyelembe véve a teljes mérési láncra vonatkozó kombinált kiterjesztett bizonytalanság $k = 2$ lefedési tényező mellett az alábbi értékkel került becslésre:

$$U \approx \pm 0{,}12\,°C$$

A kapott bizonytalansági szint megfelelőnek tekinthető a fúrólyuk menti hőmérsékletprofilok, valamint a mélység szerint változó hőmérsékletgradiensek nagy felbontású elemzéséhez [117]. Ennek alapján a kalibrált mérőrendszer alkalmasnak tekinthető az U-csöves talajszonda üzemi állapotban kialakuló tranziens hőmérsékleti viszonyainak megbízható követésére, továbbá megfelelő mérési alapot biztosít a későbbi szegmensenkénti energetikai kiértékeléshez és az inverz modellezési eljárásokhoz.

2.2 A vizsgált talajszondás hőszivattyús rendszer helyszíni és furatmező bemutatása

A vizsgálathoz felhasznált mérési adatok az Ópusztaszeri Nemzeti Történeti Emlékparkban üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszerből származnak. A rendszer primer oldali hőforrását függőleges talajszondákból kialakított geotermikus furatmező biztosítja. A furatmező összesen 80 darab, egyenként 100 m mélységű talajszondából áll, amelyek négy osztó-gyűjtő aknához csatlakoznak. A furatok közötti átlagos távolság megközelítőleg 6 m. A szakirodalom alapján a 3–6 m közötti furattávolságok a gyakorlatban gyakran alkalmazott értékeknek tekinthetők, ugyanakkor ezek hosszabb üzemidő esetén jelentősen befolyásolhatják a furatmezőn belüli termikus kölcsönhatásokat [118,119]. A vizsgált fúrólyuk fő geometriai és szerkezeti adatait a 2. táblázat foglalja össze.

2. Táblázat: A vizsgált fúrólyuk fő geometriai és szerkezeti adatai

Paraméter	**Érték**
Furatmélység	100m
Csőtípus	2x40x3,7 mm (HDPE); szimpla U-cső
Fúrólyukátmérő	130 mm
Kitöltőanyag	cementalapú injektálóanyag
Átlagos furattávolság	kb. 6 m

A helyszínre vonatkozóan részletes, furatspecifikus geológiai rétegsor nem állt rendelkezésre. Korábbi hidrogeológiai vizsgálatok alapján azonban feltételezhető, hogy a felső talajrétegek döntően holocén üledékekből épülnek fel, míg a mélyebb tartományokban pleisztocén homok- és agyagrétegek váltakozása jellemző [120,121]. Ezek a rétegtani információk általános képet adnak a térség földtani felépítéséről, de a vizsgált szonda mentén nem teszik lehetővé a hőtechnikai tulajdonságok közvetlen, mélység szerinti paraméterezését.

A vizsgálat során az elemzés egyetlen műszerezett talajszondára végzett mérésekre korlátozódott. A vizsgált talajszonda a működő furatmező részeként üzemelt, ezért a mért hőmérsékleti válasz nem elkülönített laboratóriumi környezetben, hanem valós rendszerüzem mellett alakult ki. A rendelkezésre álló dokumentáció alapján nem volt egyértelműen megállapítható, hogy a műszerezett szonda a furatmezőn belül központi, peremhelyzetű vagy más jellegű elhelyezkedéssel rendelkezik-e. Ennek következtében a szomszédos talajszondák hatása nem különálló, explicit módon paraméterezett tényezőként, hanem a mért in situ termikus válasz részeként került figyelembevételre.

Ez a megközelítés összhangban van a kutatás mérésalapú célkitűzésével, ugyanakkor fontos értelmezési korlátot is jelent. A rendelkezésre álló adatkészlet alapján a helyi furatválasz, a szomszédos furatokból eredő termikus kölcsönhatások, valamint az esetleges talajvízhatásból származó komponensek nem választhatók szét egymástól egyértelműen. Helyspecifikus hidrogeológiai paraméterek hiányában a talajvíz által okozott advekció jelenléte, iránya vagy intenzitása sem volt független módon számszerűsíthető.

A vizsgált talajszonda szimpla U-csöves kialakítású, amely a gyakorlatban az egyik legelterjedtebb BHE-konfigurációnak tekinthető [118,119]. A fúrólyukon belüli hőátadást alapvetően befolyásolja a csőfal, a kitöltőanyag és a furatfal közötti hőellenállás, az effektív furat-termikus ellenállás, valamint az előremenő és visszatérő ág közötti belső termikus rövidzár. Ezek a hatások különösen fontosak a mért mélységfüggő hőmérsékletprofilok értelmezésekor, mivel a hőmérsékleti változások nem kizárólag a talaj lokális hővezetési tulajdonságait, hanem a furaton belüli hőtechnikai kölcsönhatásokat is tükrözik [12,13,122].

A mélység szerint felbontott hőmérsékletmérések alkalmazása különösen indokolt olyan esetekben, amikor a talajszonda viselkedésének lokális, mélységfüggő vizsgálata a cél. Az ilyen mérések megvalósíthatók diszkrét pontérzékelőkkel vagy elosztott hőmérséklet-

érzékelési technikákkal, és a szakirodalomban egyaránt előfordulnak terepi TRT-, kiterjesztett TRT- és hosszú távú állapotkövetési vizsgálatokban [16,17,26,123–125].

2.2.1 A mérőrendszer terepi telepítése és mechanikai védelme

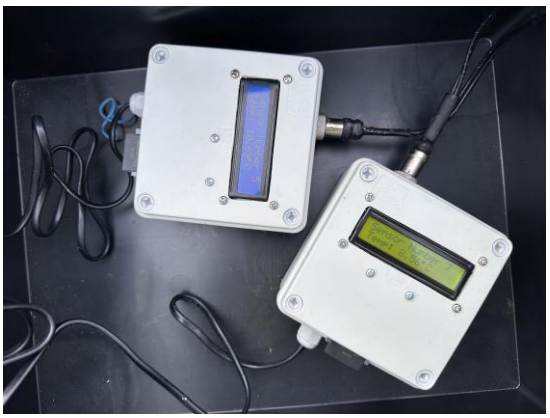
A mérőrendszer terepi telepítése során kiemelt szempont volt az érzékelők hosszú távon stabil mechanikai rögzítése, valamint a kábelezés nedvességgel szembeni védelme. Mivel a mérőrendszer közvetlenül a fúrólyukfejnél, kültéri környezetben üzemelt, a kialakításnak ellen kellett állnia a talajnedvesség, a csapadék, a páralecsapódás és az esetleges hőmérsékleti ingadozások hatásainak.

Az érzékelőfejek és a hozzájuk tartozó kábelek rögzítését a fúrólyukfejnél szorító tömszelencék alkalmazásával oldottam meg. A kialakítás biztosította az érzékelők megfelelő mechanikai pozícióban tartását, illetve csökkentette annak kockázatát, hogy a talajvíz vagy a talajnedvesség hosszabb távon károsítsa az érzékelőket és a vezetékcsatlakozásokat. A vízzáró és mechanikailag tehermentesített rögzítés különösen fontos volt, mivel a mérési kampány célja nem pillanatnyi állapotfelvétel, hanem tartós, üzemi körülmények közötti hőmérsékletmérés és adatgyűjtés volt. A fúrólyukfejnél telepített érzékelők elrendezését és a szorító tömszelencés rögzítést a 5. ábra mutatja.

A felszíni mérőegységet külön időjárásálló mérődobozban került elhelyezésre. A doboz tartalmazta a mikrokontrolleres adatgyűjtő egységet, a kijelzőt, az SD-kártyás adattároló modult, valamint az érzékelőhálózathoz csatlakozó bekötési pontokat. A terepi adatgyűjtő egység kialakítását a 6. ábra szemlélteti.



5. ábra: A fúrólyukfejnél telepített hőmérséklet-érzékelők terepi elrendezése, szorító tömszelencés, vízzáró rögzítéssel. [ZV1]



6. ábra: A digitális adatgyűjtő rendszer terepi mérőegysége: mikrokontroller, kijelző, SD-kártyás adatnaplózó és az érzékelőhálózat csatlakozása. [ZV1]

A vizsgált talajszonda-kör üzemi paramétereinek beállítása a furatmezőhöz tartozó osztó-gyűjtő egységen keresztül történt. Az osztó-gyűjtő lehetővé tette az egyes ágak

hidraulikai leválasztását, valamint a vizsgált kör kiválasztását és üzemi állapotának beállítását. A 20 ágú osztó-gyűjtő kialakítása a 7. ábrán látható:



7. ábra: A vizsgált talajszonda-kör üzemi paramétereinek beállítására szolgáló 20 ágú osztó-gyűjtő egység. [ZV1]

2.2.2 Mérési fázisok, hidraulikai üzemállapotok és adatgyűjtési intervallumok

A mérési kampány egy referencia-egyensúlyi állapotot, valamint két, eltérő térfogatárammal jellemezhető aktív üzemi fázist foglalt magában. Az aktív mérések során a vizsgált talajszonda-kör térfogatáramát az osztó-gyűjtő aknában állítottam be, és az adott kiértékelési intervallumon belül állandó volt. A két különböző üzemi pont alkalmazásának célja annak vizsgálata volt, hogy a furat mentén kialakuló axiális hőmérséklet-eloszlás, az U-szonda ágai nettó hőcsere-viselkedése, valamint a későbbi szegmensenkénti energetikai kiértékelés mennyiben függ a hőhordozó közeg tartózkodási idejétől és a térfogatáram nagyságától.

A térfogatáram változása közvetlenül befolyásolja az U-csöves talajszonda termo-hidraulikai viselkedését. Hatással van többek között a hőhordozó közeg tartózkodási idejére, az előremenő és visszatérő ág közötti belső termikus kölcsönhatásra, az axiális hőmérséklet-különbségek nagyságára, valamint a modellillesztésből származtatott paraméterek megbízhatóságára. Ezeket a hatásokat több térfogatáram mellett végzett TRT-vizsgálatok és validációs tanulmányok is alátámasztják [12,13,126]. A vizsgált mérési fázisokat, az üzemi feltételeket és a rögzített mintaszámokat a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: A mélységfelbontású hőmérsékletmérési kampány mérési fázisai, üzemi feltételei és mintaszámai

Mérési fázis	Dátum	Időintervallum	Térfogatáram [m³/h]	Időtartam [h]	Mintaszám

Referencia-egyensúlyi állapot	2025-03-18	11:25-16:03	-	4.38	4631
1. aktív mérési fázis	2025-03-20	10:20–12:41	0.585	2.21	2282
2. aktív mérési fázis	2025-03-24	12:18–17:11	0.815	4.53	4687

A referencia-egyensúlyi mérést 2025. március 18-án, 11:25 és 16:03 között végeztem. Ebben az időszakban a vizsgált talajszondát hidraulikailag leválasztottam, így a rendszerben nem történt keringtetés. A mérés során 4,38 óra alatt összesen 4631 minta került rögzítésre. Ez az állapot a keringésmentes, zavartalan hőmérsékleti viszonyok meghatározására szolgált, és referenciaállapotként használható a későbbi numerikus modellalkotás és validálás során.

Az első aktív mérési fázist 2025. március 20-án, 10:20 és 12:41 között került sor. Ebben az üzemállapotban a vizsgált szonda térfogatárama 0,585 m³/h volt. A 2,21 órás mérési intervallum alatt 2282 mérési minta került rögzítésre. A második aktív mérési fázis 2025. március 24-én, 12:18 és 17:11 között zajlott, nagyobb, 0,815 m³/h térfogatáram mellett. Ebben az esetben a 4,53 órás üzemi időszak alatt 4687 minta állt rendelkezésre. A két eltérő térfogatáramú mérési fázis lehetővé tette a hidraulikai terheléstől függő axiális hőtechnikai viselkedés összehasonlító vizsgálatát.

A hidraulikai terhelés jelentős szerepet játszik a furat menti hőmérséklet-különbségek értelmezhetőségében. Nagyobb térfogatáram esetén a hőhordozó közeg tartózkodási ideje csökken, ugyanakkor a rövid idejű termo-hidraulikai ingadozások jellemzően mérséklődnek. Ez kedvezően befolyásolhatja a szegmensenkénti becslések jel–zaj viszonyát, és a mélység szerint változó hőátadási viszonyok stabilabb értékelését eredményezheti. Kisebb térfogatáramnál ezzel szemben, különösen a mélyebb szakaszokban, a becsült szegmensenkénti hőcsere érzékenyebbé válhat a mérési zajra és a lokális hőmérsékletingadozásokra. Ez a megfigyelés összhangban van a több térfogatáramú TRT-vizsgálatokban közölt tömegáramfüggő tranziens viselkedéssel és illesztési érzékenységgel [13].

A kiértékeléshez kiválasztott időintervallumok összefüggő aktív üzemi periódusokat fednek le. A kiválasztás során alapvető szempont volt az egyértelmű fűtési üzemállapot,

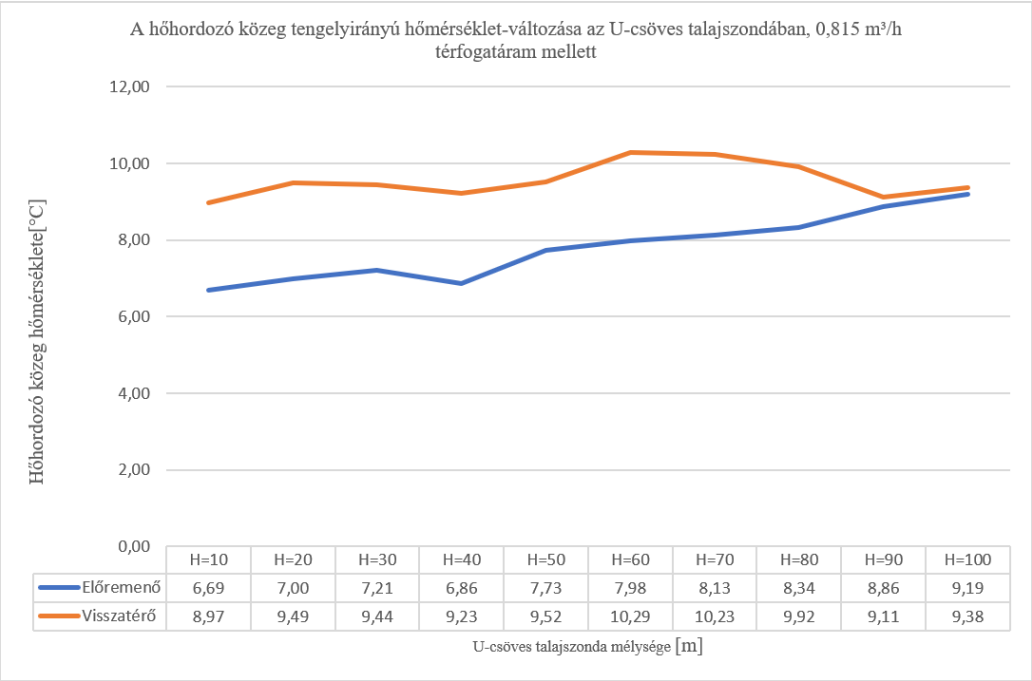
a stabilnak tekinthető térfogatáram, valamint az, hogy a furat teljes mélysége mentén rendelkezésre álljanak kiértékelhető, mélység szerint felbontott hőmérsékleti adatok.

2.3 Mélységfüggő hőmérsékletprofilok és a mérési adatok előzetes értékelése

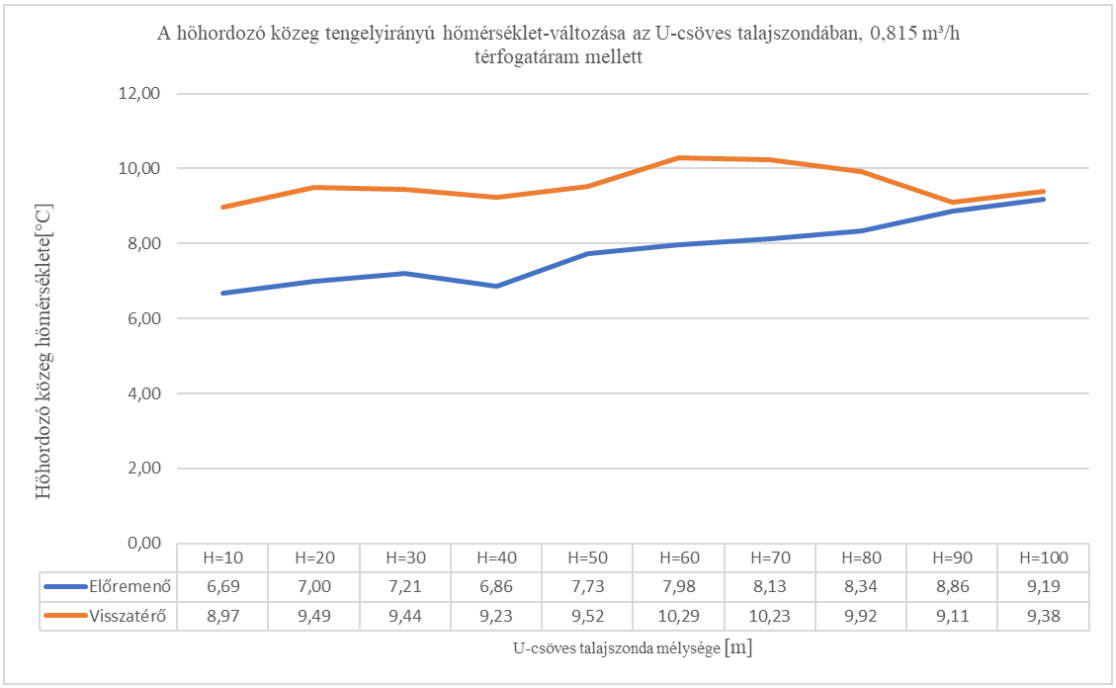
A mérési kampány során rögzített adatkészlet időbélyeggel ellátott hőmérsékleti idősorokból áll, amelyeket az U-csöves talajszonda mentén, meghatározott diszkrét mélységekben mértem.

A két aktív mérési fázis időben átlagolt, mélység szerint felbontott előremenő és visszatérő folyadékhőmérsékleteit szemlélteti az 8. és 9. ábra. Mindkét vizsgált térfogatáram esetén azonos általános tendencia figyelhető meg. A hőhordozó közeg hőmérséklete a mélység növekedésével emelkedik, ami a környező talajjal végbemenő kumulatív hőcsere következménye. A viselkedés jól tükrözi a talajszonda működésének alapvető hőtechnikai sajátosságát, vagyis azt, hogy a keringő folyadék a furat mentén fokozatosan hőt vesz fel a környező talajtömegtől.

A két üzemi feltétel között ugyanakkor markáns különbségek is kimutathatók. Az alacsonyabb, 0,585 m³/h térfogatáram esetén az előremenő és a visszatérő ág közötti hőmérséklet-különbség nagyobb volt. Ez arra utal, hogy a hőhordozó közeg hosszabb tartózkodási idővel rendelkezett a szondában, így intenzívebb hőcsere alakulhatott ki a folyadék és a környező talaj között. A nagyobb, 0,815 m³/h térfogatáram mellett az előremenő és visszatérő hőmérsékletek közelebb kerültek egymáshoz, ami kisebb amplitúdójú, egyenletesebb axiális hőmérsékletprofilt eredményezett a talajszonda teljes hossza mentén. Ez a megfigyelés összhangban áll a szakirodalomban közölt, több térfogatáram mellett végzett TRT-vizsgálatok eredményeivel [13,127].



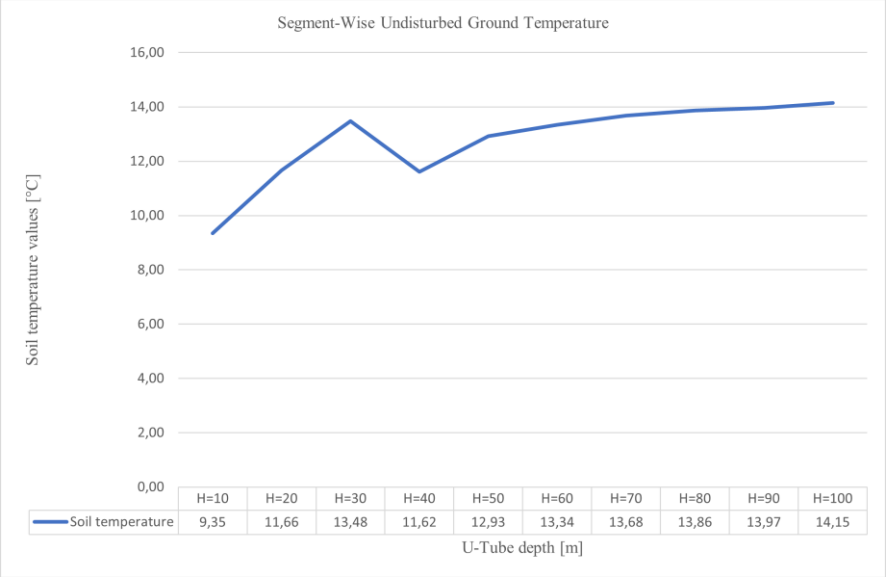
8. ábra: Időben átlagolt előremenő és visszatérő folyadékhőmérsékletek a mélység függvényében, 0,585 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]



9. ábra: Időben átlagolt előremenő és visszatérő folyadékhőmérsékletek a mélység függvényében, 0,815 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

Az aktív mérési fázisokat megelőzően a vizsgált talajszondát hidraulikailag leválasztottam annak érdekében, hogy a rendszer visszatérhessen a természetes geotermikus egyensúlyi állapotához. A keringtetésmentes időszak alatt az U-szondában lévő hőhordozó közeg hőmérséklete fokozatosan kiegyenlítődött a környező talaj hőmérsékletével, ami lehetővé tett egy referencia-hőmérsékletprofil mérést is. A zérus

térfogatáram mellett rögzített, mélységfüggő zavartalan hőmérsékletprofilt a 10. ábra mutatja:



10. ábra: Mélységfüggő zavartalan talajhőmérséklet zérus térfogatáramú, egyensúlyi állapotban, saját szerkesztés [ZV1]

A referencia-hőmérsékletprofil egyértelmű mélységfüggő változásokat mutat, amelyek összhangban vannak a természetes talajrétegződésből adódó hőmérsékleti viszonyokkal [120,121]. Módszertani szempontból ez a profil kiemelt jelentőségű, mivel a numerikus modellezés kezdeti feltételét biztosítja. Emellett lehetőséget ad arra is, hogy a tranziens mérési adatokból származtatott talajhoz kapcsolódó termikus paraméterek fizikai konzisztenciája ellenőrizhető legyen.

A mért egyensúlyi hőmérsékletek és a várható geotermikus gradiens összehasonlítása alapján értékelhetők a maradó érzékelőeltérésekből vagy kalibrációs hibákból eredő esetleges szisztematikus eltérések. A korábban meghatározott, ±0,12 °C nagyságrendű kombinált mérési bizonytalanság figyelembevételével jelentős szisztematikus eltérés nem volt kimutatható. Ez megerősíti a kalibrálási eljárás megbízhatóságát, valamint azt, hogy a kialakított mérőrendszer alkalmas a mélységfüggő hőmérsékletprofilok nagy felbontású rögzítésére és az inverz modellezési eljárások megalapozására.

3 ÜZEMI HŐMÉRSÉKLETADATOKON ALAPULÓ MÉLYSÉGFÜGGŐ HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ-AZONOSÍTÁSA

3.1 Matematikai modell

Ebben a fejezetben azt az időfüggő, szegmensenkénti inverziós modellt mutatom be, amelyet a működő talajszondában mért hőmérséklet-idősorok alapján a talaj effektív hővezetési tényezőjének mélységfüggő meghatározására dolgoztam ki. A modell célja, hogy az üzemi körülmények között rögzített előremenő és visszatérő ági hőmérsékletprofilokból, a folyadékoldali energiamérleg és az időfüggő radiális hővezetési modell összekapcsolásával, szegmensenkénti hővezetési tényezőértékeket határozzon meg.

A modell két fő részfeladatra bontható:

- **Szegmensenkénti folyadékoldali energiamérleg**, amely minden mélységi szegmensre meghatározza az időfüggő vonalmenti hőáramot, $q_i'(t)$, valamint az ehhez tartozó, mérésekből rekonstruált furatfal-hőmérsékletet, $T_i^{\text{meas}}(t)$.
- **Egydimenziós radiális hővezetési modell**, amely a $q_i'(t)$ időfüggő vonalmenti hőáram ismeretében számítja a talaj hőmérsékletválaszát, majd inverz illesztéssel meghatározza az adott szegmenshez tartozó effektív hővezetési tényezőt, λ_i-t.

A módszer lényege, hogy a mért folyadékhőmérsékletekből először a szegmensenkénti vonalmenti hőáram kerül meghatározásra, majd ez a hőterhelés a talajoldali radiális hővezetési modell belső peremfeltételeként jelenik meg. Az így kialakított inverz eljárás lehetővé teszi, hogy a teljes 100 m-es fúrólyukhossz mentén, 10 m-es felbontásban meghatározható legyen a $\lambda(z)$ mélységfüggő effektív hővezetési tényezőprofil.

3.1.1 Folyadékoldali energiamérleg és vonalmenti-hőáram

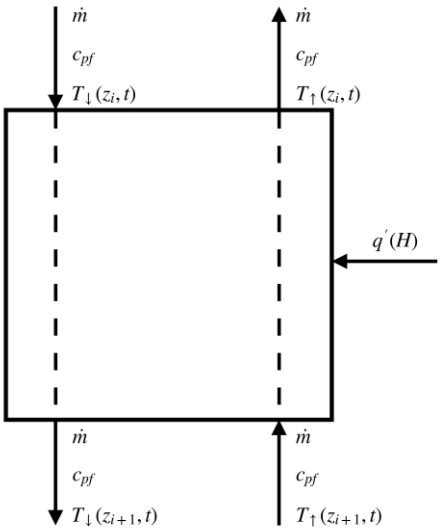
A talajszondát tengelyirányban, az érzékelők mélységi kiosztásának megfelelően, 10 m hosszúságú szegmensekre bontottam. Egy adott z_i és z_{i+1} mélység közötti szegmensben rendelkezésre állnak a lefelé és felfelé áramló csőágakban mért időfüggő hőmérsékletek.

A lefelé áramló, belépő ágban: $T_{\downarrow}(z_i, t), T_{\downarrow}(z_{i+1}, t)$

felfelé áramló, visszatérő ágban: $T_{\uparrow}(z_i, t), T_{\uparrow}(z_{i+1}, t)$

Ez a négy hőmérsékleti idősor egy olyan kontrolltérfogatot határoz meg, amely az adott z_i és z_{i+1} mélységek közötti talajszonda-szegmens folyadékoldali energiamérlegének

felírására alkalmas. A talajszonda szegmensenkénti energiamérlegének sematikus ábrázolását a 11. ábra mutatja.



11. ábra: A talajszonda szegmensenkénti energiamérlegének sematikus ábrázolása, saját szerkesztés [ZV1]

Az i-edik mélységi szegmensben időegység alatt átadott hőteljesítmény a folyadékoldali energiamérleg alapján az alábbi formában írható fel:

$$Q_i(t) = \dot{m} \cdot c_{pf} \cdot \left[\left(T_{\downarrow}(z_i, t) - T_{\downarrow}(z_{i+1}, t)\right) + \left(T_{\uparrow}(z_{i+1}, t) - T_{\uparrow}(z_i, t)\right)\right] \qquad (9)$$

ahol $\dot{m}$ a hőhordozó közeg tömegárama, c_{pf} pedig a hőhordozó közeg fajhője. Az összefüggés azt fejezi ki, hogy a vizsgált szegmensben a lefelé áramló ágban bekövetkező hőmérsékletváltozás és a visszatérő ág hőmérsékletváltozása együttesen határozza meg a szegmens nettó hőcseréjét.

Mivel a jelen vizsgálatban minden szegmens hossza $L_i = 10m$, ezért a szegmensre vonatkozó vonalmenti hőáram:

$$q_i'(t) = \frac{Q_i(t)}{L_i} \left[\frac{W}{m}\right] \qquad (10)$$

Ez a mennyiség jelenik meg a talajoldali radiális hővezetési modell belső peremfeltételeként. A $q_i'(t)$ tehát a mért folyadékhőmérsékletek és a hidraulikai üzemállapot alapján számított időfüggő hőterhelést írja le az adott mélységi szegmensben.

3.1.2 Furatfal-hőmérséklet rekonstrukciója

Az inverziós eljárásban nem közvetlenül a mért folyadékhőmérsékleteket hasonlítjuk össze a talajoldali hővezetési modell eredményével, hanem a folyadékoldali adatokból rekonstruált furatfal-hőmérsékletet. Ehhez először meghatározzuk az i-edik szegmenshez tartozó szegmensátlagolt folyadékhőmérsékletet.

A szegmensátlagolt folyadékhőmérsékletet a lefelé és felfelé áramló ág felső és alsó mérési pontjainak számtani átlagából képezzük:

$$T_{f,i}(t) = \frac{1}{2}\left[\frac{T_{\downarrow}(z_i,t) + T_{\downarrow}(z_{i+1},t)}{2} + \frac{T_{\uparrow}(z_i,t) + T_{\uparrow}(z_{i+1},t)}{2}\right] \tag{11}$$

Ez a mennyiség a szegmensben áramló hőhordozó közeg effektív átlaghőmérsékleteként értelmezhető. A furatfal-hőmérséklet rekonstrukciója ezt követően a furat termikus ellenállásának figyelembevételével történik:

$$T_{w,i}^{\text{meas}}(t) = T_{f,i}(t) - R_b\, q_i'(t) \tag{12}$$

ahol R_b a furat termikus ellenállása, amelyet a referencia TRT-vizsgálatból származó ismert paraméterként kezelünk. Az így kapott $T_{w,i}^{meas}(t)$ mennyiség mérésekből származtatott, úgynevezett „pszeudo" furatfal-hőmérsékletként értelmezhető. Ez a jel szolgál a radiális talajoldali hővezetési modell illesztési referencia-idősoraként.

3.1.3 Irányadó hővezetési egyenlet

Az egyes fúrólyukszegmenseket körülvevő talajtartományt tengelyszimmetrikus, hengeres tartományként modelleztem. A modell a furat sugarától egy külső, termikusan zavartalannak tekintett peremig terjed:

$$r_b \le r \le r_{max} \tag{13}$$

ahol r_b a fúrólyuk sugara, r_{max} pedig a számítási tartomány külső sugara. A r_{max} értékét úgy kell megválasztani, hogy azon a peremen a fúrólyuk által okozott tranziens hőmérsékletváltozás már elhanyagolható legyen.

A talaj tranziens hőmérsékletváltozását az egydimenziós, radiális hővezetési egyenlet írja le:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{14}$$

ahol α a talaj hődiffuzivitása:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho_s c_s} \tag{15}$$

Itt λ a talaj effektív hővezetési tényezője, $\rho_s c_s$ pedig a talaj térfogati hőkapacitása. Az inverz feladatban a λ értéke keresett paraméterként szerepel, míg a térfogati hőkapacitás a modell ismert bemenő adataként kezelhető.

3.1.4 Perem- és kezdeti feltételek

A talajtartomány belső pereme a furatfal, ahol a folyadékoldali energiamérlegből számított hőáram peremfeltételként jelenik meg. Mivel a szegmensenkénti hőterhelés vonalmenti hőáramként adott, a furatfalon érvényes felületi hőáramsűrűség:

$$q''(t) = \frac{q'(t)}{2\pi r_b} \tag{16}$$

Ennek megfelelően a belső Neumann-típusú peremfeltétel:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_b} = q''(t) \tag{17}$$

A külső peremen az adott mélységi szegmenshez tartozó zavartalan talajhőmérsékletet írtam elő:

$$T(r_{\max}, t) = T_{\infty,\mathrm{i}} \tag{18}$$

ahol $T_{\infty,i}$ az i-edik szegmenshez tartozó nyugalmi, keringésmentes állapotból származtatott talajhőmérséklet. A kezdeti feltétel a számítási tartomány teljes radiális kiterjedésében:

$$T(\mathrm{r}, 0) = T_{\infty,\mathrm{i}} \tag{19}$$

Ez feltételesen azt jelenti, hogy a tranziens hővezetési számítás kezdetén a talaj hőmérséklete a vizsgált szegmens környezetében megegyezik a lokális egyensúlyi talajhőmérséklettel. A későbbi hőmérsékletváltozás kizárólag a furatfalon előírt időfüggő hőáram hatására alakul ki.

3.1.5 Perturbációs hőmérséklet bevezetése

A numerikus megoldás egyszerűsítése érdekében bevezettem a perturbációs, vagyis zavarhőmérsékletet:

$$\theta(r,t) = T(r,t) - T_{\infty,\mathrm{i}} \tag{20}$$

Ezzel a külső peremfeltétel homogén Dirichlet-feltétellé egyszerűsödik:

$$\theta(r_{\max},t) = 0 \tag{21}$$

A kezdeti feltétel:

$$\theta(r,0) = 0 \tag{22}$$

A belső peremfeltétel pedig:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} |_{r_b} = q''(t) \tag{23}$$

A perturbációs alak előnye, hogy a numerikus modell a nyugalmi talajhőmérséklethez viszonyított hőmérsékletváltozást számítja. Így a külső és kezdeti feltételek homogénné válnak, miközben a rendszert kizárólag a furatfalon előírt időfüggő hőáram hajtja.

3.1.6 Radiális rács logaritmikus osztása

A radiális számítási tartományt N_r darab rácsponttal diszkretizáltam. A rácspontok logaritmikus elosztása biztosítja, hogy a fúrólyukfal közelében, ahol a hőmérsékletgradiensek a legnagyobbak, sűrűbb rácsfelbontás álljon rendelkezésre, míg a furattól távolabb ritkább rács is elegendő.

A radiális rács:

$$r_1 = r_b, r_2, \dots, r_{Nr} = r_{max} \tag{24}$$

A perturbációs hőmérséklet diszkrét értékeit az alábbi módon definiáltam:

$$\theta_j^n \approx \theta\left(r_j, t_n\right), j = 1, \dots, N_r \tag{25}$$

ahol t_n az n-edik időszintet, r_j pedig a j-edik radiális rácspontot jelöli.

3.1.7 Térbeli diszkretizálás hengerkoordinátában

A belső rácspontokra, vagyis $j = 2, \dots, N_r - 1$ esetén, a radiális hővezetési operátort véges differenciás közelítéssel írtam fel. A kontrolltérfogat-határokhoz tartozó köztes sugarak:

$$r_{j-\frac{1}{2}} = \frac{r_{j-1} + r_j}{2};\ r_{j+\frac{1}{2}} = \frac{r_{j+1} + r_j}{2} \tag{26}$$

A helyi rácstávolságok:

$$\Delta r_{j-1} = r_j - r_{j-1};\ \Delta r_j = r_{j+1} - r_j \tag{27}$$

A hengerkoordinátás radiális diffúziós operátor:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\theta}{\partial r} \tag{28}$$

A kontrolltérfogat-szemléletű véges differenciás közelítés alapján a radiális hővezetési tag az alábbi alakban írható:

$$\alpha\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\theta}{\partial r}\right) \approx \alpha\left[\frac{1}{r_j}\left(\frac{r_{j+\frac{1}{2}}\left(\theta_{j+1} - \theta_j\right)}{\Delta r_j^2} - \frac{r_{j-\frac{1}{2}}\left(\theta_j - \theta_{j-1}\right)}{\Delta r_{j-1}^2}\right)\right] \tag{29}$$

Ez a megfogalmazás a hengerkoordinátás radiális hővezetés véges differenciás közelítésének felel meg, és lehetővé teszi a diszkrét radiális hővezetési operátormátrix felépítését.

3.1.8 Belső perem diszkretizálása

A furatfalnál, vagyis $r = r_b$ helyen érvényes belső fluxus-peremfeltételt elsőrendű véges differenciával közelítettem:

$$-\lambda\frac{\partial\theta}{\partial r}\,|_{r=r_1} \approx -\lambda\frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta r_1} = q_i''(t) \tag{30}$$

Ez lineáris kapcsolatot ad a furatfalhoz tartozó első rácspont, θ_1, és a második rácspont, θ_2, között. A mátrixos numerikus megfogalmazásban ez a kapcsolat a fluxus-peremfeltételt tartalmazó forrásvektorban jelenik meg.

A külső Dirichlet-peremfeltétel:

$$\theta_{Nr} = 0 \tag{31}$$

Numerikusan ez azt jelenti, hogy a rendszermátrix utolsó sorában a főátlón 1 szerepel, a jobb oldali vektor megfelelő eleme pedig 0.

3.1.9 Időbeli diszkretizálás – Crank Nicolson séma

Az időtartományt a mérési időbélyegeknek megfelelően t_n időszintekre bontottam. A változó időlépés:

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \tag{32}$$

A tranziens radiális hővezetési egyenlet időbeli diszkretizálására Crank–Nicolson-sémát alkalmaztam [128]. A módszer a térbeli operátort az időlépés középpontjában értékeli, ezért másodrendű pontosságú időbeli közelítést biztosít.

A perturbációs hőmérsékletmezőre alkalmazva:

$$\frac{\theta^{n+1}-\theta^{n}}{\Delta t_n}=\frac{1}{2}A\theta^{n+1}+\frac{1}{2}A\theta^{n}+B\left(q''(t_n)\right) \tag{33}$$

ahol A, a diszkretizált radiális hővezetési operátormátrix, B pedig a fluxus-peremfeltételt tartalmazó forrásvektor.

Az egyenlet rendezett alakja:

$$\left(I-\frac{\Delta t_n}{2}A\right)\theta^{n+1}=\left(I+\frac{\Delta t_n}{2}A\right)\theta^{n}+\Delta t_n B\left(q''(t_n)\right) \tag{34}$$

ahol I az egységmátrix. Ez minden időlépésben egy lineáris algebrai egyenletrendszer megoldását igényli:

$$\theta^{n+1}=LHS^{-1}\cdot RHS \tag{35}$$

3.1.10 Modellkimenet – Furatfali hőmérséklet

A furatfal a radiális rács első pontjának, vagyis $j=1$-nek felel meg. A modellezett furatfal-hőmérsékletet az első rácspontban számított perturbációs hőmérséklet és az adott szegmenshez tartozó nyugalmi talajhőmérséklet összege adja:

$$T_w^{\mathrm{mod}}(t_n;\lambda)=\theta_1^n+T_\infty \tag{36}$$

Ezt a modellezett furatfal-hőmérsékleti idősorral hasonlítottam össze a (12) egyenlet szerint meghatározott, mérésekből rekonstruált „pszeudo” furatfal-hőmérséklettel, $T_{w,i}^{meas}(t_n)$.

3.1.11 A talaj hővezetési tényezőjének becslése

Minden mélységi szegmensre külön inverz feladatot oldottam meg. Az i-edik szegmensre az illesztési hibafüggvény az alábbi alakban írható:

$$J_i(\lambda_i)=\sum_{n=1}^{N_t}\left[T_{w,i}^{\mathrm{meas}}(t_n)-T_{w,i}^{\mathrm{mod}}(t_n;\lambda)\right]^2 \tag{37}$$

ahol N_t az időlépések száma. Az i-edik szegmenshez tartozó effektív hővezetési tényezőt az alábbi optimalizálási feladat megoldásával határoztam meg:

$$\lambda_i = arg \min_{\lambda \in [\lambda_{min},\ \lambda_{max}]} J_i(\lambda_i) \tag{38}$$

A gyakorlatban az optimalizáció egydimenziós, korlátos minimalizálási eljárással végezhető el minden szegmensre külön. Az így kapott λ_i értékek az egyes mélységi szegmensek effektív hővezetési tényezőit képviselik. Ezek a nyers szegmensértékek a mérési zaj, a kis hőmérséklet-különbségek és a modellérzékenység miatt lokális oszcillációkat mutathatnak, ezért a mélység szerinti profil értelmezéséhez regularizáció alkalmazása szükséges.

3.1.12 Simítás mélység mentén – Regularizáció

Annak érdekében, hogy a rekonstruált mélységfüggő hővezetési tényezőprofil fizikailag értelmezhető maradjon, Tikhonov-típusú regularizációt alkalmaztam [129,130]. A simítás az alábbi lineáris rendszer megoldásával végezhető el:

$$(\mathrm{I} + \beta \mathrm{L})\, \lambda_{\mathrm{smooth}} = \lambda \tag{39}$$

ahol λ az egyedileg invertált szegmensenkénti hővezetési tényezők vektora, λ_{smooth} a simított hővezetési tényezőprofil, L a mélység menti diszkrét Laplace-operátor, β pedig a regularizáció erősségét szabályozó pozitív simítási paraméter.

Amennyiben,

$\beta = 0$ esetén a simítás nélküli megoldásnak felel meg, tehát $\lambda_{\mathrm{smooth}} = \lambda$.

$\beta > 0$ esetén a nagy mélységirányú oszcillációk csillapodnak, miközben a profil fő mélységi trendjei megmaradnak.

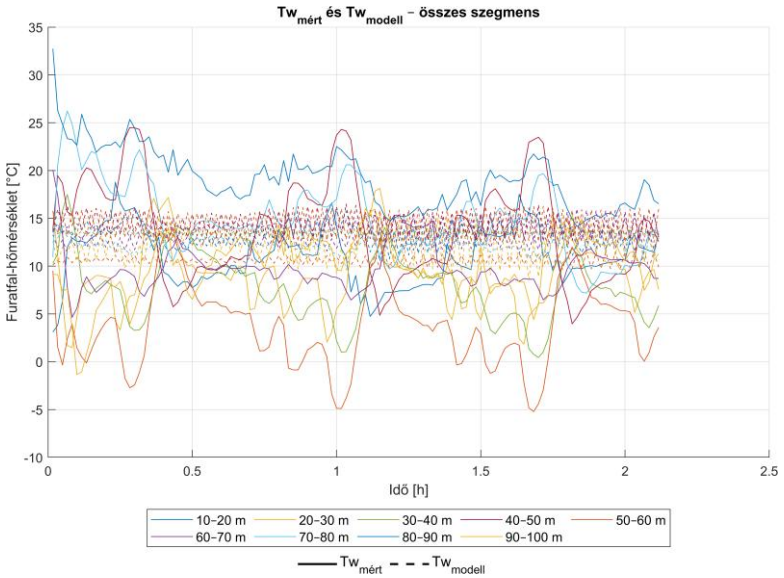
A β értékét úgy kell megválasztani, hogy a mért és modellezett furatfal-hőmérsékletek közötti egyezés elfogadható maradjon, ugyanakkor a kapott $\lambda(z)$ profil ne tartalmazzon mérési zajból vagy numerikus érzékenységből eredő, fizikailag nem indokolt ingadozásokat.

3.2 A módszer eredményeként előálló mélységfüggő hővezetési tényezőprofil

Az inverziós eljárás megbízhatóságának értékeléséhez első lépésként a modell által számított furatfal-hőmérsékleteket, T_w^{mod}, hasonlítottam össze a mérésekből rekonstruált „pszeudo” furatfal-hőmérsékletekkel, T_w^{meas}. A furatfal-hőmérséklet időbeli alakulásának megfelelő visszaadása alapvető feltétele a szegmensenkénti inverzió

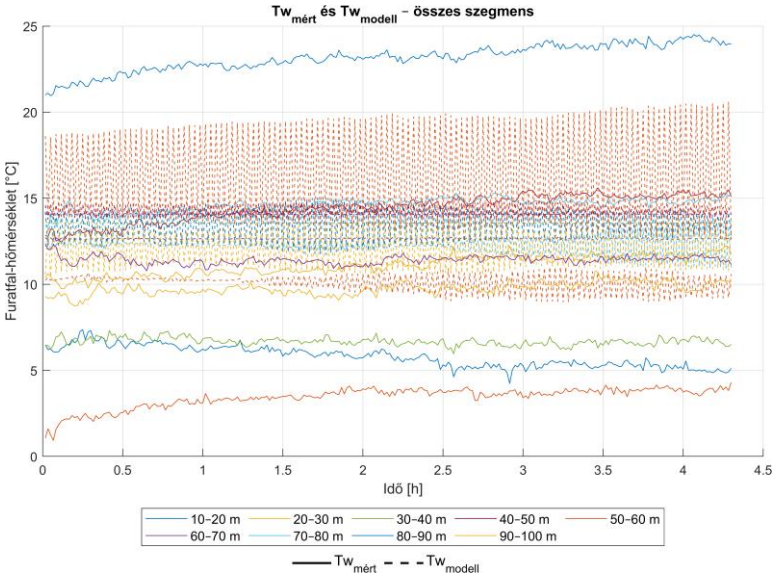
érvényességének, mivel a mélységfüggő $\lambda(z)$ profil meghatározása közvetlenül a T_w furatfal-hőmérsékleti válasz és a $q_i'(t)$ vonalmenti hőáram időbeli kapcsolatára épül.

Az alacsonyabb térfogatáramú mérésnél, $0{,}585\ \mathrm{m^3/h}$ esetén, a rekonstruált furatfal-hőmérsékleti jel jelentősebb ingadozásokat mutatott. Ez elsősorban az alacsonyabb tömegáramból, a kisebb hőmérséklet-különbségekből és az ebből következő kedvezőtlenebb jel–zaj viszonyból adódott. A modell ennek ellenére képes volt követni a mért adatok általános időbeli trendjét, így a furatfal-hőmérsékleti válasz fő dinamikája visszaadható volt. Ugyanakkor ebben az üzemállapotban a rövid idejű ingadozások miatt a szegmensenkénti λ_i értékek értelmezése fokozott óvatosságot igényel. A mért és modellezett furatfal-hőmérsékletek összehasonlítását a 12. ábra mutatja.



12. ábra: A mért és modellezett fúrólyukfal-hőmérsékletek, T_w^{meas} és T_w^{mod} összehasonlítása 0,585 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

A nagyobb térfogatáramú mérésnél, $0{,}815\ \mathrm{m^3/h}$ esetén, a T_w^{meas} idősor lényegesen stabilabbá vált, és a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek megbízhatóbban voltak felbonthatók. A nagyobb hidraulikai terhelés csökkentette a rövid idejű termo-hidraulikai ingadozások relatív hatását, és simább $q_i'(t)$ vonalmenti hőáram-idősorokat eredményezett. Ennek következtében a modell és a mérések közötti egyezés kedvezőbb volt, ami a szegmensenkénti inverzió stabilitását is javította. A mért és modellezett furatfal-hőmérsékletek összehasonlítását a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra: A mért és modellezett fúrólyukfal-hőmérsékletek, T_w^{meas} és T_w^{mod} összehasonlítása 0,815 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

A két üzemi feltétel összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a modell mindkét térfogatáram esetén képes volt a furatfal-hőmérséklet fő időbeli változásait visszaadni. A mélység szerint felbontott inverzió azonban elsősorban akkor tekinthető megbízhatóan értelmezhetőnek, ha a hidraulikai terhelés kellően nagy ahhoz, hogy a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek a mérési zajhoz képest megfelelően nagyok legyenek. Ennek megfelelően az alacsonyabb térfogatáramú mérés inkább a módszer működőképességének ellenőrzésére és összehasonlító értékelésére alkalmas, míg a nagyobb térfogatáramú mérés stabilabb alapot ad a $\lambda(z)$ profil mélységi értelmezéséhez.

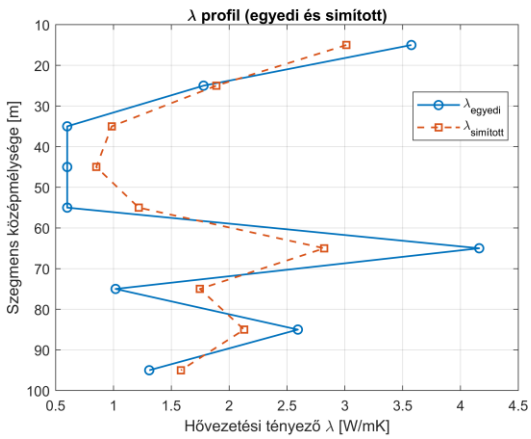
3.2.1 Szegmensenkénti hővezetési tényezőprofil

A szegmensenkénti inverziós eljárást a terepen rögzített hőmérséklet-idősorokra alkalmaztam, 10 m-es vertikális felbontással. A módszer alapján a folyadékoldali energiamérlegből számított $q_i'(t)$ vonalmenti hőáram, valamint a radiális hővezetési modell illesztése segítségével minden mélységi szegmensre külön effektív hővezetési tényező, λ_i, határozható meg. Az inverziót külön elvégeztem az alacsonyabb, $0{,}585\ \mathrm{m^3/h}$, valamint a nagyobb, $0{,}815\ \mathrm{m^3/h}$ térfogatáramú mérési sorozatokra, így közvetlenül vizsgálhatóvá vált a hidraulikai terhelés becsült λ_i értékekre gyakorolt hatása.

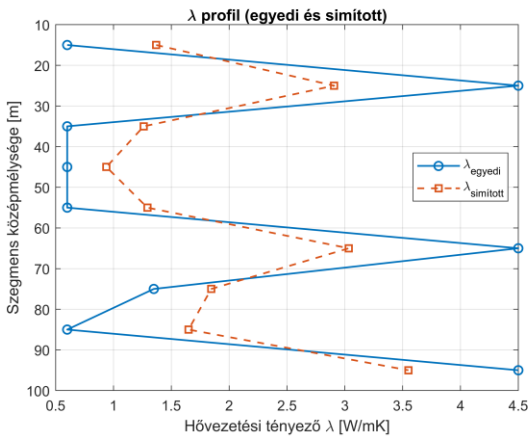
Az alacsonyabb térfogatáram mellett kapott eredmények jelentős mélységirányú szórást mutattak. A nyers, szegmensenkénti λ_i értékek erőteljes ingadozásai elsősorban a csőágak mentén fellépő kis hőmérséklet-különbségekre, valamint a mérési zaj és az inverziós eljárás érzékenységének együttes hatására vezethetők vissza. Ezt szemlélteti a 14. ábra,

amelyen jól látható, hogy az egyedi λ_i értékek mélység szerint erősen ingadoznak, és a simított λ_{smooth} profil is csak korlátozottan rajzol ki egyértelmű mélységi trendet. A Tikhonov-típusú regularizáció [129,130] csökkentette a nagy amplitúdójú, fizikailag kevésbé indokolható oszcillációk egy részét, ugyanakkor az adatok korlátozott stabilitása miatt a kapott profil csak részben értelmezhető kvantitatív mélységi hővezetési tényezőprofilként. A simított λ_{smooth} görbe megközelítőleg 1,3–4,0 W/mK tartományban változott, de a mélységi trend kevésbé volt egyértelmű, és a szomszédos szakaszok közötti átmenetek nem minden esetben utaltak jól elkülöníthető rétegtani határra.

Ezzel szemben a nagyobb térfogatáramnál kapott eredmények lényegesen stabilabbak és fizikai szempontból jobban értelmezhetők voltak. A nagyobb hidraulikai terhelés kedvezőbb jel–zaj viszonyt biztosított, mivel a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek jobban felbonthatók voltak. Ennek következtében a rekonstruált $q_i'(t)$ jel simábbá vált, az egyedi λ_i értékek szórása csökkent, a simított λ_{smooth} profil pedig szűkebb, megközelítőleg 1,5–2,8 W/mK tartományban maradt. Ezt a 15. ábra szemlélteti, ahol a nagyobb térfogatáram mellett meghatározott hővezetési tényezőprofil kiegyenlítettebb lefutást mutat, és a simított görbe alapján a mélység szerinti változás stabilabban értelmezhető.



14. ábra: Az inverziós eljárással kapott simított hővezetési tényező profil, λ_{smooth}, 0,585 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]



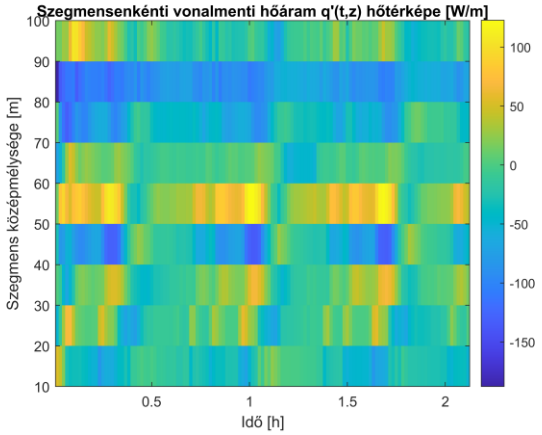
15. ábra: Az inverziós eljárással kapott simított hővezetési tényező profil, λ_{smooth}, 0,815 m³/h térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

A nagyobb térfogatáramú mérés alapján meghatározott profil több olyan mélységi intervallumot jelölt ki, ahol következetes hővezetési mintázatok figyelhetők meg. A két térfogatáram eredményei ugyanakkor bizonyos szakaszokon jelentősen eltértek egymástól, ami az inverziós módszer hidraulikai terhelésre való érzékenységét is jelzi.

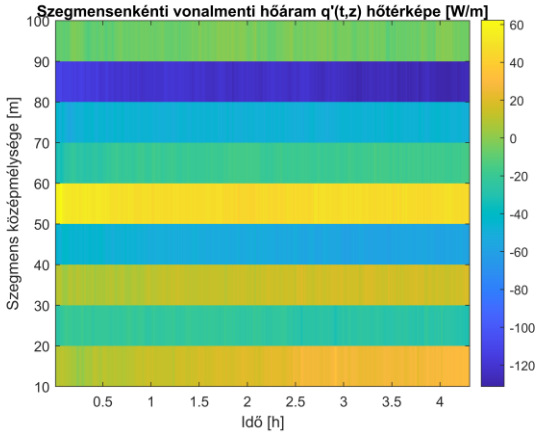
- **10-20 m mélység:** a két térfogatáram alapján becsült λ-értékek jelentősen különböztek egymástól. Ez arra utal, hogy a sekély zónában az inverzió érzékeny lehet a kis hőmérsékletgradiensekre, a felszínközeli termikus hatásokra, valamint a hidraulikai feltételekre. A kisebb λ-érték homokos-iszapos fedőréteggel hozható összefüggésbe, míg a magasabb érték értelmezése fokozott óvatosságot igényel.
- **20-30 m mélység:** a mérsékelten közepes vagy magasabb λ-értékek jelentek meg, amelyek durvább szemcséjű, homokos vagy iszapos-homokos, esetleg vízzel telítettebb réteg jelenlétére utalhatnak.
- **30-60 m mélység:** mindkét térfogatáram esetén alacsonyabb vagy közepes λ-értékek adódtak, ami finomszemcsés, agyagos-iszapos pleisztocén üledéksor jelenlétével hozható összefüggésbe. Ez a mélységtartomány a két hidraulikai terhelés összehasonlításában a leginkább belsőleg konzisztens szakasznak tekinthető.
- **60-70 m mélység:** a λ-értékek egyértelmű növekedése figyelhető meg, amely magasabb hővezetési tényezőjű, durvább szemcséjű, homokos-kavicsos rétegre utalhat.
- **70-90 m mélység:** a hővezetési tényező közepesen magas értékei túlnyomórészt homokos vagy iszapos-homokos, jó víztelítettségű egység jelenlétével hozhatók kapcsolatba.
- **90-100 m mélység:** a két térfogatáram eredményei ismét jelentősebben eltértek egymástól, ami arra utal, hogy a furat legmélyebb részén a hőmérsékletgradiens csökkenése és a hőfluxus-rekonstrukció érzékenysége befolyásolhatja a becsült λ_i értékeket.

A két térfogatárammal végzett eset összehasonlítása a számított hőtérképeken is jól megfigyelhető. Az alacsonyabb, $0{,}585\ m^3/h$ térfogatáram esetén a rekonstruált hőáram-idősor jelentősebb zajt tartalmazott, ami az inverziós eljárásban instabilitást okozott, és egyenetlenebb, szórtabb hőtérképmintázatot eredményezett. Ezt a viselkedést a 16. ábra szemlélteti, ahol a szegmensenként rekonstruált vonalmenti hőáram értékei időben és mélység szerint is erőteljesebb ingadozást mutatnak. A kisebb hőmérséklet-különbségek következtében a mérési zaj hatása felerősödik a szegmensenkénti hőáram-rekonstrukció során, ezért az eredő hőtérkép kevésbé sima, valamint nehezebben értelmezhető. Ez alapján az alacsonyabb térfogatáramú mérési eset eredményeit elsősorban összehasonlító vagy kvalitatív jelleggel célszerű kezelni.

A nagyobb, 0,815 m^3/h térfogatáram esetén a hőmérséklet-gradiensek erőteljesebbek, a rekonstruált hőáramjel stabilabb, és a hőtérkép koherensebb mintázatot mutat. Ezt a 17. ábra szemlélteti, ahol a mélység szerinti hőáram-eloszlás egyértelműbb, kevésbé zajos szerkezetet rajzol ki. Ez megerősíti, hogy a megfelelő hidraulikai terhelés alapvető feltétele a hővezetési tényező stabil, szegmensenkénti inverziójának.



16. ábra: A szegmensenként számított vonalmenti hőáram hőtérképe 0,585 m^3/h *térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]*



17. ábra: A szegmensenként számított vonalmenti hőáram hőtérképe 0,815 m^3/h *térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]*

Az eredmények alapján a javasolt módszer alkalmas mélység szerint felbontott hővezetési tényezőprofil előállítására. Kellően nagy térfogatáram mellett a rekonstruált $\lambda(z)$ profil támogatja a lokális geológiai rétegződés mérnöki értelmezését, és kiegészítő információt ad a geotermikus fúrólyukmodellezéshez. Az alacsony térfogatáramú eredményeket ugyanakkor elsősorban összehasonlító vagy kvalitatív jelleggel célszerű kezelni.

A 4. táblázat az egyes mélységi intervallumokra meghatározott, simított hővezetési tényezőket, az összehasonlítás alapjául szolgáló szakirodalmi hővezetési tartományokat, valamint a hozzájuk kapcsolódó mérnöki-geológiai értelmezést foglalja össze. A szakirodalmi tartományok talaj- és kőzettípusokra vonatkozó hőfizikai adatokon, valamint áttekintő tanulmányokon alapulnak [11,18–20].

4. Táblázat: A két térfogatáram mellett kapott simított szakaszonkénti hővezetési tényező értékek (λ_{smooth}) összehasonlítása a szakirodalmi tartományokkal és a furat menti geológiai értelmezéssel.

Mélység $[m]$	$\lambda_{smooth\text{-}0,585}$ $[W/mK]$	$\lambda_{smooth\text{-}0,815}$ $[W/mK]$	**Irodalmi λ** $[W/mK]$	**Értékelés**
10–20	3,06	1,37	Homokos kavics: 2.0–4.0 Lösz / száraz homok: 0.4–2.0	A két áramlás különbsége jelentős; magas λ (3.06) inkább kavicsos–homokos zónára utal, de a magas térfogatáramnál kapott 1.37 W/mK reálisabb → homokos–iszapos fedőréteg.

20-30	1,96	2,91	Homok, iszapos homok: 1.2–2.4 Kavicsos homok: 2.0–3.0	Stabilan magas λ a magasabb térfogatáramnál → durvább szemcsés, vízzel teltebb homokos réteg.
30-40	1,01	1,26	Agyag: 0.5–1.3 Iszapos-löszös üledék: 0.7–1.5	Jellegzetesen alacsony → agyagos–iszapos réteg, jó egyezés mindkét mérésben.
40-50	0,86	0,94	Agyag, iszap:0.5-1.3	Egyenletesen alacsony λ, kis különbség → finomszemcsés agyagos zóna.
50-60	1,25	1,29	Nedves homok:1.3–2.0 Agyagos homok: 1.0–1.5	Közepes λ → átmeneti agyagos–homokos réteg, vízzel teltebb.
60-70	2,92	3,03	Homokos kavics: 2.0–4.0	Markáns λ-emelkedés → kavicsos, durva szemcsés, jó vízvezető réteg.
70-80	1,77	1,85	Nedves homok: 1.3–2.4	Közepesen magas λ → homokos–iszapos átmeneti réteg, a kavicsos zóna fölött.
80-90	2,17	1,65	Homokos kavics: 2.0–4.0 Nedves homok: 1.3–2.4	Két áramlás eredménye eltér → váltakozó szemcseméretű homok–kavics keverék, heterogén zóna.
90-100	1,70	3,55	Kavicsos homok: 2.0–4.0 Nedves homok: 1.3–2.4	A nagy térfogatáram esetén extrém magas λ → kavicsos, nagy permeabilitású zóna, alacsony térfogatáram esetén a hőmérséklet-gradiens torzít → nagy λ-szórás.

A 10–20 m-es és a 90–100 m-es közötti rétegekben megfigyelt különbségek elsősorban a hidraulikai és termikus peremfeltételek, valamint a hőáram-számítás alacsony hőmérsékletgradiensű körülmények közötti érzékenységének tulajdoníthatók. Alacsonyabb térfogatáram mellett a $q_i'(t)$ jel zajosabbá válik, ami egyes sekély és mély szakaszokon nagyobb szóráshoz vezethet. A nagyobb térfogatáramú profil ezzel szemben több mélységi rétegben stabilabb és fizikailag konzisztens eredményt adott. A magasabb térfogatáram mellett rekonstruált hővezetési tényezők jobban illeszkedtek az azonosított geológiai rétegekhez rendelhető szakirodalmi hővezetési tartományokhoz.

3.3 Az 1. tézis megfogalmazása

Kidolgoztam egy in-situ, szegmensenkénti inverz azonosítási módszert U-csöves talajszondák mélységfüggő effektív hővezetési tényezőprofiljának meghatározására. Az eljárás 10 m-es vertikális felbontású tranziens hőmérsékletmérésekből, folyadékoldali energiamérleg alapján számított vonalmenti hőáram és egydimenziós radiális hővezetési modell illesztésével becsüli a szegmensenkénti λ_i értékeket. A

módszer a klasszikus TRT-vel szemben nem átlagos, hanem mélység szerint felbontott hővezetési információt szolgáltat.
Kapcsolódó publikációk: [ZV1]

4 A MÉLYSÉGFÜGGŐ HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ-AZONOSÍTÁS TRT-VALIDÁCIÓJA ÉS ALKALMAZHATÓSÁGI FELTÉTELEI

4.1 Referencia TRT-vizsgálat bemutatása

A termikus választeszt, azaz a TRT-vizsgálat elvégzésére a fúrólyukmező terepi létesítésének időszakában került sor. A mérés ugyanazon a 100 m mélységű, U-csöves talajszondán történt, amelynek geometriai és szerkezeti jellemzői a 2. fejezetben kerültek ismertetésre. Ennek megfelelően a TRT-eredmények közvetlen összehasonlítási alapként használhatók fel a későbbiekben bemutatott, üzemi hőmérsékletadatokon alapuló szegmensenkénti inverziós módszer értékeléséhez.

A TRT-vizsgálat 2023. január 20-án 14:00-kor kezdődött, és 67,67 órán keresztül tartott. A mérés 2023. január 23-án 09:40-kor fejeződött be. A vizsgálat során alkalmazott hőbetáplálási teljesítmény állandó, 4,65 kW volt. A mérési időtartam és a közel állandó hőterhelés alapján megfelelő feltételek álltak rendelkezésre a talaj effektív hővezetési tényezőjének, valamint a furat-termikus ellenállásnak a meghatározásához.

A TRT-vizsgálat fő üzemi feltételei a következők voltak:

Mérés kezdete: 2023.01.20., 14:00

Mérés vége: 2023.01.23., 09:40

Mérési időtartam: 67,67 h

A mérés során alkalmazott fűtési teljesítmény: 4655 W

A termikus választesztek kiértékelésére legszélesebb körben alkalmazott eljárás a Kelvin-féle analitikus vonalforrás-modell, amely több évtizede a TRT-adatfeldolgozás elméleti alapját képezi [97,131–133]. A modell feltételezi, hogy a fúrólyuk által a talajra kényszerített hőterhelés egy végtelen hosszú vonalhőforrásból származik, amely homogén, izotróp és oldalirányban határtalan talajtartományba van ágyazva. E feltételezések mellett a talaj hőmérsékletválasza analitikus formában írható le, amely

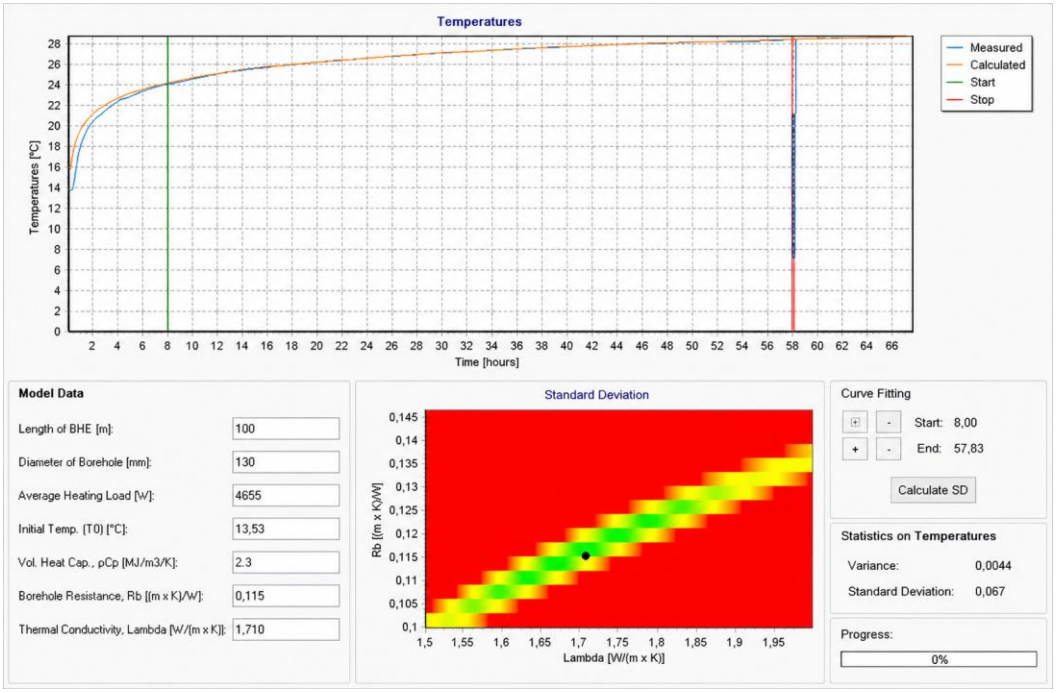
lehetővé teszi az effektív hővezetési tényező és a furat-termikus ellenállás meghatározását.

A mért hőmérsékletadatok feldolgozása a GeRT-CAL 3.3.6 szoftver alkalmazásával történt [134,135]. A kiértékelési eljárás során az átlagolt belépő és kilépő hőmérsékletekből számított hőmérséklet-emelkedés logaritmikus idő szerinti ábrázolása után a stabil logaritmikus tartományra lineáris regressziós illesztés készült. Az illesztett egyenes meredeksége és tengelymetszete alapján, a klasszikus vonalforrás-modell alkalmazásával, meghatározható a talaj effektív hővezetési tényezője és a furat-termikus ellenállása [97,131,132].

A regresszió megbízhatóságának növelése érdekében a szoftver automatikusan azonosította az optimális kiértékelési időablakot, figyelembe véve a nemzetközi TRT-eljárásokban előírt minimális időkövetelményeket [99,134]. Ez lehetővé tette a korai tranziens szakasz kizárását, amely a paraméterbecslést torzíthatná. A kiértékelés lépésenként bővített időablakos eljárással történt, vagyis a regresszió fokozatosan hosszabb átlagolási intervallumokon került alkalmazásra. Ezzel biztosítható, hogy az illesztés a közel állandósult, logaritmikus hőmérséklet-emelkedési tartományra korlátozódjon, ami a vonalforrás-modellen alapuló TRT-kiértékelés érvényességének alapfeltétele [136].

A feldolgozott hőmérséklet-idő adatok egyértelmű logaritmikus hőmérséklet-emelkedést mutattak, ami összhangban van a klasszikus vonalforrás-modell feltételezéseivel. Ez megerősíti a TRT-mérés stabilitását, valamint a lineáris regressziós megközelítés alkalmazhatóságát. A GeRT-CAL szoftverrel végzett kiértékelés alapján meghatároztam a fúrólyuk két kulcsfontosságú termikus paraméterét: a talaj effektív hővezetési tényezőjét, λ_{eff}-et, valamint a furat-termikus ellenállást, R_b-t.

A paraméterillesztési térkép a mért és modellezett hőmérsékletválaszok közötti legkisebb eltéréshez tartozó optimális paraméterpárt azonosítja. Ezt szemlélteti a 18. ábra, amely a GeRT-CAL szoftverrel végzett illesztés eredményét mutatja be: felül a mért és számított hőmérséklet-idősorok összehasonlítása, alul pedig a λ és R_b paraméterekhez tartozó szóráseloszlás látható. A térképen megjelenő minimumtartomány jól meghatározott, ami a mérési adatkészlet jó minőségére és a regresszió alacsony bizonytalanságára utal. A végső TRT-paramétereket a 5. táblázat foglalja össze.



18. ábra: A GeRT-CAL szoftverrel generált paraméterillesztési térkép, saját szerkesztés [ZV1]

5. táblázat: A TRT-ből származtatott termikus paraméterek összefoglalása.

Effektív hővezetési tényező $\lambda_{\mathbf{eff}}$	**Furat-termikus ellenállás** R_b	**Kezdeti zavartalan talajhőmérséklet** T_0
1.71 W/mK	0.115 mK/W	13.53 °C

A kapott értékek összhangban vannak a helyszín várható termikus viselkedésével, és megbízható referenciaalapot biztosítanak a további numerikus modellezéshez, valamint a mélység szerint felbontott üzemi mérési eredményekkel való összehasonlításhoz.

4.2 Energia-súlyozott λ_{eff} meghatározása a szegmensenkénti $\lambda(z)$ profilból

A szegmensenkénti inverziós eljárás eredményeként mélység szerint változó hővezetési tényezőprofil, $\lambda(z)$, áll elő. A standard TRT-vizsgálat ezzel szemben a teljes fúrólyukhosszra vonatkozó, egyetlen effektív hővezetési tényezőt szolgáltat. A kétféle kiértékelés közvetlen összehasonlíthatósága érdekében ezért olyan aggregált mutató bevezetése szükséges, amely a szegmensenként meghatározott hővezetési tényezőket az adott szegmensek hőtechnikai hozzájárulásával arányosan veszi figyelembe. Ennek megfelelően a simított szegmensértékekből, $\lambda_{smooth,i}$-ből, energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőt definiáltam.

Első lépésként meghatároztam az egyes szegmensekhez tartozó, egységnyi furathosszra vonatkoztatott időintegrált hőterhelést:

$$E_i = \int |q_i'(t)|\, dt \tag{40}$$

ahol, $q_i'(t)$ az i- edik szegmens időfüggő vonalmenti hőárama. Az abszolút érték alkalmazása azért indokolt, mert a súlyozás célja nem az előjeles energiamérleg meghatározása, hanem annak figyelembevétele, hogy az adott szegmens milyen mértékben vett részt a vizsgált időszakban lezajló hőátadási folyamatban. Ezáltal a súlyozás függetlenné válik attól, hogy az adott időpillanatban a hőáram iránya hőfelvételt vagy hőleadást jelez.

A szegmensekhez tartozó súlytényezők ezt követően az időintegrált hőterhelések normalizálásával adhatók meg:

$$w_i = \frac{E_i}{\sum_j E_j} \tag{41}$$

ahol w_i az i-edik szegmens energiaarányos súlytényezője. A normalizálás biztosítja, hogy a súlyok összege egységnyi legyen, így az egyes szegmensek a teljes vizsgált hőátadási folyamatban betöltött relatív szerepük szerint járulnak hozzá az aggregált hővezetési tényezőhöz.

A normalizált súlyok felhasználásával az energia-súlyozott effektív hővezetési tényező az alábbi alakban számítható:

$$\lambda_{\text{eff}} = \sum_i w_i\, \lambda_{\text{smooth},i} \tag{42}$$

Ez az aggregált érték konzisztens összehasonlítást tesz lehetővé a nagy felbontású, szegmensenkénti inverziós eredmények és a szabványos TRT-ből kapott, teljes furathosszra vonatkozó effektív hővezetési tényező között.

4.3 A TRT és az inverziós módszer eredményeinek összehasonlítása

A szegmensenkénti inverziós módszerrel kapott eredményeket a vizsgált fúrólyukon korábban elvégzett referencia TRT teszt eredményeivel hasonlítottam össze.

A két módszer összehasonlítását a 6. táblázat foglalja össze. A táblázat a hagyományos TRT-ből származtatott effektív hővezetési tényezőt, valamint a szegmensenkénti

inverzióból képzett energia-súlyozott λ_{eff} értékeket tartalmazza mindkét vizsgált térfogatáram esetére.

6. táblázat: A TRT-ből és a szegmensenkénti inverzióból származtatott effektív hővezetési tényezők összehasonlítása.

Módszer	Hőterhelés	Üzemi feltétel	λ [W/mK]	Eltérés a TRT-től [%]
TRT (referencia)	állandó q'	1.852 m³/h	1.71	-
Szegmensenkénti inverzió	$q'(t)$	0.585 m³/h	1.73	+1.2
Szegmensenkénti inverzió	$q'(t)$	0.815 m³/h	1.68	-1.6

Az összehasonlítás alapján megállapítható, hogy a szegmensenkénti inverziós eljárással képzett energia-súlyozott effektív hővezetési tényező mindkét vizsgált térfogatáram esetében szoros egyezést mutatott a TRT-ből származó referenciaértékkel. Az eltérés egyik esetben sem haladta meg a ±2%-ot, így a különbség a talajhőcserélő-vizsgálatokra jellemző mérési és modellbizonytalanságok nagyságrendjén belül maradt. Az eredmények alapján az üzemi állapotban, időben változó vonalmenti hőáramra épülő inverziós eljárás alkalmasnak tekinthető a teljes furathosszra vonatkozó effektív hővezetési tényező TRT-vel összemérhető pontosságú meghatározására. Ez különösen azért lényeges, mert az üzemi mérési adatokból származtatott hőterhelés nem állandó, hanem a rendszer pillanatnyi működési állapotától függően időben változik.

A két térfogatáram mellett kapott eredmények közötti különbségek fizikai okokkal magyarázhatók. Alacsonyabb térfogatáramnál a keringtetett folyadék tömegárama és az adott szegmensben mérhető hőmérséklet-különbségek kisebbek. Ennek következtében a számított hőáram-idősor érzékenyebbé válik a mérési zajra, ami lokálisan torzíthatja a szegmensenkénti λ_i becsléseket. Nagyobb térfogatáramnál a hőmérséklet-különbségek jobban felbonthatók, a $q'(t)$ jel időbeli alakulása simább, és a becsült λ_i értékek stabilabbá válnak.

Az a tény, hogy a módszer mindkét térfogatáram esetében szűk tartományon belül reprodukálta a TRT-ből származó effektív hővezetési tényezőt, alátámasztja az eljárás aggregált szintű megbízhatóságát. A módszer ugyanakkor többletinformációt is szolgáltat, hiszen a TRT-vel szemben nem csak egyetlen integrált paramétert ad meg,

hanem a furat menti hővezetési tulajdonságok mélység szerinti változását is képes jellemezni.

Fontos megjegyezni, hogy az összehasonlítást annak figyelembevételével kell értelmezni, hogy a jelen inverziós keretrendszer a TRT-ből származó R_b furat-termikus ellenállást bemenő paraméterként használja, és azt nem önállóan becsüli. Ez azt jelenti, hogy a módszer jelen formájában nem teljesen független a TRT-től, hanem annak referenciaértékére építve egészíti ki a klasszikus TRT-eredményt mélység szerint felbontott hővezetési információval.

További modellezési korlát, hogy a jelen megfogalmazás vezetésdominált, radiális hőátadást feltételez egyetlen talajszonda körül. A modell nem kezeli explicit módon a talajvíz advektív hőszállítását, a környező talaj axiális hővezetését vagy a szomszédos szondák közötti termikus interferenciát. Ezért vízadókkal érintett környezetben vagy sűrűn kiosztott szondamezőkben a rekonstruált $\lambda(z)$ profil effektív, látszólagos hővezetési profilként értelmezendő, amely a lokális vezetéses tulajdonságok mellett fel nem bontott advektív vagy háromdimenziós hatásokat is tartalmazhat.

4.4 A furat-termikus ellenállás R_b hatásának vizsgálata

A furat-termikus ellenállás, R_b, a radiális hővezetési modell egyik meghatározó bemenő paramétere, mivel közvetlenül befolyásolja a folyadékhőmérsékletekből rekonstruált furatfal-hőmérsékletet. Az inverziós eljárás során a szegmensenkénti hővezetési tényező meghatározása a mért folyadékhőmérsékletek, a számított vonalmenti hőáram és a furatfal-hőmérséklet kapcsolatán alapul. Ebből következően az R_b bizonytalansága különösen fontos akkor, ha a hőmérséklet-különbségek kicsik, például alacsony térfogatáramú üzemállapotban.

Az R_b érzékenység vizsgálatához a referencia TRT-ből származó R_b értéket ±10%-kal módosítottam, majd mind az alacsonyabb, mind a nagyobb térfogatáramú mérési sorozat esetében újraszámítottam a rekonstruált $\lambda(z)$ profilokat és az energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőket. Az eredményeket az 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: Az R_b módosításának hatása a rekonstruált effektív hővezetési tényezőre.

R_b módosítása	**λ_{eff} – 0,585 m³/h** $[W/mK]$	**Eltérés** [%]	**λ_{eff} – 0,815 m³/h** $[W/mK]$	**Eltérés** [%]
Eredeti R_b	1.73	-	1.73	-
+10%	1.51	-13	1.61	-5

-10%	1.99	+15	2.05	+18

A furat-termikus ellenállás közvetlenül befolyásolja a furatfal-hőmérséklet rekonstrukcióját. Ha R_b értéke nő, a folyadék és a furatfal közötti hőmérséklet-esés nagyobbá válik, ezért az inverz modell alacsonyabb λ_i értékeket rendelhet az egyes szegmensekhez. Ezzel szemben R_b csökkentése hatékonyabb hőátadást feltételez a furatfal irányába, ami magasabb rekonstruált hővezetési tényezőkhöz vezethet.

Az érzékenységvizsgálat alapján az R_b változtatása elsősorban a $\lambda(z)$ profil amplitúdóját módosította, miközben a profil fő mélységi trendjei mindkét üzemi feltétel mellett nagyrészt megmaradtak. Ez azt jelzi, hogy megfelelő jel–zaj viszony esetén az R_b mérsékelt bizonytalansága nem írja felül a mélység szerinti trendeket, ugyanakkor az abszolút λ_i értékek nagyságára érdemi hatással lehet.

- **Alacsonyabb térfogatáramnál** az R_b változtatás hatása erősebbnek bizonyult, mivel a kisebb hőmérséklet-különbségek miatt az inverziós feladat érzékenyebbé válik a bemenő paraméterek bizonytalanságaira.
- **Nagyobb térfogatáramnál** a hőmérsékletgradiensek jobban felbonthatók, ezért az R_b bizonytalanságának relatív hatása mérsékeltebb. Az eredmények alapján a szegmensenkénti inverziós módszer még bizonytalan R_b esetén is képes megőrizni a fő mélységi trendeket, de megbízható kvantitatív értelmezéshez az R_b független meghatározása vagy pontos becslése továbbra is szükséges.

Mivel a jelen megvalósítás a TRT-ből származó R_b értéket használja bemenő paraméterként, a jövőbeni fejlesztések egyik fontos iránya az R_b önálló becslése, illetve az R_b és a szegmensenkénti hővezetési tényezők együttes inverziója lehet.

4.5 A radiális rácsfelbontás hatása

A radiális rácsfelbontás a hengeres hővezetési modell numerikus pontosságát és stabilitását meghatározó paraméter. A túl durva rács a furat körüli hőmérsékleti tér túlzott numerikus simítását okozhatja, míg a túl finom rács alacsony hőmérséklet-különbségű üzemállapotokban felerősítheti a mérési zaj hatását. Ennek következtében a rácsfelbontás megválasztása közvetlenül befolyásolhatja a rekonstruált $\lambda(z)$ profil alakját és az energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőt.

Az érzékenységvizsgálat során három radiális rácsfelbontást vizsgáltam: $N_r = 40, 60 \text{ és } 100$. Ezek az értékek a fúrólyukmodellekre vonatkozó korábbi rácsfüggetlenségi vizsgálatok által javasolt tartományba esnek [137].

Nagyobb térfogatáram mellett a λ_{eff} értékek csak kismértékben változtak a vizsgált rácsfelbontások között, és a $\lambda(z)$ profilok általános szerkezete stabil maradt. Ez arra utal, hogy kedvezőbb hidraulikai terhelés esetén a nagyobb hőmérséklet-különbségek mérséklik a numerikus beállításokra való érzékenységet.

Alacsonyabb térfogatáram mellett a radiális rácsfelbontás hatása lényegesen erősebb volt. Az $N_r = 40$ esetben a modell jelentősen túlbecsülte λ_{eff}-et, míg az $N_r = 100$ esetében mérsékelten alulbecsült értékeket adott. Ez megmutatja, hogy kis hőmérséklet-különbségek mellett a numerikus diszkretizáció és a mérési zaj kölcsönhatása felerősödik. A vizsgált felbontások közül az $N_r = 60$ érték adta a legkonzisztensebb $\lambda(z)$ profilokat és a legmegbízhatóbb effektív hővezetési tényezőket.

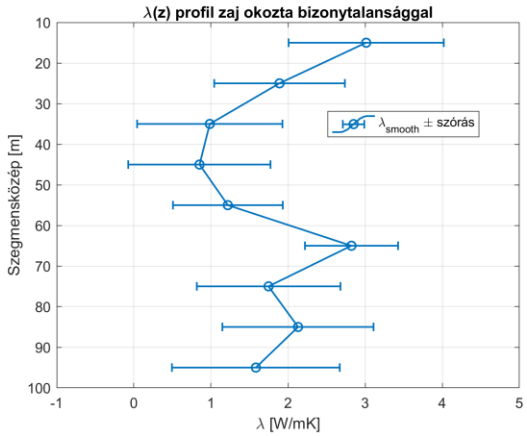
Összességében megállapítható, hogy a radiális rácsfelbontás megválasztása különösen alacsony térfogatáramú üzemállapotban befolyásolja az inverziós eredményeket. A jelen vizsgálatban az $N_r = 60$ rácsfelbontás bizonyult a legkedvezőbb kompromisszumnak a numerikus pontosság, a mérési zajjal szembeni robusztusság és az inverzió stabilitása között.

4.6 Jel–zaj viszony és Monte Carlo-alapú zajérzékenység

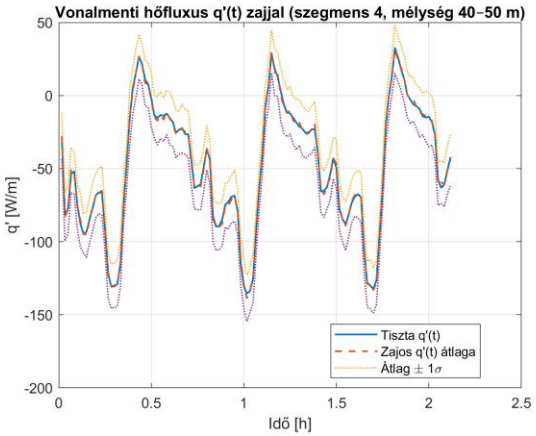
A szegmensenkénti inverziós módszer zajérzékenységének értékelésére Monte Carlo-alapú bizonytalanságelemzést végeztem. A vizsgálat során a mért hőmérséklet-idősorokhoz normális eloszlású, ($\sigma = 0{,}12\,°C$) szórású zajt adtam, majd a teljes inverziós eljárást 100 realizációra ismételtem meg. Az elemzés célja annak kvantitatív meghatározása volt, hogy a hőmérsékleti bizonytalanság hogyan terjed át a rekonstruált $q_i'(t)$ vonalmenti hőáram-idősorokra és a szegmensenkénti λ_i értékekre.

Mivel a $q_i'(t)$ számítása közvetlenül a szondában mért hőmérséklet-különbségeken alapul, a mérési zaj először a vonalmenti hőáram rekonstrukciójában jelenik meg, majd ezen keresztül befolyásolja az inverz feladat eredményét. Alacsonyabb térfogatáramnál, 0,585 m3/h esetén, az előremenő és visszatérő csőágak közötti hőmérséklet-különbség kisebb, ami kedvezőtlen jel–zaj viszonyt eredményez. Ennek következtében a rekonstruált hőáram-idősor jelentősen zajossá válik, és a zaj érdemben befolyásolja $q_i'(t)$ időbeli alakulását, amelyet a 20. ábra szemléltet.

Ez a zajérzékenység közvetlenül megjelenik az inverzió eredményeiben is. Az alacsony térfogatáramú esetben a becsült λ_i értékek nagy változékonyságot mutattak, és egyes mélységi intervallumokban a relatív bizonytalanság meghaladta a 40–60%-ot, a legkedvezőtlenebb szegmensekben pedig megközelítette a 100%-ot (lásd. 19. ábra). Ilyen feltételek mellett a rekonstruált $\lambda(z)$ profil fizikai értelmezhetősége korlátozott, és az eredmények elsősorban kvalitatív vagy kiegészítő jelleggel kezelhetők. Ezt a 22. ábra szemlélteti, ahol a zajjal terhelt vonalmenti hőáram-idősorok kisebb relatív eltérést mutatnak, és a hőáram időbeli trendje stabilabban követhető.



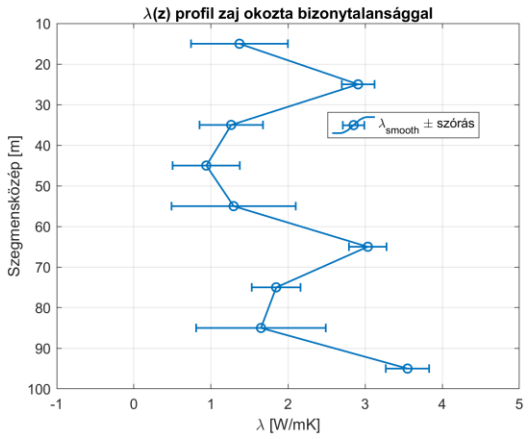
19. ábra: $\lambda(z)$ profil zaj okozta bizonytalansággal, alacsony térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]



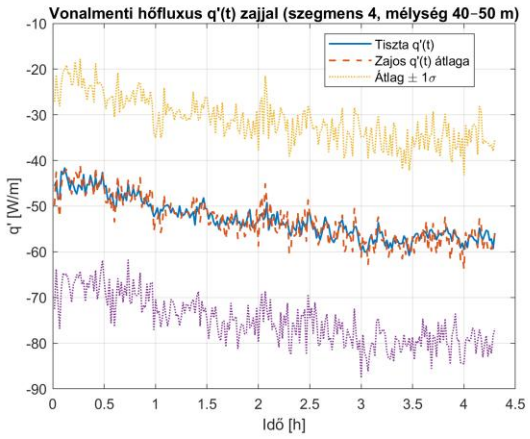
20. ábra: Vonalmenti hőáram $q_i'(t)$ zajjal, alacsony térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

Ezzel szemben a nagyobb térfogatáramú mérésnél, 0,815 m3/h esetén, a jel–zaj viszony lényegesen kedvezőbb volt. A nagyobb tömegáram nagyobb hőmérséklet-különbségeket és nagyobb amplitúdójú $q_i'(t)$ jeleket eredményezett, így a mérési zaj relatív hatása csökkent (lásd. 22. ábra). Ebben az esetben a szegmensenkénti λ_i becslések stabilabbak maradtak, a mélységfüggő változékonyság jellemzően 10–20% tartományban volt, és a profil fő geológiai trendjei megőrződtek.

A nagyobb térfogatáram hatása a rekonstruált hővezetési tényezőprofilban is megfigyelhető. A szegmensenkénti λ_i becslések stabilabbak maradtak, a mélységfüggő változékonyság jellemzően 10–20% tartományban volt, és a profil fő geológiai trendjei megőrződtek. A 21. ábra ábrázolja a $\lambda(z)$ profil zaj okozta bizonytalanságát, nagy térfogatáram mellett. Az alacsony térfogatáramú esettel összehasonlítva a bizonytalansági sávok kisebbek, a mélységi profil pedig mérnöki és geológiai szempontból jobban értelmezhető.



21. ábra: $\lambda(z)$ profil zaj okozta bizonytalansággal, nagy térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]



22. ábra: Vonalmenti hőáram $q_i'(t)$ zajjal, nagy térfogatáram mellett, saját szerkesztés [ZV1]

A zajérzékenységi elemzés alapján megállapítható, hogy a szegmensenkénti $\lambda(z)$ rekonstrukció stabilitása alapvetően a hidraulikai terheléstől és az ebből következő jel–zaj viszonytól függ. Alacsony térfogatáramnál a kis ΔT értékek zajdominált inverziót eredményezhetnek, nagy változékonyságú λ_i értékekkel. Nagyobb térfogatáramnál a hőmérsékleti jelek amplitúdója kedvezőbb, ezért az inverzió robusztusabb, reprodukálhatóbb és geológiai szempontból jobban értelmezhető marad.

A kapott eredmények kiemelik, hogy valós talajszondás rendszerekben a javasolt szegmensenkénti inverzió csak akkor alkalmazható megbízhatóan, ha a hidraulikai üzemi feltételek kellően nagy jel–zaj viszonyt biztosítanak.

4.7 A $\lambda(z)$ rekonstrukció alkalmazhatósági feltételei és érvényességi tartománya

A szegmensenkénti inverz hővezetési tényező azonosítás célja, hogy az üzemi körülmények között mért, mélység szerint felbontott hőmérséklet-idősorokból meghatározható legyen a talajszonda környezetének effektív hővezetési tényezőprofilja, $\lambda(z)$. A módszer előnye, hogy a klasszikus TRT-vel szemben nem csupán egyetlen, teljes furathosszra vonatkozó átlagos hővezetési tényezőt ad, hanem 10 m-es vertikális felbontásban szolgáltat információt a furatmenti hőtechnikai viszonyokról. Ugyanakkor a módszer nem minden mérési és üzemi feltétel mellett alkalmazható azonos megbízhatósággal. Az eredmények értelmezhetőségét a mérési jel minősége, a hidraulikai terhelés, a furat-termikus ellenállás ismerete, a numerikus modell beállítása és a regularizáció együttesen határozza meg.

A korábbi alfejezetekben bemutatott validáció és érzékenységvizsgálatok alapján a módszer két szinten értékelhető. Egyrészt a szegmensenként meghatározott λ_i értékekből képzett energia-súlyozott effektív hővezetési tényező, λ_{eff} , közvetlenül összevethető a standard TRT eredményével. Másrészt a teljes $\lambda(z)$ profil mélység szerinti alakja csak akkor tekinthető megbízhatóan értelmezhetőnek, ha a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek a mérési zajhoz képest kellően nagyok, és az inverziót nem dominálja a hőáram-számítás bizonytalansága.

A TRT-vel történő összehasonlítás igazolta, hogy az energia-súlyozott λ_{eff} érték mindkét vizsgált térfogatáram mellett jól reprodukálta a referencia TRT eredményét. A standard TRT-ből kapott $\lambda_{eff} = 1{,}71\, W/mK$ értékhez képest a szegmensenkénti inverzió 0,585 m³/h térfogatáramnál 1,73 W/mK, 0,815 m³/h térfogatáramnál pedig 1,68 W/mK értéket adott, ami rendre +1,2% és –1,6% eltérésnek felel meg. Ebből következik, hogy az üzemi, időben változó hőáramon alapuló inverziós eljárás a teljes furathosszra vonatkozó integrált hőtechnikai viselkedést TRT-szintű pontossággal képes visszaadni.

A mélységfüggő profil stabilitása azonban nem kizárólag az aggregált λ_{eff} pontosságától függ. A $\lambda(z)$ rekonstrukció érzékeny arra, hogy az adott üzemi állapotban a hőmérséklet-különbségek milyen jel–zaj viszony mellett mérhetők. Alacsony térfogatáramnál a kisebb hőmérséklet-különbségek miatt a számított vonalmenti hőáram, $q_i'(t)$, zajérzékenyebbé válik, ami a szegmensenkénti λ_i értékek nagyobb szórásához vezethet. A Monte Carlo-alapú zajvizsgálat alapján alacsony térfogatáramnál egyes szegmensekben a relatív bizonytalanság 40–60%-ot is meghaladhatott, a legkedvezőtlenebb esetekben pedig közelíthette a 100%-ot. Ezzel szemben a nagyobb térfogatáramú mérésnél a hőmérsékleti jel amplitúdója kedvezőbb volt, a zaj hatása csökkent, és a $\lambda(z)$ profil geológiai szempontból is jobban értelmezhető maradt.

A módszer alkalmazhatóságának további feltétele a furat-termikus ellenállás, R_b, ismerete. Az R_b értéke a referencia TRT-ből származott, és bemenő paraméterként jelent meg a furatfal-hőmérséklet rekonstrukciójában. Ez azt jelenti, hogy a módszer jelen implementációja nem teljesen TRT-független, hanem a TRT-ből származó R_b értékre támaszkodik. Az R_b érzékenységi vizsgálat ugyanakkor azt mutatta, hogy az R_b ±10%-os változtatása elsősorban a rekonstruált $\lambda(z)$ profil amplitúdóját módosítja, miközben a fő mélységi trendek megfelelő jel–zaj viszony mellett megőrződnek. Ez a megállapítás

közvetlenül alátámasztja, hogy a módszer megfelelő üzemi feltételek mellett robusztus mélységi információt hordozhat.

A numerikus modell oldaláról a radiális rácsfelbontás szintén meghatározó tényező. A túl durva rács a furat körüli hőmérsékleti tér túlzott numerikus simítását okozhatja, míg a túl finom rács alacsony hőmérséklet-különbségek esetén felerősíti a mérési zaj hatását. A vizsgált rácsfelbontások közül az $N_r = 60$ érték bizonyult a legkedvezőbb kompromisszumnak a numerikus pontosság és a zajjal szembeni robusztusság között. A rácsfelbontás hatása különösen alacsony térfogatáram mellett volt jelentős, ami ismét arra utal, hogy a numerikus stabilitás és a mérési jel minősége egymástól nem választható el. A fentiek alapján a $\lambda(z)$ rekonstrukció megbízható alkalmazásának feltételeit a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat: A szegmensenkénti $\lambda(z)$ rekonstrukció megbízható alkalmazásának feltételei

Alkalmazhatósági feltétel	**Megbízható alkalmazás kritériuma**	**Értelmezés, ha nem teljesül**
TRT-referencia vagy $\boldsymbol{R_b}$ ismerete	A furat-termikus ellenállás független TRT-ből vagy megbízható becslésből rendelkezésre áll.	A furatfal-hőmérséklet rekonstrukciója bizonytalan; az abszolút λ_i értékek torzulhatnak.
Energia-súlyozott $\boldsymbol{\lambda_{eff}}$ képzése	A szegmensenkénti λ_i értékekből TRT-vel összevethető aggregált λ_{eff} számítható.	A mélységi profil nem kapcsolható közvetlenül a standard TRT referenciaértékhez.
Stabil hidraulikai üzemállapot	A térfogatáram az adott kiértékelési időszakban ismert és közel állandó.	Változó térfogatáram esetén a hőfluxus-rekonstrukció és a λ_i becslés nehezen értelmezhető.
Megfelelő hidraulikai terhelés	A térfogatáram elég nagy ahhoz, hogy a szegmensenkénti hőmérsékletkülönbségek jól felbonthatók legyenek.	Alacsony térfogatáramnál a hőfluxus-rekonstrukció zajérzékeny, a λ(z) profil szórt lehet.
Kedvező jel–zaj viszony	A szegmensenkénti ΔT nagyobb a mérési zajnál; az SNR a furat jelentős részén értelmezhető tartományban marad.	A becsült λ_i értékek nagy bizonytalanságot mutathatnak, különösen a mélyebb vagy kis gradiensű szakaszokban
Kalibrált hőmérsékletmérés	A mérési lánc bizonytalansága ismert, és kisebb a kiértékeléshez szükséges hőmérsékletkülönbségeknél.	A mérési zaj közvetlenül átterjed a $q_i'(t)$ hőfluxusra és az inverzió eredményére.

Stabil aktív mérési időszak	A vizsgált időablakban nem jelentkezik jelentős üzemi átállás vagy külső beavatkozás.	A tranziens vagy változó üzemállapotból származó λ_i értékek csak korlátozottan értelmezhetők.
Megfelelő radiális rácsfelbontás	A rácsfelbontás kellően pontos, de nem erősíti túl a mérési zajt; a jelen vizsgálatban az $N_r = 60$ kompromisszumos értéknek bizonyult.	Túl durva rács numerikus simítást, túl finom rács zajfelerősítést okozhat.
Regularizáció alkalmazása	A mélységi simítás csökkenti a mérési eredetű oszcillációkat, de megőrzi a fő mélységi trendeket.	A nyers λ(z) profil túlzottan szórt lehet, és nehezen különíthető el a mérési zajtól.
Vezetésdominált értelmezési tartomány	A radiális hővezetési közelítés elfogadható, és nincs bizonyítottan domináns talajvíz-advekció.	Erős advekció vagy furatközi kölcsönhatás esetén a λ(z) effektív, látszólagos hővezetési profilként értelmezendő.
10 m-es vertikális felbontás tudatos kezelése	A λ_i értékek 10 m-es szegmensek effektív hőtechnikai jellemzőiként értelmezhetők.	Ennél vékonyabb rétegek közvetlen azonosítása nem várható el a módszertől.

A táblázat alapján megállapítható, hogy a módszer megbízható alkalmazásának kulcsfeltétele a megfelelő jel–zaj viszonyt biztosító hidraulikai üzemállapot. A nagyobb térfogatáramú mérésnél a hőmérséklet-különbségek stabilabbak voltak, ezért az inverzió simább, reprodukálhatóbb és geológiailag értelmezhetőbb profilt adott. Alacsony térfogatáram mellett a módszer továbbra is alkalmazható, de az eredmények elsősorban kvalitatív vagy kiegészítő jelleggel értelmezhetők. A feltételek alapján a $\lambda(z)$ rekonstrukció eredményei három gyakorlati érvényességi szintbe sorolhatók (lásd. 9. táblázat). Ez a besorolás nem általános minősítési rendszer, hanem a jelen kutatásban alkalmazott módszer mérnöki értelmezési tartományát foglalja össze.

9. táblázat: A λ(z) rekonstrukció kiértékelési érvényességi szintjei

Szint	**Feltételek**	**Felhasználható eredmény**	**Értelmezés**
I.	Ismert R_b; stabil térfogatáram; kedvező SNR; megfelelő ΔT kalibrált mérőrendszer; regularizált profil.	λ(z), energia-súlyozott λ_{eff}, fő geológiai trendek.	A profil kvantitatív értelmezésre és TRT-vel való összevetésre alkalmas.

II.	Ismert R_b, de alacsonyabb térfogatáram vagy gyengébb SNR; egyes szegmensek zajérzékenyek.	Főbb mélységi trendek, kvalitatív λ(z) értelmezés.	A profil óvatosan értelmezendő; az abszolút λ_i értékek szórhatnak.
III.	Ismeretlen R_b; instabil térfogatáram; alacsony SNR; ΔT összemérhető a mérési zajjal.	Nem javasolt kvantitatív λ(z) értelmezés.	Új mérési ablak, nagyobb hidraulikai terhelés vagy független R_b meghatározás szükséges.

Teljes értékű rekonstrukció esetén a módszer nemcsak TRT-vel összevethető λ_{eff} értéket ad, hanem a furat menti hővezetési viszonyok mélység szerinti változását is értelmezhetővé teszi. Korlátozott rekonstrukció esetén a módszer diagnosztikai célra továbbra is hasznos lehet, azonban az egyes szegmensek abszolút λ_i értékeit nem célszerű önálló anyagjellemzőként kezelni. Nem megbízható rekonstrukció esetén a kapott profil elsősorban a mérési vagy üzemi feltételek elégtelenségét jelzi, nem pedig a talaj valós hővezetési szerkezetét.

A vizsgálat alapján a módszer alkalmazhatóságának legfontosabb feltétele nem pusztán a hőmérséklet-érzékelők pontossága, hanem az, hogy az üzemi állapot kellően nagy és stabil hőmérséklet-különbségeket hozzon létre a szegmensenkénti hőáram meghatározásához.

4.8 A 2. tézis megfogalmazása

A szegmensenként azonosított $\lambda(z)$ profil TRT-vel való összevetésére energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőt definiáltam. Igazoltam, hogy a módszer TRT-szintű pontossággal reprodukálja a referencia hővezetést. A TRT-vel meghatározott értékhez képest az eltérés két térfogatáram mellett is ±2%-on belül maradt. Zaj- és paraméterérzékenységi elemzéssel meghatároztam az alkalmazhatóság feltételeit, és kimutattam, hogy a rekonstrukció stabilitását főként a jel–zaj viszony, míg R_b bizonytalanságának hatását elsősorban a $\lambda(z)$ profil amplitúdója tükrözi.

Kapcsolódó publikációk: [ZV1]

5 A VISSZATÉRŐ ÁGI PARAZITA EXOTERM ZÓNA MÉRÉSALAPÚ AZONOSÍTÁSA

A jelen fejezetben a 2. fejezetben bemutatott terepi mérési eredmények szolgálnak kiindulási alapként. A mélység szerint felbontott előremenő és visszatérő hőmérsékletprofilok alapján a talajszonda üzemi hőmérsékleti viselkedése már előzetesen értékelhető volt, ugyanakkor a visszatérő ágban jelentkező parazita, veszteségjellegű hőleadási viselkedés azonosításához célzott, szegmensenkénti energetikai kiértékelés szükséges. A dolgozatban parazita hőleadási zónának azt a visszatérő ági szakaszt tekintem, amelyben a fűtési üzemben áramló hőhordozó közeg nem hőt vesz fel a környező talajból, hanem nettó hőt ad le annak irányába. Ez a folyamat a folyadékoldali energiamérleg szempontjából exoterm viselkedésként írható le, üzemi szempontból azonban veszteségjellegű, mivel csökkenti a hőszivattyú számára rendelkezésre álló forrásoldali hőmérsékletszintet. A parazita hőleadási zóna tehát nem önálló szerkezeti elem, hanem a visszatérő ág mentén kialakuló kedvezőtlen hőtechnikai működési tartomány, amelynek helye és kiterjedése a mélységfüggő hőmérsékletmérésekből, szegmensenkénti energiamérleg alapján azonosítható. Ennek megfelelően az 5. fejezet célja annak bemutatása, hogy a 2. fejezetben ismertetett mérési adatok felhasználásával miként határozható meg a visszatérő ág mentén kialakuló parazita hőleadási zóna és annak energetikai jelentősége.

5.1 A parazita exoterm hőcsere fizikai értelmezése

A vizsgált U-csöves talajszonda visszatérő ága diszkrét mélységekben elhelyezett hőmérséklet-érzékelőkkel volt műszerezve. A függőleges koordinátát z jelöli, amelynek pozitív iránya a furatfejtől lefelé mutat. A hőmérsékleti adatok diszkrét t_n időpontokban és diszkrét Z_k mélységekben kerültek rögzítésre. Ennek megfelelően a visszatérő ág mentén mért hőmérsékletmező az alábbi idősorokkal írható le:

$$T_{\uparrow}(Z_k, t_n)$$

ahol $T_{\uparrow}$ a visszatérő ágban mért folyadékhőmérsékletet jelöli. A visszatérő ágban a hőhordozó közeg áramlási iránya ellentétes a választott mélységi koordinátával, vagyis a folyadék a nagyobb mélységekből a furatfej irányába áramlik. Emiatt a hőmérséklet-változások előjelének értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy a mélységi koordináta lefelé pozitív, míg az áramlás iránya felfelé mutat.

Fűtési üzemállapotban a visszatérő ágban áramló hőhordozó közeg ideális esetben hőt vesz fel a környező talajból, majd ezt a hőt a hőszivattyú elpárologtatója felé szállítja. Valós üzemi viszonyok között azonban előfordulhat, hogy a furat sekélyebb szakaszain a visszatérő ágban áramló folyadék hőt ad le a környező közegnek. Folyadékoldali energiamérleg szempontjából ez exoterm folyamatként értelmezhető, ugyanakkor a hőszivattyús rendszer működése szempontjából veszteségjellegű, mivel csökkenti a hőszivattyú számára rendelkezésre álló forrásoldali hőmérsékletet.

A parazita hőleadási, azaz exoterm zóna azonosítása ezért nem pusztán lokális hőtechnikai kérdés, hanem energetikai diagnosztikai feladat is. A cél annak meghatározása, hogy a visszatérő ág mentén milyen mélységig jelentkezik nettó hőleadás a környező közeg felé, és mely mélységtől válik dominánssá a hasznos, endoterm hőfelvétel.

5.2 Szegmensenkénti vonalmenti hőáram

A visszatérő ági hőcsere elemzéséhez a furatot az egymást követő érzékelőmélységek közötti szegmensekre bontom. Az i-edik szegmens felső és alsó mérési pontja Z_i és Z_{i+1}, a szegmens hossza pedig:

$$\Delta z_i = Z_{i+1} - Z_i \tag{43}$$

A szegmens középponti mélysége:

$$z_{c,i} = \frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \tag{44}$$

A koordinátarendszerben a mélység lefelé pozitív, miközben a visszatérő ágban a folyadék felfelé áramlik. Ennek figyelembevételével az i-edik szegmenshez tartozó vonalmenti hőáram az alábbi módon számítható:

$$q_{\uparrow,i}(t) = \frac{\dot{m} c_f}{\Delta z_i} [T_{\uparrow}(Z_{i+1}, t) - T_{\uparrow}(Z_i, t)] \tag{45}$$

ahol $\dot{m}$ a hőhordozó közeg tömegárama, c_f a hőhordozó közeg fajhője, $T_{\uparrow}(Z_i, t)$ pedig a visszatérő ágban, Z_i mélységben mért folyadékhőmérséklet.

A választott előjelkonvenció szerint:

- $q_{\uparrow,i}(t) > 0$ esetén a folyadék az adott szegmensben, az áramlási irány mentén átlagosan hűl, vagyis nettó hőt ad le a környezetének. Ez folyadékoldali

energiamérleg szempontjából exoterm, üzemi szempontból pedig veszteségjellegű szakaszt jelent.

- $q_{\uparrow,i}(t) < 0$ esetén a folyadék nettó hőt vesz fel a környező talajból. Ez endoterm szakaszként értelmezhető, amely a hőszivattyú szempontjából hasznos hőkinyeréshez járul hozzá.

5.3 Időintegrált szegmensenergia és bizonytalanságvezérelt osztályozás

A $\tau \in [0, \tau_f]$ elemzési intervallumon az i-edik szegmens idő szerint integrált, egységnyi furathosszra vonatkoztatott nettó hőmennyisége:

$$Q_{\uparrow,i} = \int_0^{\tau_f} q_{\uparrow,i}(t)dt \tag{46}$$

A pozitív $Q_{\uparrow,i}$ érték azt mutatja, hogy az adott szegmens a vizsgált időablakban nettó exoterm viselkedésű, míg a negatív érték nettó endoterm működésre utal.

A mérési zaj által okozott véletlenszerű előjelváltások mérséklésére a szegmensek exoterm–endoterm besorolását bizonytalanságalapú küszöböléssel célszerű elvégezni. Feltételezhető, hogy a hőmérsékletmérés standard bizonytalansága σ_T, és a különböző mélységi pontokon jelentkező bizonytalanságok közelítőleg függetlenek. Ekkor két érzékelő közötti hőmérséklet-különbség standard bizonytalansága:

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{2}\sigma_T \tag{47}$$

A $q_{\uparrow,i}(t)$ definícióját alkalmazva a vonalmenti hőáram standard bizonytalansága:

$$\sigma_{q,i} = \frac{\dot{m}c_f}{\Delta z_i}\sigma_{\Delta T} \tag{48}$$

Diszkrét mintavételezés esetén az időintegrált mennyiség bizonytalanságára konzervatív becslés adható:

$$\sigma_{Q,i} \approx \sigma_{q,i}\sqrt{\sum_{n=1}^{N_t-1}(\Delta\tau_n)^2}, \qquad \Delta\tau_n = \tau_{n+1} - \tau_n \tag{49}$$

Egyenletes mintavételezés esetén $\Delta\tau_n = \Delta\tau$, ezért:

$$\sigma_{Q,i} \approx \sigma_{q,i}\Delta\tau\sqrt{N_t - 1} \tag{50}$$

A szegmensenkénti besorolási küszöb a standard bizonytalanság skálázásával adódik:

$$\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i} \tag{51}$$

ahol k választott dimenzió nélküli skálatényező. A jelen vizsgálatban $k = 2$ érték alkalmazható, amely normális eloszlás feltételezése mellett hozzávetőleg 95%-os lefedettségnek felel meg.

A szegmensbesorolás az alábbi szabály szerint történik:

- Exoterm, ha $Q_{\uparrow,i} > \varepsilon_{Q,i}$,
- Endoterm, ha $Q_{\uparrow,i} < -\varepsilon_{Q,i}$,
- Ha $\left|Q_{\uparrow,i}\right| \leq \varepsilon_{Q,i}$ a szegmens megbízhatóan nem sorolható be ezért semleges vagy határozatlan viselkedésűnek tekinthető.

5.4 Az exoterm átmeneti mélység meghatározása

A javasolt exoterm átmeneti mélységi indikátor, $z_{\uparrow}^{*}$, az első olyan tengelyirányú helyet jelöli a visszatérő ág mentén, ahol az idő szerint integrált szegmensenergia előjele exotermről endotermre vált, miközben a fent definiált bizonytalansági küszöbfeltételek is teljesülnek.

Legyen i^{*} a legkisebb olyan szegmensindex, amelyre két szomszédos szegmens között teljesül az alábbi stabil előjelváltási feltétel:

$$Q_{\uparrow,i^{*}} > \varepsilon_{Q,i^{*}} \text{ és } Q_{\uparrow,i^{*}} < -\varepsilon_{Q,i^{*}+1} \tag{52}$$

Ha nem létezik ilyen i^{*}, akkor $z_{\uparrow}^{*}$ a kiválasztott időablak és küszöbparaméterek mellett nem azonosítható megbízhatóan.

Amennyiben az i^{*} index létezik, a kritikus mélységet a két szomszédos szegmensközéppont, $z_{c,i^{*}}$ és $z_{c,i^{*}+1}$, közötti lineáris interpolációval kell meghatározni. Feltételezve, hogy $Q_{\uparrow}(z)$ az átmenet lokális környezetében közelítőleg lineárisan változik, az átmeneti mélység:

$$z_{\uparrow}^{*} = z_{c,i^{*}} + \frac{Q_{\uparrow,i^{*}}}{Q_{\uparrow,i^{*}} - Q_{\uparrow,i^{*}+1}}\left(z_{c,i^{*}+1} - z_{c,i^{*}}\right) \tag{53}$$

A $z_{\uparrow}^{*}$ tehát azt a mélységet becsüli, ahol $Q_{\uparrow}(z_{\uparrow}^{*}) \approx 0$, vagyis ahol a kiválasztott időablakban a visszatérő ág mentén a nettó exoterm hőleadási zóna átadja helyét a nettó endoterm hőfelvételi tartománynak.

5.5 Exoterm veszteség, átlagos veszteségteljesítmény és forrásoldali hőmérséklet-egyenérték

A $z_{\uparrow}^{*}$ felett elhelyezkedő, szignifikánsan exoterm viselkedésű szegmensek indexhalmazát a következőképpen definiáljuk:

$$C_{\uparrow} = \{i | z_{c,i} < z_{\uparrow}^{*} \wedge Q_{\uparrow,i} > \varepsilon_{Q,i}\} \tag{54}$$

Az idő szerint integrált vonalmenti nettó hőmennyiség, $Q_{\uparrow,i}$, és a szegmenshossz, Δz_i, szorzataként meghatározható az adott szegmenshez tartozó nettó energia. Az exoterm halmazon végzett összegzés a parazita exoterm zóna teljes hőveszteségét adja:

$$E_{exo} = \sum_{i \in C_{\uparrow}} Q_{\uparrow,i} \Delta z_i \tag{55}$$

Az elemzési ablakra vonatkoztatott átlagos exoterm veszteségteljesítmény:

$$P_{exo} = \frac{E_{exo}}{\tau_f} \tag{56}$$

A veszteségteljesítmény forrásoldali kilépőhőmérséklet-egyenértéke:

$$\Delta T_{out} = \frac{P_{exo}}{\dot{m} c_f} \tag{57}$$

Ez a mennyiség azt fejezi ki, hogy a parazita exoterm zóna átlagosan mekkora forrásoldali hőmérsékletveszteséget okoz. Amennyiben a parazita hőcsere mérsékelhető lenne, azonos nagyságrendű kilépőhőmérséklet-növekedés lenne elvárható.

Diagnosztikai célból a teljes műszerezett szakaszra vonatkozó, hossz mentén átlagolt vonalmenti hőáram is definiálható:

$$q_{glob,\uparrow}(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N_s} q_{\uparrow,i}(t) \Delta z_i \tag{58}$$

Ez a mennyiség tömörített formában jellemzi a visszatérő ág mentén kialakuló pillanatnyi nettó hőáramot, ami alkalmas az üzemi időablakok előzetes értékelésére.

5.6 COP-hatás becslése Carnot-skálázott helyettesítő modellel

A ΔT_{out} rendszerszintű teljesítményhatásának becslésére fűtési üzemmódra vonatkozó, Carnot-skálázáson alapuló egyszerűsített COP-helyettesítő modellt alkalmazunk. Legyen

T_{cond} egy referencia kondenzátor-hőmérséklet, T_{src} pedig a forrásoldali hőmérséklet. Az ideális fűtési Carnot-COP:

$$COP_C(T_{src}) = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{src}} \tag{59}$$

A valós hőszivattyú-viselkedés közelítésére állandó skálázási hatásfokot vezetünk be, amelyet úgy választunk meg, hogy a modell illeszkedjen egy referencia üzemi ponthoz $(T_{src,ref}, COP_{ref})$:

$$\eta = \frac{COP_{ref}}{COP_C(T_{src,ref})} \tag{60}$$

A becsült COP ezek alapján:

$$COP(T_{src}) = \eta COP_C(T_{src}) \tag{61}$$

A (15) egyenletben definiált forrásoldali hőmérséklet-egyenértéket alkalmazva a módosított forráshőmérséklet:

$$T_{src,new} = T_{src,ref} + \Delta T_{out} \tag{62}$$

A relatív COP-változás:

$$\Delta COP_{\%} = \frac{COP(T_{src,new}) - COP(T_{src,ref})}{COP(T_{src,ref})} 100\% \tag{63}$$

A helyettesítő modell célja nem az abszolút COP nagy pontosságú előrejelzése, hanem a mért adatokból származtatott ΔT_{out} teljesítményreleváns, összehasonlítható diagnosztikai indikátorrá alakítása.

5.7 Eredmények két üzemi állapotra

A bemutatott kiértékelési eljárás két, eltérő térfogatáramú reprezentatív aktív üzemi időablakra alkalmaztam. Az eredmények célja annak bemutatása, hogy:

- Az idő szerint integrált szegmenshő, $Q_{\uparrow,i}$, alapján a parazita exoterm zóna és annak határmélysége, $z_{\uparrow}^{*}$, reprodukálhatóan lokalizálható.
- A parazita hatás nagysága E_{exo} és $P_{exo,avg}$ értékekben számszerűsíthető.
- A hatás ekvivalens forrásoldali kilépőhőmérséklet-eltéréssé alakítható, amelyből a COP-következmények a Carnot-skálázott helyettesítő modellel becsülhetők.

A 10. táblázat szemlélteti a kapott eredményeket, miszerint $z_{\uparrow}^{*}$ a kis térfogatáramú esetben 31,17 m, a nagy térfogatáramú esetben pedig 24,01 m az átmeneti mélység. Az átlagos parazita exoterm veszteségteljesítmény mindkét állapotban hasonló nagyságrendű volt (≈ 0,48 kW), ugyanakkor az ekvivalens forrásoldali kilépőhőmérséklet-eltérés kis térfogatáramnál nagyobb (0,75 K), nagy térfogatáramnál pedig kisebb (0,52 K) volt. A Carnot-skálázott helyettesítő modell alapján a parazita exoterm hőcsere mérséklése becslés szerint 2,55%, illetve 1,78% COP-javulásnak felelne meg a kis és nagy térfogatáramú esetekben.

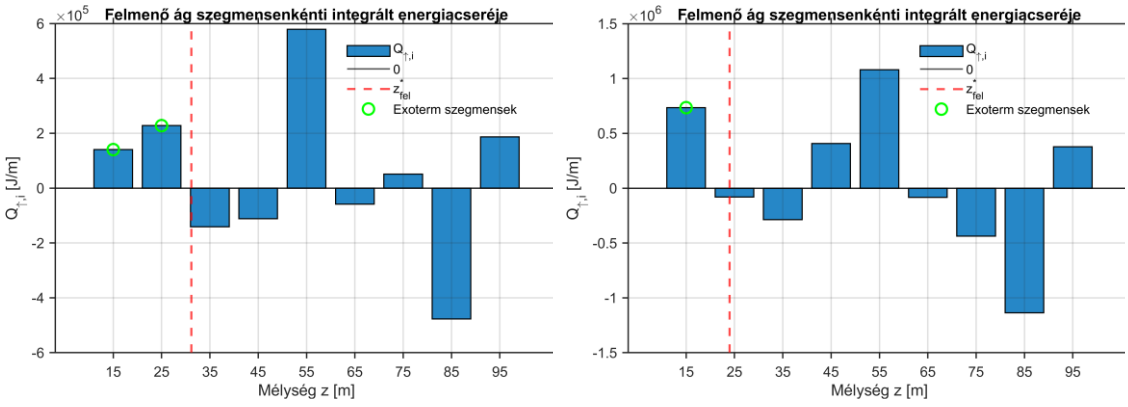
10. táblázat: A parazita exoterm zóna fő indikátorai a két vizsgált üzemi állapotban.

Metric	$\dot{V} = 0.585 m^3/h$	$\dot{V} = 0.815 m^3/h$
$z_{\uparrow}^{*}\ [m]$	31.17	24.01
$E_{exo}\ [J]$	3.68×10^7	7.34×10^7
$P_{exo,avg}\ [W]$	487	476
$\Delta T_{out}\ [K]$	0.75	0.52
$COP_{ref}\ [-]$	4.62	4.62
$COP_{new}\ [-]$	4.74	4.70
$\Delta COP\ [\%]$	2.55	1.78

5.7.1 Időintegrált vonalmenti hőmennyiség és átmeneti mélység

Az időintegrált, egységnyi furathosszra vonatkoztatott nettó szegmenshő mélység szerinti eloszlása mindkét üzemi állapotban két, jól elkülöníthető tartományt mutatott. A sekélyebb zónában a szegmensek szignifikáns exoterm viselkedést mutattak, míg nagyobb mélységekben a nettó endoterm működés vált meghatározóvá, amelyet a 23. ábra szemléltet kis és nagy térfogatáramú esetekben. A bizonytalanságalapú küszöbölés lehetővé tette azon szegmensek kiszűrését, amelyek esetében a mérési zaj bizonytalan besoroláshoz vezethetett volna.

Kis térfogatáram mellett az első robusztus exoterm–endoterm átmenet $z_{\uparrow}^{*} = 31{,}17$ m mélységnél jelentkezett, míg nagy térfogatáram esetén az átmenet $z_{\uparrow}^{*} = 24{,}01$ m mélységre tolódott. Ez mutatja, hogy a térfogatáram növelése a visszatérő ág mentén jelentősen módosítja a nettó hőáram tengelyirányú eloszlását, és az exoterm zóna határát a felszín irányába mozdítja el. Fontos hangsúlyozni, hogy $z_{\uparrow}^{*}$ nem vizuális leolvasással, hanem algoritmikusan, stabil előjelváltási feltétel és bizonytalanságalapú szegmensbesorolás alapján került meghatározásra.



(a) **(b)**

23. ábra: Mélység szerinti $Q_{\uparrow,i}$ profilok és az azonosított $z_{\uparrow}^{*}$: (a) kis térfogatáramú állapot; (b) nagy térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

A $Q'_{\uparrow,i}$ profilok nagyobb mélységekben további lokális változékonyságot és esetenként másodlagos előjelváltásokat is mutathatnak. A bevezetett $z_{\uparrow}^{*}$ indikátor azonban definíció szerint az első stabil exoterm–endoterm átmenetet azonosítja. Ez a választás a sekély parazita hőleadási veszteségek diagnosztikáját támogatja, és célzott beavatkozási lehetőségek, például a sekély szakasz hőtechnikai leválasztása vagy szigetelése szempontjából értelmezhető.

5.7.2 Exoterm veszteségmutatók: E_{exo}, $P_{exo,avg}$ és ΔT_{out}

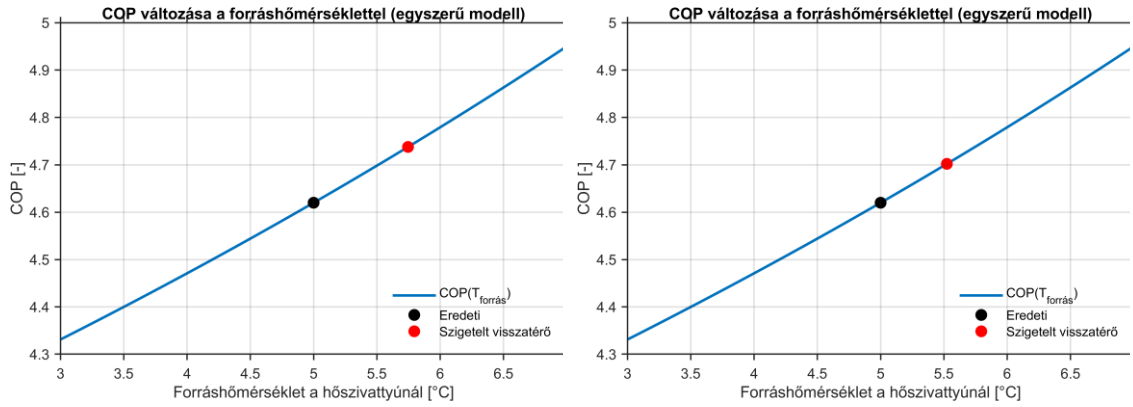
A $z_{\uparrow}^{*}$ feletti, szignifikánsan exoterm viselkedésű szegmensek összegzésével meghatározható volt a parazita hőleadási régió teljes hőveszteség és a hozzá tartozó átlagos veszteségteljesítmény. A kis térfogatáramú esetben $E_{\mathrm{exo}} = 3{,}68 \cdot 10^{7}\ J$ és $P_{\mathrm{exo,avg}} = 487\ W$ adódott, míg a nagy térfogatáramú esetben $E_{\mathrm{exo}} = 7{,}34 \cdot 10^{7}\ J$ és $P_{\mathrm{exo,avg}} = 476\ W$ volt meghatározható.

Megfigyelhető, hogy az átlagos exoterm veszteségteljesítmény mindkét üzemi állapotban közel azonos nagyságrendű, körülbelül 0,48 kW, miközben az átmeneti mélység jelentősen eltér. Ez igazolja, hogy az értékelt időablakokban a parazita hőleadás teljesítményszintje hasonló, ugyanakkor tengelyirányú eloszlása a hidraulikai üzemállapot megváltozásával átrendeződik.

Forrásoldali hőmérséklet-egyenértékként kifejezve a kilépőhőmérséklet-veszteség kis térfogatáramnál $\Delta T_{\mathrm{out}} = 0{,}75\ K$, nagy térfogatáramnál pedig $\Delta T_{\mathrm{out}} = 0{,}52\ K$ volt. A különbség fizikailag konzisztens, mivel hasonló veszteségteljesítmény nagyobb tömegáram mellett kisebb hőmérséklet-különbséget eredményez. Diagnosztikai szempontból ΔT_{out} közvetlenül értelmezhető a parazita hőleadási régióhoz rendelhető forráshőmérséklet-veszteségként.

5.7.3 COP-hatás Carnot-skálázott helyettesítő modellel

A ΔT_{out} értékek a Carnot-skálázott helyettesítő modell segítségével becsült COP-hatásként értelmezhetők. A $COP_{ref} = 4.62$ referencia üzemi pontnál a kis térfogatáramú eset $COP_{new} = 4.74$ értéket adott, ami $\Delta COP = 2.55\%$ relatív javulásnak felel meg (24a. ábra). A nagy térfogatáramú esetben $COP_{new} = 4.70$, azaz $\Delta COP = 1.78\%$ (24b. ábra).



(a) **(b)**

24. ábra: Carnot-skálázott COP-helyettesítő modell és referencia/módosított pontok: (a) kis térfogatáramú állapot; (b) nagy térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

Az üzemi állapotok közötti különbség összhangban van azzal a megfigyeléssel, hogy nagyobb térfogatáram mellett a parazita exoterm veszteségteljesítmény hasonló nagyságú, miközben az ekvivalens ΔT_{out} kisebb, így a becsült COP-nyereség is mérsékeltebb. A helyettesítő modell eredményei ezért nem abszolút COP-előrejelzésként, hanem a parazita hőleadási jelenség teljesítményreleváns, összehasonlítható diagnosztikai értelmezéseként kezelendők.

5.8 A 3. tézis megfogalmazása

Kidolgoztam egy terepi mérési adatokon alapuló, bizonytalanságvezérelt eljárást a talajszondás hőcserélőben kialakuló parazita exoterm zóna lokalizálására. A többmélységű visszatérő ági hőmérsékletprofilokból, tengelyirányú szegmentálással és mérési bizonytalanságon alapuló küszöböléssel meghatároztam az exoterm átmeneti mélységet. Két reprezentatív üzemállapotban $z_{\uparrow}^{*} = 31,17$ m, illetve $z_{\uparrow}^{*} = 24,01$ m értéket kaptam, körülbelül 0,48 kW átlagos exoterm teljesítmény mellett. A jelenséget forrásoldali hőmérséklet-egyenértékként és Carnot-skálázott COP-hatásként is értelmeztem, amely a vizsgált időablakban 2,55%, illetve 1,78% COP-javulási potenciált mutatott.

Kapcsolódó publikáció: [ZV2]

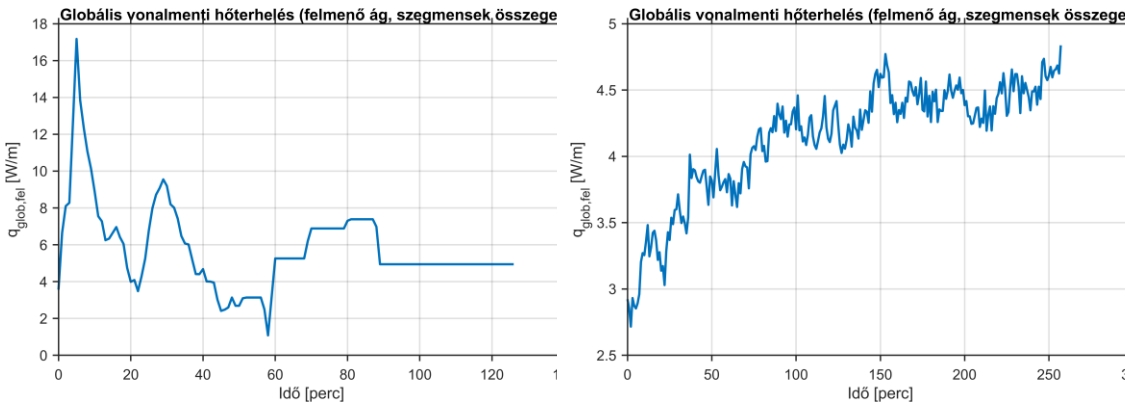
6 AZ EXOTERM MÉLYSÉGINDIKÁTOR ROBUSZTUSSÁGI ÉS ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATA

6.1 A globális visszatérő ági jel szerepe az időablak-választásban

Az 5. fejezetben bemutatott kiértékelési eljárás alapján a visszatérő ág mentén kialakuló parazita hőleadási zóna az időintegrált vonalmenti hőmennyiség, $Q'_{\uparrow,i}$, valamint az abból meghatározott exoterm–endoterm átmeneti mélység, $z^*_{\uparrow}$, segítségével azonosítható. A módszer üzemi monitoring célú alkalmazása szempontjából ugyanakkor alapvető kérdés, hogy az így kapott mélységmutató és a hozzá kapcsolódó teljesítményjellegű indikátorok mennyire érzékenyek a kiértékelési feltételekre.

A fejezet célja ezért a $z^*_{\uparrow}$ átmeneti mélységmutató, az átlagos parazita hőleadási veszteségteljesítmény, $P_{\mathrm{exo,avg}}$, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték, ΔT_{out}, valamint a becsült COP-változás, ΔCOP, robusztusságának és érzékenységének vizsgálata. Az elemzés kiterjed az időablak megválasztásának, a bizonytalanságalapú küszöbskálázásnak, a mintavételi ritkításnak és a hiányzó adatok interpolációjának hatására.

A vizsgált hosszra számított globális, hosszirányban átlagolt vonalmenti hőáram, $q_{glob,\uparrow}(t)$, kiegészítő információt szolgáltat a tranziens viselkedésről és az üzemi állapotok közötti stabilitáskülönbségekről. A 25a. ábrán látható, alacsony térfogatáramú üzem esetén a jel a mérés elején nagyobb amplitúdójú ingadozásokat mutat, majd a tranziens lecsengésével fokozatosan kvázi-stacionárius fejlődéshez közelít. Ezzel szemben a 25b. ábrán látható, hogy magasabb térfogatáramnál a jel gyorsabban stabilizálódik, és a kezdeti tranziens lecsengése után kisebb relatív változásokat mutat.



(a) **(b)**

25. ábra: A visszatérő ág globális jele $q_{glob,\uparrow}(t)$: (a) kis térfogatáramú állapot; (b) nagy térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

Ennek megfelelően a $q'_{\mathrm{glob},\uparrow}(t)$ jel gyors, üzemi állapotot jellemző indikátorként alkalmazható az időablak kiválasztásának támogatására. A lokális diagnosztikai következtetések levonásához ugyanakkor továbbra is a szegmensenként meghatározott $Q'_{\uparrow,i}$, az abból származtatott $z^*_{\uparrow}$, valamint a teljesítményjellegű mutatók használata szükséges.

6.2 Időablak-érzékenységi vizsgálat

Az értékelés időablak-választással szembeni érzékenységét a visszatérő ágra szintén a két térfogatáram mellett vizsgáltam. Az elemzés különböző kezdőeltolásokkal induló időablakokat vett figyelembe a mérés kezdetétől számítva ($t_a = 0, 2{,}5, 10\ min$), továbbá különböző ablakhosszokat $(\tau_f = 30, 60, 120\ min)$; emellett a teljes idősor is értékelésre került. Referenciaesetként a $t_a = 0\ min$ és $\tau_f = 120\ min$ időablakot választottam. A 10. és 11. táblázatban a zárójelben szereplő értékek az ettől a referenciaablaktól vett relatív eltérést jelzik.

Alacsony térfogatáramnál az átmeneti mélység a teljes ablakkészletben szűk tartományban változott (31,05-32,01 m), vagyis a becsült átmeneti mélység, $z^*_{\uparrow}$, méteres léptékű ingadozásokat mutatott, amint azt az 10. ábra szemlélteti. Ezzel szemben a teljesítményhez kapcsolódó indikátorok érzékenyebbnek bizonyultak a rövid, korán induló ablakokra. A referenciaablakhoz képest a $t_a = 0\ min$ és $\tau_f = 30\ min$ eset +23,6%-os eltérést eredményezett mind $P_{exo,avg}$, mind ΔT_{out} esetén; $\tau_f = 60\ min$ alkalmazása +14,2%-ra csökkentette az eltérést (10. táblázat). A kezdőidő eltolása $\tau_f = 120\ min$ rögzítése mellett fokozatosan kisebb eltéréseket eredményezett (-3,71%, -8,36% és -10,37% $t_a = 2{,}5$ és $10\ min$ esetén), ami megmutatja, hogy a korai tranziens

időszak alacsony térfogatáramnál jelentősen torzíthatja az átlagolt mérőszámokat. Ezért összehasonlító elemzéseknél célszerű a kezdőidő rögzítése. A teljes idősor szintén értékelésre került.

11. Táblázat: Időablak-érzékenység alacsony térfogatáramnál. A zárójelek a referenciaablaktól vett relatív eltérést jelzik: $t_a = 0\ min, \tau_f = 120\ min$.

Időablak	$z_{\uparrow}^{*}[m]$(Δ%)	$P_{exo,avg}[W]$(Δ%)	$\Delta T_{out}[K]$(Δ%)	**ΔCOP** [%](Δ%)
teljes	31.17 (-0.1%)	487 (-2.2%)	0.75 (-2.2%)	2.55 (-2.3%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 30\ min$	32.01 (+2.6%)	616 (+23.6%)	0.94 (+23.6%)	3.25 (+24.4%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 60\ min$	31.60 (+1.3%)	569 (+14.2%)	0.87 (+14.2%)	2.99 (+14.6%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 120\ min$	31.20 (+0.0%)	498 (+0.0%)	0.76 (+0.0%)	2.61 (+0.0%)
$t_a = 0\ min \rightarrow end$	31.17 (-0.1%)	487 (-2.2%)	0.75 (-2.2%)	2.55 (-2.3%)
$t_a = 2\ min, \tau_f = 120\ min$	31.13 (-0.2%)	480 (-3.7%)	0.74 (-3.7%)	2.51 (-3.8%)
$t_a = 5\ min, \tau_f = 120\ min$	31.10 (-0.3%)	456 (-8.4%)	0.70 (-8.4%)	2.39 (-8.6%)
$t_a = 10\ min, \tau_f = 120\ min$	31.05 (-0.5%)	446 (-10.4%)	0.68 (-10.4%)	2.33 (-10.6%)
$t_a = 10\ min, \tau_f = 30\ min$	31.87 (+2.2%)	499 (+0.2%)	0.77 (+0.2%)	2.62 (+0.2%)
$t_a = 10\ min \rightarrow end$	31.05 (-0.5%)	446 (-10.4%)	0.68 (-10.4%)	2.33 (-10.6%)

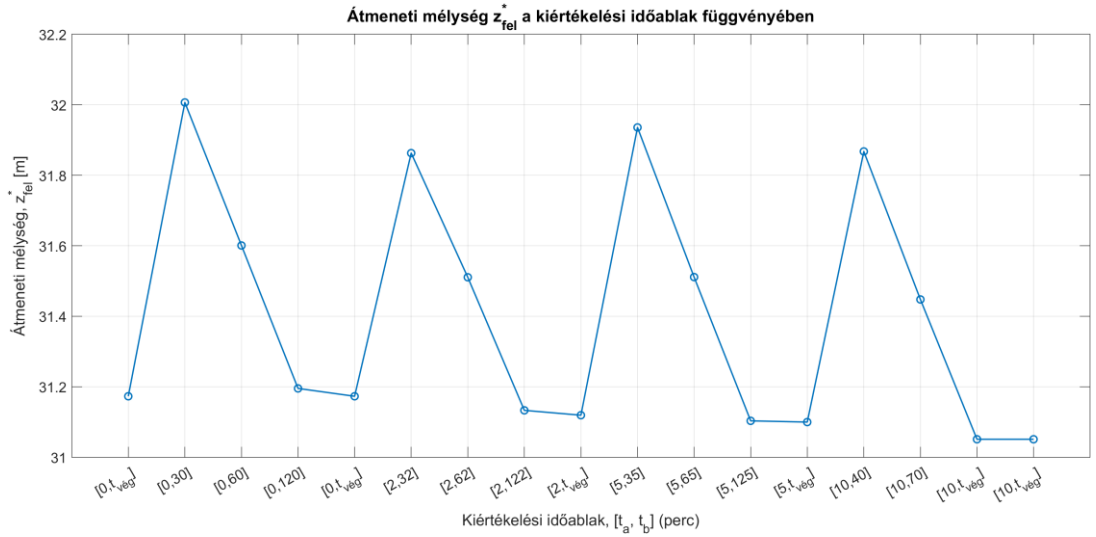
Magasabb térfogatáramnál markáns kiugró értékek jelentkeztek a közvetlenül a mérés elején induló rövid ablakokra: $t_a = 0\ min$ és $\tau_f = 30\ min$ esetén $z_{\uparrow}^{*} = 64.36\ m$, miközben a teljesítményindikátorok irreálisan nagy eltéréseket mutattak (12. táblázat). Ez a viselkedés összhangban áll azzal, hogy a teszt kezdeti szakaszát erős tranziens feltételek uralják; a túl rövid ablakok nem reprezentálják a kvázi-stacionárius üzemet. A kiugró érték eltűnt, ha:

- $\tau_f \geq 60\ min$ hosszúságú ablakokat alkalmaztunk, vagy
- rövid ablakok esetén a kezdést legalább körülbelül 10 perccel eltoltuk; ekkor $z_{\uparrow}^{*} = 24.48\ m$ adódott, és a teljesítményindikátorok körülbelül 2%-kal tértek el a referenciától.

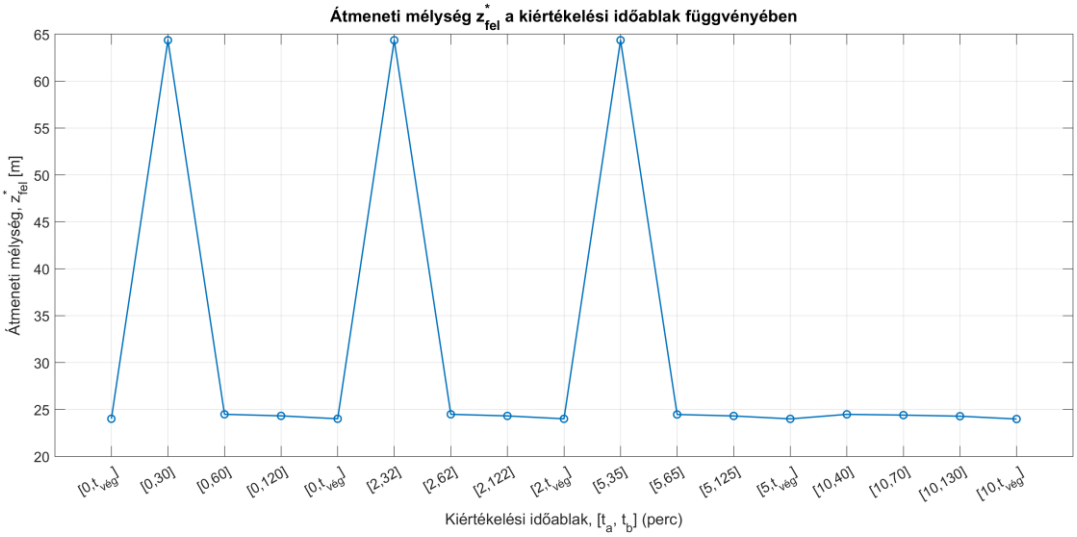
12. Táblázat: Időablak-érzékenység magas térfogatáramnál. A zárójelek a referenciaablaktól vett relatív eltérést jelzik: $t_a = 0\ min, \tau_f = 120\ min$.

Időablak	$z_{\uparrow}^{*}[m](\Delta\%)$	$P_{exo,avg}[W](\Delta\%)$	$\Delta T_{out}[K](\Delta\%)$	ΔCOP [%](Δ%)
teljes	24.01 (-1.3%)	476 (+4.4%)	0.52 (+4.4%)	1.78 (+4.5%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 30\ min$	64.36 (+164.6%)	1376 (+201.7%)	1.51 (+201.7%)	5.31 (+212.4%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 60\ min$	24.49 (+0.7%)	451 (-1.2%)	0.50 (-1.2%)	1.68 (-1.2%)
$t_a = 0\ min, \tau_f = 120\ min$	24.32 (+0.0%)	456 (+0.0%)	0.50 (+0.0%)	1.70 (+0.0%)
$t_a = 0\ min \rightarrow end$	24.01 (-1.3%)	476 (+4.4%)	0.52 (+4.4%)	1.78 (+4.5%)
$t_a = 2\ min, \tau_f = 120\ min$	24.32 (-0.0%)	456 (+0.0%)	0.50 (+0.0%)	1.70 (+0.0%)
$t_a = 5\ min, \tau_f = 120\ min$	24.31 (-0.0%)	456 (+0.1%)	0.50 (+0.1%)	1.70 (+0.1%)
$t_a = 10\ min, \tau_f = 120\ min$	24.29 (-0.1%)	456 (+0.1%)	0.50 (+0.1%)	1.70 (+0.1%)
$t_a = 10\ min, \tau_f = 30\ min$	24.48 (+0.7%)	446.9 (-2.0%)	0.49 (-2.0%)	1.67 (-2.0%)
$t_a = 10\ min \rightarrow end$	23.99 (-1.4%)	477.2 (+4.6%)	0.53 (+4.6%)	1.78 (+4.7%)

A stabilabb ablakok esetén $z_{\uparrow}^{*} = 23{,}99 - 24{,}49$ m között maradt, míg a teljesítményindikátorok szűk sávban maradtak ($P_{exo,avg}$ esetén jellemzően -2,0% és +4,7% között). Az 26. ábra a becsült átmeneti mélység, $z_{\uparrow}^{*}$, érzékenységét foglalja össze az értékelési időablak $[t_a, t_b]$ kiválasztására a visszatérő ágban (a) kis és (b) nagy térfogatáramú állapotok mellett.



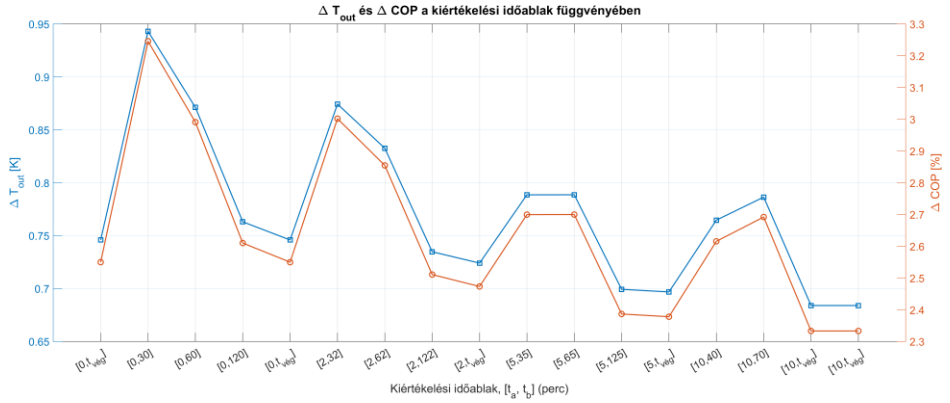
(a)



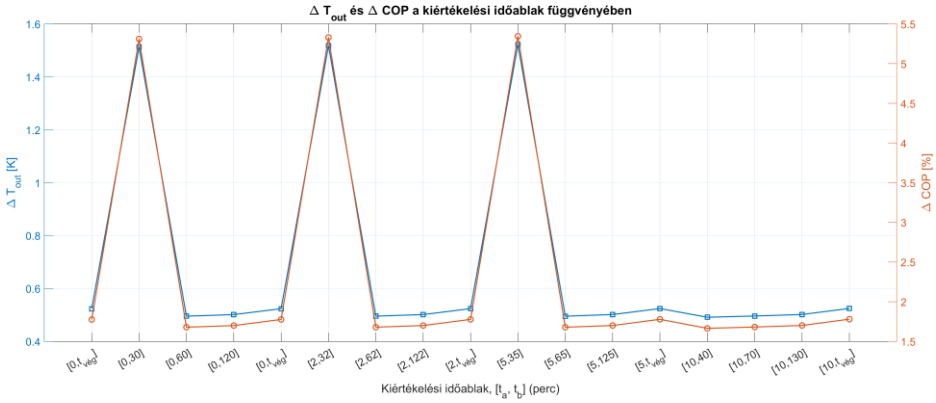
(b)

26. ábra: A becsült átmeneti mélység érzékenysége az értékelési időablak $[t_a, t_b]$ kiválasztására a visszatérő ág esetén: (a) alacsony térfogatáramú és (b) magas térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

A módszer mindkét térfogatáramnál robusztusnak bizonyult a becsült átmeneti mélység szempontjából. Az időablak megválasztásának hatását a 27. ábra szemlélteti: a. ábra az alacsony, míg a b. ábra a magas térfogatáramú állapotban mutatja a ΔT_{out} és a ΔCOP kiértékelési ablakoktól való függését. A teljesítmény- és hőmérsékletalapú mérőszámok pontosságának biztosítása érdekében azonban kerülni kell a mérés elején kiválasztott nagyon rövid ablakokat. Gyakorlati ajánlásként a további értékelésekben $\tau_f = 120\,min$, de legalább $\tau_f \geq 60\,min$ ablakok alkalmazása javasolt. Nagy térfogatáramnál, ha rövid ablak alkalmazása elkerülhetetlen, körülbelül $t_a \approx 10\,min$ eltolás javasolt a hamis becslések elkerülése érdekében. Ez alátámasztja a kiválasztott 2,1 h és 4,53 h intervallumok esetspecifikus diagnosztikai ablakokként való értelmezését, amelyek elegendőek az átmeneti mélység azonosításához, míg a teljesítményhez kapcsolódó indikátorokat óvatosabban kell értelmezni.



(a)



(b)

27. ábra: Időablak-érzékenység: ΔT_{out} és ΔCOP: (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

6.3 A küszöbskálázó tényező érzékenysége

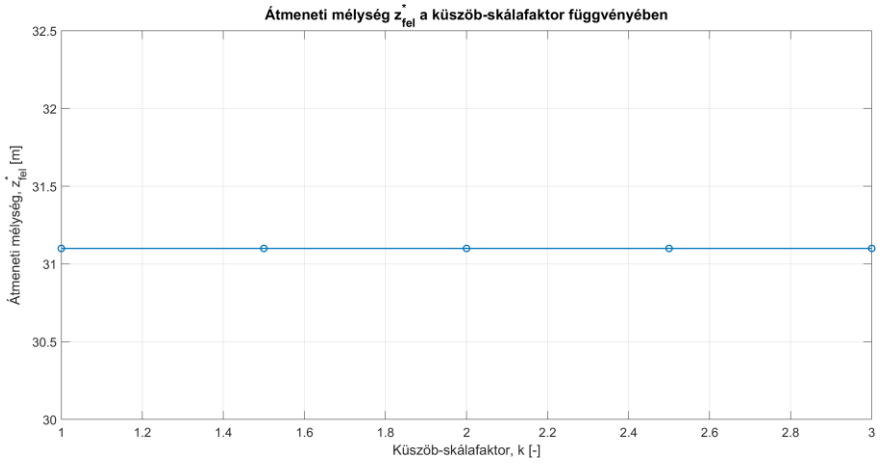
A következő érzékenységi vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy a bizonytalanságalapú szegmensosztályozásban alkalmazott dimenzió nélküli k küszöbskálázó tényező milyen mértékben befolyásolja a parazita hőleadási zóna azonosítását és az abból származtatott energetikai mutatókat. Az 5. fejezetben bemutatott módszerben a szegmensenkénti besorolási küszöb $\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i}$ alakban került meghatározásra, ahol $\varepsilon_{Q,i}$ az i-edik szegmens időintegrált vonalmenti hőmennyiségére vonatkozó osztályozási küszöb, $\sigma_{Q,i}$ ugyanezen mennyiség bizonytalansága, k pedig a küszöb skálázó tényezője. A k értékének növelése konzervatívabb osztályozást eredményez, mivel csak azok a szegmensek sorolhatók egyértelműen exoterm vagy endoterm kategóriába, amelyek időintegrált vonalmenti hőmennyisége nagyobb mértékben tér el a nullától, mint a mérési bizonytalanságból levezetett küszöb.

Az érzékenységi vizsgálat során a $k = 1, 1.5, 2, 2.5, 3$ értékek kerültek értékelésre. A vizsgálat célja annak ellenőrzése volt, hogy a küszöbskálázó tényező megválasztása befolyásolja-e az exoterm–endoterm átmeneti mélység, az átlagos parazita hőleadási veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték, valamint a becsült relatív COP-változás értékét. Emellett vizsgálatra került az is, hogy a szegmensek exoterm, endoterm és semleges kategóriákba történő besorolása mennyiben változik a k értékének módosításával.

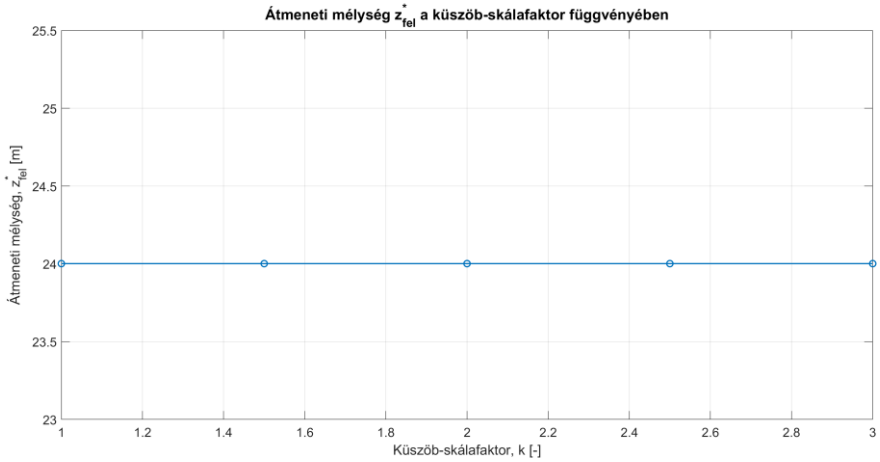
Az elemzéshez a 6.1 alfejezetben bemutatott globális visszatérő ági jel, valamint a 6.2 alfejezet időablak-érzékenységi vizsgálata alapján rögzített, térfogatáram-specifikus kiértékelési ablakok kerültek alkalmazásra. Alacsony térfogatáram esetén az elemzési időablak $t_a = 5\ min$ kezdőidővel és $t_b = 126\ min$ záróidővel került kijelölésre, így az

ablak hossza $\tau_f = 121\ min$ volt. Magas térfogatáram esetén az alkalmazott időablak $t_a = 5\ min$ és $t_b = 257\ min$ között helyezkedett el, amely $\tau_f = 252\ min$ hosszúságú kiértékelési intervallumnak felel meg. Mindkét esetben a cél a kezdeti tranziens szakasz kizárása és a stabilabb üzemi tartomány értékelése volt.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a becsült átmeneti mélység a teljes vizsgált k-tartományban változatlan maradt. A 28. ábra szemlélteti, amely az átmeneti mélység $z_{\uparrow}^{*}$ alakulását mutatja a küszöbskálázó tényező függvényében. A 28a. ábra az alacsony térfogatáramú, míg a 28b. ábra a magas térfogatáramú állapot eredményeit mutatja be. Alacsony térfogatáram mellett minden vizsgált k érték esetén $z_{\uparrow}^{*} = 31{,}10$ m adódott, míg magas térfogatáram esetén az átmeneti mélység $z_{\uparrow}^{*} = 24{,}00$ m értéken maradt. A bizonytalansági küszöb skálázása a vizsgált $k \in [1{,}3]$ tartományban nem módosította az első stabil exoterm–endoterm átmenet helyét.



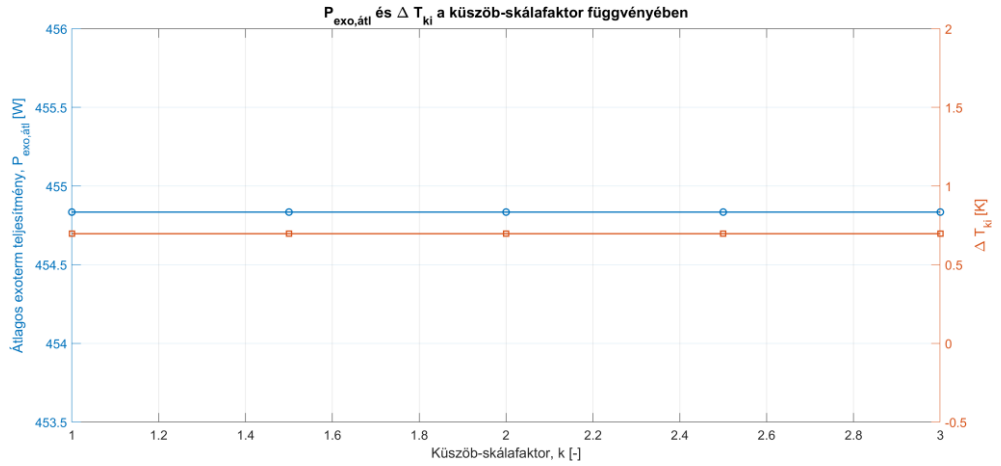
(a)



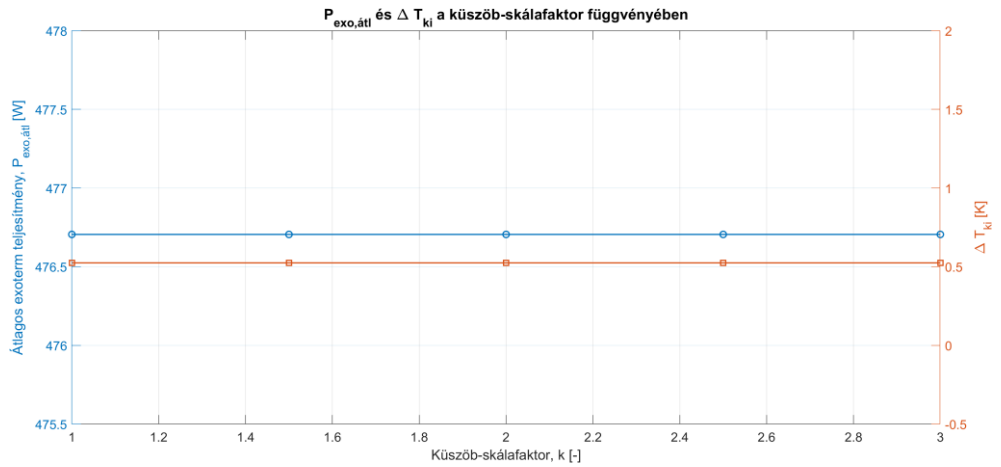
(b)

28. ábra: k-érzékenység: $z_{\uparrow}^{*}$ alakulása k függvényében: (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

A teljesítményjellegű mutatók szintén gyakorlatilag függetlennek bizonyultak a k értékétől (29. ábra: A 29a. ábra az alacsony, míg a 29b. ábra a magas térfogatáramú állapot eredményeit mutatja be). Alacsony térfogatáram esetén az átlagos „parazita” hőleadási veszteségteljesítmény $P_{exo,avg} = 455\,W$ értéket vett fel, a hozzá tartozó forrásoldali hőmérséklet-egyenérték pedig $\Delta T_{out} = 0.70\,K$ volt. A becsült relatív COP-változás ebben az esetben $\Delta\mathrm{COP} = 2.38\%$ értéken maradt. Magas térfogatáram mellett az átlagos „parazita” hőleadási veszteségteljesítmény $P_{exo,avg} = 477\,W$ volt, amelyhez $\Delta T_{out} = 0.52\,K$ forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és $\Delta\mathrm{COP} = 1.78\%$ becsült relatív COP-változás tartozott. Az értékek változatlansága arra utal, hogy a parazita hőleadási zónához tartozó szegmensek időintegrált vonalmenti hőmennyisége a vizsgált tartományban minden esetben kellően nagy volt ahhoz, hogy a szegmensbesorolást a k tényező módosítása ne befolyásolja.



(a)



(b)

29. ábra: k-érzékenység: $P_{exo,avg}$ és ΔT_{out}: (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

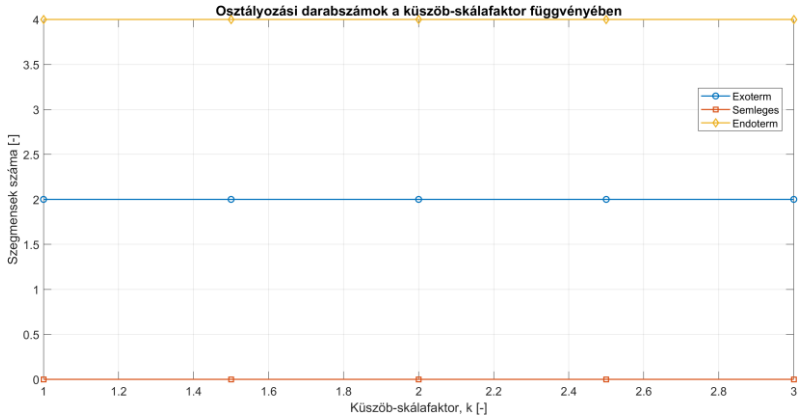
A szegmensenkénti osztályozási struktúra szintén változatlan maradt. A 30. ábra szemlélteti az exoterm, semleges és endoterm kategóriába sorolt szegmensek számát a k függvényében. A 30a. ábra az alacsony, míg a 30b. ábra a magas térfogatáramú állapot eredményeit ábrázolja. Alacsony térfogatáram esetén minden vizsgált k érték mellett két exoterm, nulla semleges és négy endoterm szegmens volt azonosítható:

$$N_{exo} = 2, N_{semleges} = 0, N_{end} = 4$$

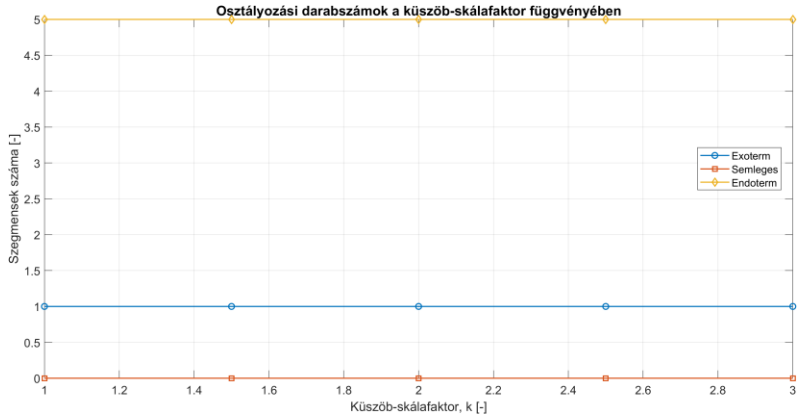
Magas térfogatáram esetén egy exoterm, nulla semleges és öt endoterm szegmens adódott:

$$N_{exo} = 1, N_{semleges} = 0, N_{end} = 5$$

Ez megerősíti, hogy a vizsgált üzemi állapotokban az exoterm és endoterm szakaszok elkülönítése nem a k paraméter finomhangolásától függött, hanem a mért hőmérsékletprofilokból számított időintegrált vonalmenti hőmennyiségek előjele és nagysága alapján stabilan meghatározható volt.



(a)



(b)

30. ábra: Besorolási érzékenység: az exoterm/semleges/endoterm szegmensek száma k függvényében: (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot, saját szerkesztés [ZV2]

A küszöbskálázó tényező érzékenységi vizsgálata igazolta, hogy a javasolt bizonytalanságalapú osztályozási eljárás a $k \in [1,3]$ tartományban mindkét vizsgált térfogatáram mellett robusztusnak tekinthető. Sem $z_{\uparrow}^{*}$, sem $P_{exo,avg}$, sem a ΔT_{out} és ΔCOP mutatók, sem pedig a szegmensenkénti besorolási struktúra nem mutatott érdemi változást. Ennek alapján a további kiértékelésekhez a középtartományba eső $k = 2$ érték alkalmazása indokoltnak tekinthető, mivel ez a mérési bizonytalanság konzervatív figyelembevételét biztosítja, ugyanakkor nem vezet túlzottan szigorú szegmenselutasításhoz.

6.4 Mintavételi ritkítás és hiányadat-kezelés hatása

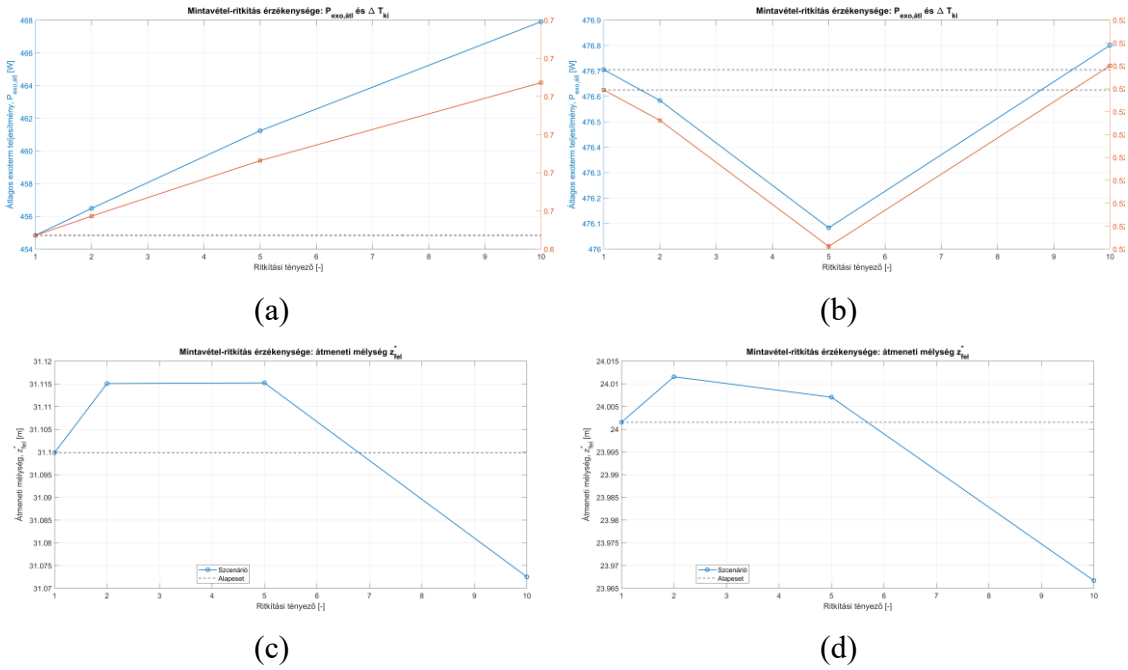
A terepi monitoringadatok gyakorlati alkalmazása során számolni kell azzal, hogy az idősorok nem minden esetben teljesek és egyenletes mintavételezésűek. Előfordulhatnak hiányzó minták, rövidebb adatkimaradások, valamint olyan adatrögzítési helyzetek, amikor a rendelkezésre álló adatsűrűség a feldolgozás során csökken. Mivel a javasolt diagnosztikai eljárás időintegrált mennyiségekre épül, szükséges annak vizsgálata, hogy a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok pótlása milyen mértékben befolyásolja az átmeneti mélységmutatót és a kapcsolódó energetikai indikátorokat.

Ennek érdekében két kiegészítő érzékenységi vizsgálat készült. Az első vizsgálatban az eredeti idősorok mesterséges mintavételi ritkítása történt meg, míg a második esetben szintetikusan beillesztett adathiányok lineáris interpolációval történő pótlásának hatása került értékelésre. Mindkét vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy az átmeneti mélység, az átlagos parazita hőleadási veszteségteljesítmény, $P_{exo,avg}$, valamint a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték, ΔT_{out}, mennyire érzékeny az adatminőség és a mintavételi feltételek változására.

A mintavételi ritkítási vizsgálat során az eredeti idősor minden f-edik mintája került megtartásra, ahol $(f = 1, 2, 5, 10)$. Az $f = 1$ eset az eredeti, ritkítás nélküli idősornak felel meg, míg a nagyobb f értékek fokozatosan csökkentett adatsűrűséget jelentenek. Alacsony térfogatáramú üzemállapotban a mintavételi ritkítás a $P_{exo,avg}$ és a ΔT_{out} értékét legfeljebb 2,9%-kal módosította, még $f = 10$ esetén is. Ugyanebben az esetben az átmeneti mélység eltérése 0,03 m alatt maradt, vagyis a $z_{\uparrow}^{*}$ mutató gyakorlatilag változatlannak tekinthető. Magas térfogatáram mellett a mintavételi ritkítás hatása a vizsgált tartományban elhanyagolható volt, a relatív eltérés legfeljebb 0,13%-ot ért el.

A 31. ábra a mintavételi ritkítás hatását szemlélteti a származtatott mutatókra. Az (a) és (b) részábrákon a $P_{exo,avg}$ és a ΔT_{out} értékek változása látható alacsony, illetve magas

térfogatáram esetén. A (c) és (d) részábrák az átmeneti mélység változását mutatják a ritkítási tényező függvényében. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az átmeneti mélységmutató a mintavételi ritkítással szemben mindkét üzemállapotban robusztus, míg a teljesítményjellegű mutatók kis térfogatáramnál kissé érzékenyebbnek bizonyulnak.

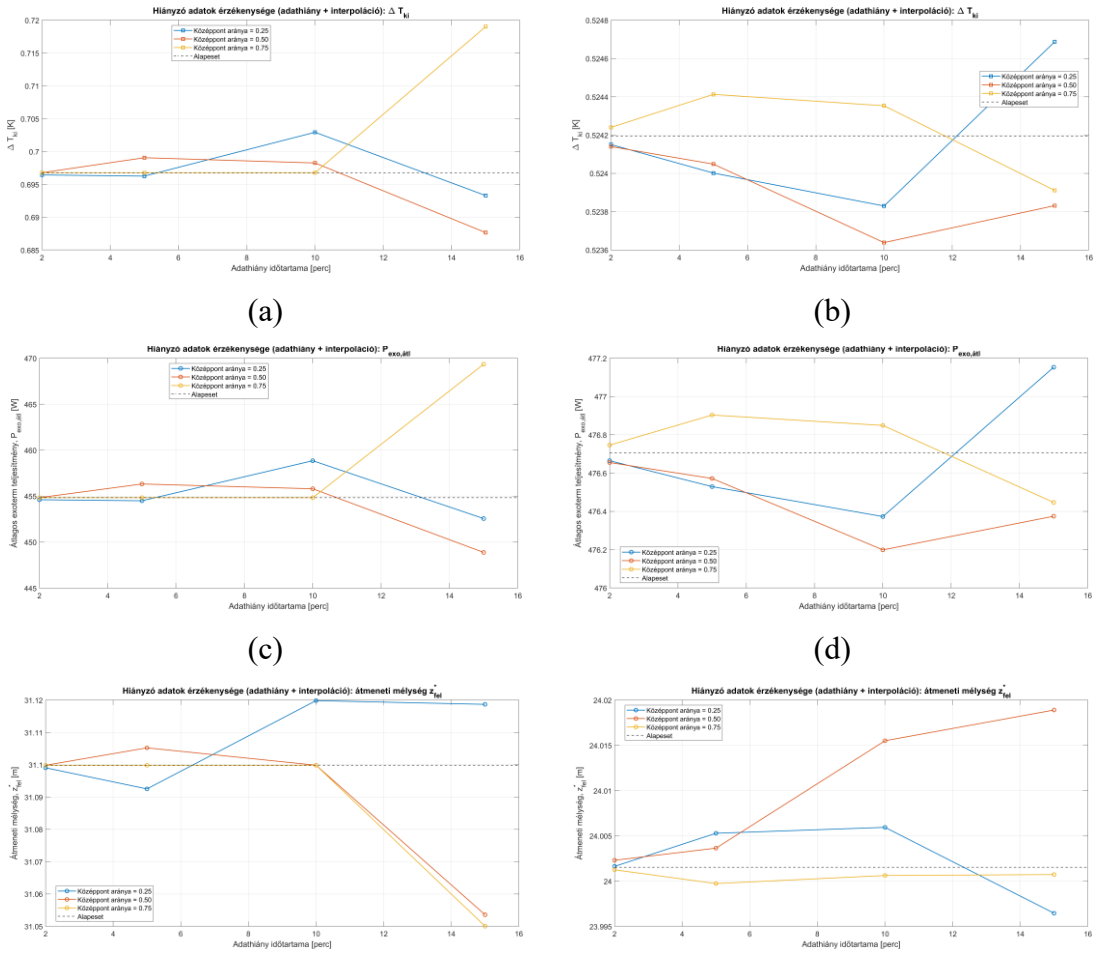


31. ábra: A mintavételi ritkítás hatása a származtatott mutatókra (a) $P_{exo,avg}$ és a ΔT_{out} alacsony térfogatáram esetén; (b) $P_{exo,avg}$ és a ΔT_{out} magas térfogatáram esetén; (c) $z^*_{\uparrow}$ alacsony térfogatáram estén; (d) $z^*_{\uparrow}$ magas térfogatáram estén, saját szerkesztés [ZV2]

A hiányzó adatok kezelésének vizsgálatához mesterséges adathiányok kerültek beillesztésre a kiválasztott kiértékelési ablakokba. Az adathiány időtartama $\tau_{gap} = 2, 5, 10, 15\ min$ értékeket vett fel. A hiányzó szakasz időablakon belüli relatív helyzetét a hézagközéppontot leíró paraméter jellemezte $c_{gap} = 0{,}25;\ 0{,}50;\ 0{,}75$. A mesterségesen bevezetett adathiány az értékelési ablak első, középső vagy utolsó harmadához közelebb helyezkedett el. A hiányzó adatszakaszok pótlása minden esetben lineáris interpolációval történt.

A hiányadat-kezelési vizsgálat eredményei alapján kis térfogatáram esetén a hosszabb, különösen a 10–15 perces adathiányok már nem elhanyagolható eltéréseket okozhattak a teljesítményjellegű mutatókban. A $P_{exo,avg}$ és a ΔT_{out} értéke szélső esetben akár 3,2%-kal is módosult. Magas térfogatáram esetén ugyanakkor a mesterséges adathiány és az interpoláció hatása gyakorlatilag elhanyagolható maradt, az indukált változás legfeljebb 0,11% volt. Nagyobb hidraulikai terhelés mellett a mérési jel stabilabb, ezért kevésbé érzékeny a rövidebb adathiányokra és azok interpolációs pótlására.

32. ábra a hiányzó adatszakaszok időtartamának és relatív helyzetének hatását mutatja be. A részábrák a ΔT_{out}, a $P_{exo,avg}$, valamint a $z_{\uparrow}^{*}$ változását szemléltetik alacsony és magas térfogatáramú üzemállapotban. A különböző görbék az eltérő hézagközéppont-pozíciókhoz tartozó eredményeket jelölik. Az ábra alapján megállapítható, hogy a hiányzó adatok hatása elsősorban alacsony térfogatáram mellett válik érzékelhetővé, míg magas térfogatáram esetén a vizsgált mutatók csak minimális változást mutatnak.



32. ábra: A hiányzó adatszakaszok időtartamának és relatív helyzetének hatása a származtatott mutatókra lineáris interpoláció alkalmazása mellett, (a–b) ΔT_{out}; (c–d) $P_{exo,avg}$; (e–f) $z_{\uparrow}^{*}$; bal oldali részábrák: kis térfogatáramú üzemállapot; jobb oldali részábrák: nagy térfogatáramú üzemállapot, saját szerkesztés [ZV2]

Gyakorlati alkalmazás szempontjából ezért az eredeti mintavételi sűrűség megtartása, illetve legfeljebb mérsékelt ritkítás alkalmazása javasolt. A vizsgált adatok alapján az $f \leq 2$ ritkítási tényező még biztonságosan kezelhetőnek tekinthető. A 10 percnél hosszabb adathiányokat célszerű elkerülni, vagy külön érzékenységi ellenőrzéssel értékelni. Amennyiben hosszabb hiányzó adatszakasz fordul elő a kiválasztott kiértékelési ablakban, indokolt lehet új, adatminőségi szempontból kedvezőbb időablak kijelölése.

6.5 A módszer alkalmazhatósági feltételei és korlátai

A kidolgozott, többmélységű visszatérő ági hőmérsékletprofilokon alapuló diagnosztikai eljárás alkalmas arra, hogy működő U-csöves talajszondában azonosíthatóvá tegye a visszatérő ág mentén kialakuló parazita hőleadási zónát, meghatározza annak exoterm–endoterm átmeneti mélységét, valamint energetikai és COP-szempontból értelmezhető mutatókat szolgáltasson. A módszer alkalmazása ugyanakkor nem tekinthető korlátlanul általánosítható eljárásnak, mivel az eredmények megbízhatóságát a mérőrendszer mélységi felbontása, az adatminőség, a kiválasztott kiértékelési időablak, a hidraulikai üzemállapot, valamint a modellalkotási feltételek együttesen határozzák meg.

A módszer mérésalapú, a visszatérő ág több mélységben rögzített hőmérsékletadataiból szegmensenkénti vonalmenti hőáram számítható, majd annak időintegrált értéke alapján az egyes szakaszok exoterm, endoterm vagy bizonytalan viselkedésűnek minősíthetők. A mérési bizonytalanság figyelembevétele azért szükséges, mert a módszer nem egyszerű előjelvizsgálaton alapul, hanem a hőmérsékletmérés bizonytalanságát a vonalmenti hőáramra, majd az időintegrált vonalmenti hőmennyiségre is továbbvezeti. Ennek megfelelően a szegmensenkénti osztályozási küszöb $\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i}$ alakban adható meg. A jelen vizsgálatban alkalmazott $k = 2$ érték a mérési bizonytalanság konzervatív figyelembevételét biztosította, miközben a 6.3 alfejezetben bemutatott érzékenységi vizsgálat alapján nem vezetett túlzottan szigorú szegmenselutasításhoz.

A megbízható alkalmazás feltételeit mérnöki szempontból célszerű külön rögzíteni. Ezek a feltételek nem pusztán technikai részletek, hanem meghatározzák, hogy a $z_{\uparrow}^{*}$, a $P_{exo,avg}$, ΔT_{out} és $\Delta\mathrm{COP}$ mutatók milyen mértékben használhatók üzemi monitoring- és döntéstámogatási célra. A fő alkalmazhatósági feltételeket a 13. táblázat foglalja össze.

13. Táblázat: A parazita hőleadási átmeneti mélységmutató megbízható alkalmazásának feltételei

Alkalmazhatósági feltétel	**Megbízható alkalmazás kritériuma**	**Értelmezés, ha nem teljesül**
Üzemállapot	Aktív fűtési üzem, stabil és dokumentált térfogatáram	Az eredmény nem hasonlítható össze más üzemállapotokkal.
Kiértékelési időablak	Legalább 60 perc, javasoltan 120 perc stabil üzem	Rövid vagy induló tranziens ablak torzíthatja a $P_{exo,avg}$, ΔT_{out}, $\Delta\mathrm{COP}$ értékeket.
Kezdeti tranziens kizárása	A $q_{glob,\uparrow}(t)$ jel alapján a tranziens szakasz különíthető el	Hibás $z_{\uparrow}^{*}$ vagy túlbecsült veszteségmutatók adódhatnak.

Mérési bizonytalanság figyelembevétele	Bizonytalansági küszöb alkalmazása: $\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i}$	Előjel alapján történő osztályozás esetén téves exoterm/endoterm besorolás lehetséges.
Küszöbparaméter	$k = 2$ alkalmazása; $k = 1 - 3$ tartományban ellenőrzött stabilitás	A módszer klasszifikációs robusztussága nem igazolt.
Jel–zaj viszony	A szegmensenkénti ΔT legyen nagyobb a mérési zajnál	Alacsony SNR esetén a teljesítménymutatók zajérzékenyek.
Hiányzó adatok	10 percnél hosszabb adathiány ne legyen a kiértékelési ablakban	Hosszabb hiány esetén érzékenységi vizsgálat vagy új időablak szükséges.
Mintavételi sűrűség	Lehetőleg eredeti vagy legfeljebb mérsékelten ritkított idősor	Erős ritkítás torzíthatja az időintegrált szegmensenergiát.
Mélységi felbontás	A $z_{\uparrow}^{*}$ érték a 10 m-es szenzorkiosztás alapján interpolált	A 10 m-nél vékonyabb lokális zónák nem azonosíthatók közvetlenül.

A 13. táblázat alapján megállapítható, hogy a módszer legfontosabb alkalmazhatósági feltételei az adatminőséghez, az időablak-választáshoz és a hidraulikai stabilitáshoz kapcsolódnak. A $z_{\uparrow}^{*}$ indikátor elsősorban lokalizációs mutató, ezért általában robusztusabban értelmezhető. Ezzel szemben a $P_{exo,avg}$, ΔT_{out}, $\Delta\mathrm{COP}$ teljesítményjellegű mutatók érzékenyebbek a tranziens szakaszokra, a hiányzó adatokra és a kiértékelési időablak hosszára.

A robusztussági és érzékenységi vizsgálatok alapján a módszer eredményei nem minden kiértékelési körülmény között értelmezhetők azonos megbízhatósággal. Ezért célszerű a kiértékelés érvényességét három szinten meghatározni. A cél nem általános minősítési rendszer bevezetése, hanem annak rögzítése, hogy az adott mérési ablakból származó eredmények teljes körű diagnosztikai értékelésre, korlátozott értelmezésre vagy további mérés kijelölésére alkalmasak-e. Az érvényességi szinteket a 14. táblázat foglalja össze.

14. Táblázat: A $z_{\uparrow}^{*}$ indikátor és a kapcsolódó teljesítményjellegű mutatók kiértékelési érvényességi szintjei.

Szint	Szükséges feltételek	Felhasználható eredmények	Korlátozás
I.	Stabil fűtési üzem; dokumentált térfogatáram; legalább 60 perc, javasoltan 120 perc időablak; a kezdeti	$z_{\uparrow}^{*}$, $P_{exo,avg}$, ΔT_{out}, $\Delta\mathrm{COP}$	Az eredmények üzemi diagnosztikai és

	tranziens szakasz kizárása; nincs jelentős adathiány; bizonytalansági küszöbölés alkalmazása		összehasonlító célra használhatók
II.	Rövidebb időablak; részben tranziens üzem; kisebb adathiány; alacsonyabb jel–zaj viszony; interpolált adatszakasz jelenléte	Elsősorban $z_{\uparrow}^{*}$; a teljesítménymutatók csak tájékoztató jelleggel	A $P_{exo,avg}$, ΔT_{out}, $\Delta\mathrm{COP}$ értékek érzékenyek lehetnek az időablakra és az adatminőségre
III.	Instabil térfogatáram; túl rövid vagy induló tranziens időablak; jelentős adathiány; bizonytalansági küszöb alatti szegmensenergiák; nem azonosítható stabil előjelváltás	Nem javasolt következtetés levonása	Új időablak kijelölése vagy ismételt mérés szükséges

A fenti érvényességi szintek közvetlenül kapcsolódnak a 4. tézishez. A vizsgálatok igazolták, hogy a módszer a bizonytalanságalapú osztályozás paramétereinek ésszerű tartományában stabil, ugyanakkor érzékeny a kiértékelési időablak megválasztására és bizonyos hiányadat-kezelési esetekre. Ezért a módszer gyakorlati alkalmazása során nem elegendő kizárólag a számított $z_{\uparrow}^{*}$, $P_{exo,avg}$, ΔT_{out}, és ΔCOP értékeket közölni. Az alkalmazott időablakot, az adatfolytonosságot, a térfogatáramot, a mintavételi feltételeket és a bizonytalansági küszöbölés paramétereit is dokumentálni kell.

A módszer jelen vizsgálatban bemutatott igazolása egyetlen műszerezett, 100 m mélységű U-csöves talajszondára épül, amely egy működő szondamező részeként üzemelt. Emiatt a szomszédos furatokkal fennálló termikus kölcsönhatások, valamint az esetleges talajvízhatás nem választhatók szét teljes mértékben a lokális furatválasztól. Ennek megfelelően a kapott eredmények nem általános, minden furatmezőre változatlanul átvihető előrejelzésként, hanem egy működő rendszerben mért, effektív *in situ* diagnosztikai válaszként értelmezhetők. Ez a korlát ugyanakkor nem csökkenti a módszer értékét, hanem pontosan kijelöli annak alkalmazási tartományát. Megfelelő adatminőség, stabil üzemállapot és dokumentált kiértékelési feltételek mellett a módszer alkalmas a visszatérő ág mentén kialakuló parazita hőleadási zóna lokalizálására és energetikai értelmezésére.

A 4. tézis szempontjából ezért a fejezet fő következtetése az, hogy a módszer megbízható alkalmazása nem kizárólag az algoritmus helyességén múlik, hanem az adatminőség, az időablak-választás, a hidraulikai üzemállapot és a bizonytalanságalapú küszöbölés

együttes teljesülésén. A 13. és 14. táblázatban összefoglalt feltételek kijelölik azt az üzemi monitoringtartományt, amelyben a $z_{\uparrow}^{*}$ indikátor és a hozzá kapcsolódó teljesítményjellegű mutatók reprodukálhatóan, mérnöki szempontból értelmezhető módon használhatók.

6.6 A 4. tézis megfogalmazása

Meghatároztam az átmeneti mélység indikátor, és a kapcsolódó teljesítménymérőszámok megbízható alkalmazási feltételeit üzemi monitoring környezetben. Robusztussági és érzékenységi vizsgálatokkal igazoltam, hogy a módszer stabil a klasszifikációs paraméterekre, de érzékeny a kiértékelési időablakra és egyes hiányadat-kezelési megoldásokra. Kimutattam, hogy a tranziens szakaszok helytelen kezelése jelentős torzulást okozhat, ezért azok elkülönítése a reprodukálható diagnosztikai alkalmazás alapfeltétele.

Kapcsolódó publikáció: [ZV2]

7 ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

7.1 Új tudományos eredmények

Az értekezésemben bemutatott kutatás célja egy üzemelő talajszondás hőszivattyús rendszer többmélységű hőmérsékletmérésein alapuló, mérés- és modellalapú kiértékelési keret kidolgozása volt. A vizsgálatok során a terepi mérési adatokból származtatott vonalmenti hőáramok felhasználásával mélység szerint felbontott hővezetési tényezőprofil került meghatározásra, majd az eredmények TRT-vizsgálattal, érzékenységi elemzésekkel és alkalmazhatósági feltételek kijelölésével kerültek értékelésre.

A kutatás másik fő iránya a visszatérő ágban kialakuló parazita hőleadási viselkedés mérésalapú azonosítása volt. Ennek keretében az időintegrált vonalmenti hőmennyiségen és a mérési bizonytalanság figyelembevételén alapuló osztályozási eljárás került kidolgozásra, amely lehetővé teszi az exoterm–endoterm átmeneti mélység meghatározását, valamint a jelenség energetikai és rendszerszintű értelmezését.

Az alábbi tézisek a disszertációmban bemutatott mérési, modellezési, validációs és érzékenységi vizsgálatok legfontosabb tudományos eredményeit foglalják össze. A tézisek együttesen kijelölik a kidolgozott eljárások újdonságtartalmát, mérnöki

alkalmazhatóságát, valamint azokat az üzemi és adatminőségi feltételeket, amelyek mellett az eredmények megbízhatóan értelmezhetők.

1.Tézis:

Kidolgoztam egy in-situ, szegmensenkénti inverz azonosítási módszert U-csöves talajszondák mélységfüggő effektív hővezetési tényezőprofiljának meghatározására. Az eljárás 10 m-es vertikális felbontású tranziens hőmérsékletmérésekből, folyadékoldali energiamérleg alapján számított vonalmenti hőáram és egydimenziós radiális hővezetési modell illesztésével becsüli a szegmensenkénti λ_i értékeket. A módszer a klasszikus TRT-vel szemben nem átlagos, hanem mélység szerint felbontott hővezetési információt szolgáltat.

Kapcsolódó publikáció: [ZV1]

2.Tézis:

A szegmensenként azonosított $\lambda(z)$ profil TRT-vel való összevetésére energia-súlyozott effektív hővezetési tényezőt definiáltam. Igazoltam, hogy a módszer TRT-szintű pontossággal reprodukálja a referencia hővezetést. A TRT-vel meghatározott értékhez képest az eltérés két térfogatáram mellett is ±2%-on belül maradt. Zaj- és paraméterérzékenységi elemzéssel meghatároztam az alkalmazhatóság feltételeit, és kimutattam, hogy a rekonstrukció stabilitását főként a jel–zaj viszony, míg R_b bizonytalanságának hatását elsősorban a $\lambda(z)$ profil amplitúdója tükrözi.
Kapcsolódó publikáció: [ZV1]

3.Tézis:

Kidolgoztam egy terepi mérési adatokon alapuló, bizonytalanságvezérelt eljárást a talajszondás hőcserélőben kialakuló parazita exoterm zóna lokalizálására. A többmélységű visszatérő ági hőmérsékletprofilokból, tengelyirányú szegmentálással és mérési bizonytalanságon alapuló küszöböléssel meghatároztam az exoterm átmeneti mélységet. Két reprezentatív üzemállapotban $z_{\uparrow}^{*} = 31,17$ m, illetve $z_{\uparrow}^{*} = 24,01$ m értéket kaptam, körülbelül 0,48 kW átlagos exoterm teljesítmény mellett. A jelenséget forrásoldali hőmérséklet-egyenértékként és Carnot-skálázott COP-hatásként is értelmeztem, amely a vizsgált időablakban 2,55%, illetve 1,78% COP-javulási potenciált mutatott.
Kapcsolódó publikáció: [ZV2]

4.Tézis:

Meghatároztam az átmeneti mélység indikátor, és a kapcsolódó teljesítménymérőszámok megbízható alkalmazási feltételeit üzemi monitoring környezetben. Robusztussági és érzékenységi vizsgálatokkal igazoltam, hogy a módszer stabil a klasszifikációs paraméterekre, de érzékeny a kiértékelési időablakra és egyes hiányadat-kezelési megoldásokra. Kimutattam, hogy a tranziens szakaszok helytelen kezelése jelentős torzulást okozhat, ezért azok elkülönítése a reprodukálható diagnosztikai alkalmazás alapfeltétele.

Kapcsolódó publikáció: [ZV2], [ZV8]

7.2 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlások és további fejlesztési irányok

Az értekezésemben bemutatott eredményeim gyakorlati hasznosítását elsősorban a talajszondás hőszivattyús rendszerek tervezésében, üzembe helyezésében, diagnosztikai felügyeletében és hosszú távú energetikai értékelésében látom. A kidolgozott módszereim nem a jelenleg alkalmazott TRT-vizsgálatok kiváltását célozzák, hanem azok kiegészítésére adnak lehetőséget. A kutatási eredményeim alapján javaslom, hogy nagyobb vagy energetikailag érzékenyebb szondamezők esetén a hagyományos TRT-vizsgálat mellett legalább egy referencia-talajszondán mélység szerint felbontott hőmérséklet-monitorozás is történjen. Ennek segítségével a teljes furathosszra vonatkozó átlagos hővezetési tényező mellett a furat menti vertikális hőtechnikai eltérések is értelmezhetők.

A szegmensenkénti inverziós módszerrel meghatározott mélységfüggő hővezetési tényezőprofil, $\lambda(z)$, felhasználható a szondamező tervezési paramétereinek pontosítására. A módszer alkalmazása különösen akkor indokolt, ha a teljes furathosszra vonatkozó átlagos TRT-paraméterek alapján nem dönthető el, hogy a hőátadás szempontjából kedvezőbb vagy kedvezőtlenebb zónák a furat mely mélységi tartományaiban helyezkednek el. Ilyen esetekben a $\lambda(z)$ profil nem önmagában a talaj rétegzettségének kimutatása miatt fontos, hanem azért, mert mélység szerint felbontott hőtechnikai információt ad a szondahossz hasznosításáról, a lokális hőátadási különbségekről és a tervezési paraméterek pontosításának lehetőségéről. A standard TRT megbízható integrált paramétereket ad, de nem képes közvetlenül felbontani a fúrólyuk menti vertikális heterogenitásokat. Ezt a dolgozatomban bemutatott módszer kiegészítő

információval tudja támogatni. Ennek megfelelően a módszer elsősorban olyan mérnöki feladatokban lehet hasznos, mint a szondamező-méretezés pontosítása, a furathossz-optimalizálás, a helyspecifikus talajmodell finomítása, valamint az üzemi viselkedés mélység szerinti értelmezése.

Fontos hasznosítási lehetőségnek tartom az energia-súlyozott effektív hővezetési tényező alkalmazását is. Ennek segítségével a szegmensenkénti $\lambda(z)$ profil egyetlen, TRT-vel összevethető értékké alakítható. A dolgozatban bemutatott összehasonlítás alapján a szegmensenkénti inverziós módszerrel kapott energia-súlyozott értékek a TRT-alapú referenciaértéktől ±2%-on belül maradtak. Ez alapján javaslom, hogy a módszer a TRT mellett validációs és ellenőrző eszközként is alkalmazható legyen, különösen akkor, ha a tervezéshez nem elegendő egyetlen, teljes furathosszra vonatkozó átlagérték.

A meglévő talajszondás rendszerek esetében a visszatérő ágban meghatározott parazita hőleadási átmeneti mélység, alkalmazását tartom az egyik legközvetlenebbül hasznosítható eredménynek. A módszerrel kimutatható, hogy a visszatérő ág sekélyebb szakaszain jelentkezik-e veszteségjellegű hőleadás, és meghatározható az a mélység, amely alatt már a hasznos hőfelvétel válik dominánssá. A dolgozatban két üzemi állapotra 31,17 m, illetve 24,01 m átmeneti mélység adódott, miközben a parazita hőleadási veszteségteljesítmény nagyságrendje körülbelül 0,48 kW volt. A becsült forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és COP-hatás alapján a parazita hőleadás mérséklése 2,55%, illetve 1,78% potenciális COP-javulásnak felelt meg.

Ezek alapján javaslom, hogy meglévő rendszereknél a $z_{\uparrow}^{*}$ indikátort diagnosztikai eszközként alkalmazzák teljesítménycsökkenés, kedvezőtlen forrásoldali hőmérsékletszint vagy nem megfelelő hidraulikai beállítás gyanúja esetén. Az indikátor segítségével nemcsak az állapítható meg, hogy van-e veszteségjellegű sekély hőleadás, hanem az is, hogy milyen mélységig célszerű beavatkozást tervezni. Ilyen beavatkozás lehet például a sekély szakasz hőtechnikai leválasztása vagy szigetelése, a visszatérő ági csővezetés hőveszteségének csökkentése, a hidraulikai beszabályozás felülvizsgálata, illetve az üzemi térfogatáram módosítása. Így a módszer nemcsak hibafeltárásra, hanem célzott javító intézkedések meghatározására is használható.

A gyakorlati alkalmazás szempontjából az alábbi ajánlásokat fogalmazom meg:

- **Új szondamezők tervezésénél** javaslom a TRT kiegészítését többmélységű hőmérsékletméréssel legalább egy referenciafuratban, hogy a tervezés ne kizárólag átlagos hővezetési tényezőn alapuljon.
- **Meglévő rendszerek felülvizsgálatánál** javaslom a visszatérő ági parazita hőleadási zóna vizsgálatát, mert ezzel kimutatható a sekély zónákban jelentkező veszteség és annak energetikai következménye.
- **Üzembe helyezési méréseknél** javaslom különböző térfogatáramok összehasonlítását, mivel az eredményeim alapján a hidraulikai terhelés jelentősen befolyásolja a jel–zaj viszonyt és a szegmensenkénti kiértékelés megbízhatóságát.
- **Monitoringrendszerek esetén** javaslom a $z_{\uparrow}^{*}$, Pexo,avg, ΔTout és becsült ΔCOP mutatók beépítését az üzemi adatfeldolgozásba, mert ezek közvetlenül értelmezhető diagnosztikai információt adnak.
- **Adatfeldolgozásnál** javaslom a bizonytalanságalapú küszöbölés alkalmazását, a kezdeti tranziens szakasz kizárását, valamint legalább 60 perces, célszerűen 120 perces stabil üzemi időablak kijelölését.

A továbbfejlesztés egyik legfontosabb irányának a módszer több helyszínen történő validálását tartom. A jelen kutatás egyetlen műszerezett, 100 m mélységű U-csöves talajszondára épült, ezért szükséges lenne eltérő geológiai, hidrogeológiai és üzemi adottságú rendszereken is vizsgálni az eljárás alkalmazhatóságát. Ez lehetővé tenné annak meghatározását, hogy a módszer milyen megbízhatósággal használható különböző szondageometriák, furatmező-elrendezések és talajrétegződések esetén.

További fejlesztési lehetőségnek tartom a talajvízmozgás hatásának részletesebb figyelembevételét. A jelenlegi módszer a mért in situ termikus választ értékeli, így a talajvíz okozta advektív hőtranszport önálló hatása nem választható szét. Hidrogeológiai adatok bevonásával pontosabban értelmezhető lenne, hogy a mélységfüggő hővezetési tényezőprofilban és a visszatérő ági hőáram-eloszlásban milyen szerepet játszik a talajvízmozgás.

A jövőben célszerűnek tartom továbbá hosszú távú, szezonális monitoringadatok bevonását, valamint a módszer automatizált kiértékelő algoritmussá fejlesztését. Egy ilyen algoritmus a mért hőmérséklet- és térfogatáram-adatokból automatikusan meghatározhatná a szegmensenkénti vonalmenti hőáramot, a $\lambda(z)$, a parazita hőleadási átmeneti mélységet és a kapcsolódó energetikai mutatókat. Ez a fejlesztési irány lehetővé

tenné, hogy az eredményeim épületfelügyeleti vagy energetikai monitoringrendszerekben is közvetlenül hasznosuljanak.

Az értekezésben kidolgozott módszereket olyan kiegészítő mérnöki diagnosztikai eszközöknek tekintem, amelyek a hagyományos TRT-vizsgálatok és az üzemi monitoring közötti kapcsolatot erősítik. Alkalmazásukkal a talajszondás hőszivattyús rendszerek nemcsak teljes rendszerként, hanem mélység szerint tagolt furathőcserélőként is értékelhetők, ami hozzájárul a pontosabb tervezéshez, a célzottabb üzemeltetési beavatkozásokhoz és a hosszú távon hatékonyabb működéshez.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Lund JW, Freeston DH, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. Geothermics 2011;40:159–80. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004.

[2] Sanner B, Karytsas C, Mendrinos D, Rybach L. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics 2003;32:579–88. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00060-9.

[3] Self SJ, Reddy BV, Rosen MA. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy 2013;101:341–8. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048.

[4] Delbeke J, Vis P. Towards a Climate-Neutral Europe: Curbing the Trend. 1st ed. London: Routledge; 2019. https://doi.org/10.4324/9789276082569.

[5] Rayner T, Szulecki K, Jordan AJ, Oberthür S, editors. Handbook on European Union climate change policy and politics. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing; 2023.

[6] European Commission. Energy efficiency directive. European Commission – Energy 2023. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_hu?etrans=hu.

[7] Iglesias ER, Torres RJ. Low- to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment. Geothermics 2003;32:711–9. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.07.002.

[8] Spitler JD, Gehlin SEA. Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015;50:1125–37. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.061.

[9] Wilke S, Menberg K, Steger H, Blum P. Advanced thermal response tests: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020;119:109575. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109575.

[10] Zhang X, Han Z, Ji Q, Zhang H, Li X. Thermal response tests for the identification of soil thermal parameters: A review. Renewable Energy 2021;173:1123–35. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.028.

[11] Dalla Santa G, Galgaro A, Sassi R, Cultrera M, Scotton P, Mueller J, et al. An updated ground thermal properties database for GSHP applications. Geothermics 2020;85:101758. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758.

[12] Javed S, Spitler J. Accuracy of borehole thermal resistance calculation methods for grouted single U-tube ground heat exchangers. Applied Energy 2017;187:790–806. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.079.

[13] Beier RA, Mitchell MS, Spitler JD, Javed S. Validation of borehole heat exchanger models against multi-flow rate thermal response tests. Geothermics 2018;71:55–68. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.08.006.

[14] Vélez Márquez M, Raymond J, Blessent D, Philippe M, Simon N, Bour O, et al. Distributed Thermal Response Tests Using a Heating Cable and Fiber Optic Temperature Sensing. Energies 2018;11:3059. https://doi.org/10.3390/en11113059.

[15] Zhang B, Gu K, Shi B, Liu C, Bayer P, Wei G, et al. Actively heated fiber optics based thermal response test: A field demonstration. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020;134:110336. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110336.

[16] Violante AC, Guidi G, Proposito M, Mataloni S, Spaziani F. Use of distributed temperature sensing (DTS) coupled to ground source heat exchangers for geological thermo-stratigraphic correlation. Renewable Energy 2024;225:120242. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120242.

[17] Bertermann D, Suft O. Determination of the Temperature Development in a Borehole Heat Exchanger Field Using Distributed Temperature Sensing. Energies 2024;17:4697. https://doi.org/10.3390/en17184697.

[18] Busby J. Thermal conductivity and diffusivity estimations for shallow geothermal systems. QJEGH 2016;49:138–46. https://doi.org/10.1144/qjegh2015-079.

[19] Côté J, Konrad J-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. Can Geotech J 2005;42:443–58. https://doi.org/10.1139/t04-106.

[20] Dong Y, McCartney JS, Lu N. Critical Review of Thermal Conductivity Models for Unsaturated Soils. Geotech Geol Eng 2015;33:207–21. https://doi.org/10.1007/s10706-015-9843-2.

[21] Le AT, Wang L, Wang Y, Li D. Measurement investigation on the feasibility of shallow geothermal energy for heating and cooling applied in agricultural greenhouses of Shouguang City: Ground temperature profiles and geothermal potential. Information Processing in Agriculture 2021;8:251–69. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.06.001.

[22] Zaszewski D, Gruszczyński T. A Low-cost Automatic System for Long-term Observations of Soil Temperature. GaEE 2022;17:75–101. https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.1.75.

[23] Koritsoglou K, Christou V, Ntritsos G, Tsoumanis G, Tsipouras MG, Giannakeas N, et al. Improving the Accuracy of Low-Cost Sensor Measurements for Freezer Automation. Sensors 2020;20:6389. https://doi.org/10.3390/s20216389.

[24] Vovna O, Laktionov I, Koyfman O, Stashkevych I, Lebediev V. Study of metrological characteristics of low-cost digital temperature sensors for greenhouse conditions. Serb J Electr Eng 2020;17:1–20. https://doi.org/10.2298/SJEE2001001V.

[25] Permana AN, Wibawa IMS, Putra IK. DS18B20 sensor calibration compared with fluke hart scientific standard sensor. Ijpm 2021;4:1–7. https://doi.org/10.31295/ijpm.v4n1.1225.

[26] Aranzabal N, Martos J, Steger H, Blum P, Soret J. Temperature measurements along a vertical borehole heat exchanger: A method comparison. Renewable Energy 2019;143:1247–58. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.092.

[27] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), editor. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1st ed. Cambridge University Press; 2023. https://doi.org/10.1017/9781009157926.

[28] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1st ed. Cambridge University Press; 2023. https://doi.org/10.1017/9781009157896.

[29] Delbeke J, Vis P. Towards a Climate-Neutral Europe: Curbing the Trend. 1st ed. London: Routledge; 2019. https://doi.org/10.4324/9789276082569.

[30] European Commission. The European Green Deal. Brussels: European Commission; 2019.

[31] European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality. vol. L 243. 2021.

[32] European Parliament and Council of the European Union. Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency. vol. L 231. 2023.

[33] European Commission. In focus: Energy efficiency in buildings. European Commission – Energy 2020. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings_en (accessed June 22, 2026).

[34] European Parliament and Council of the European Union. Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast). 2024.

[35] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings 2008;40:394–8. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

[36] Eurostat. Energy consumption in households - Statistics Explained. Statistics Explained 2024. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-

explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households (accessed June 22, 2026).

[37] European Commission. Heating and cooling. Energy - European Commission 2025. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en (accessed June 22, 2026).

[38] European Commission. Heat pumps. Energy - European Commission 2025. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heat-pumps_en (accessed June 22, 2026).

[39] Ministry of Energy of Hungary, European Commission. Hungary - final updated NECP 2021-2030 (submitted 2024). Budapest / Brussels: Ministry of Energy of Hungary / European Commission; 2024.

[40] Sanner B, Karytsas C, Mendrinos D, Rybach L. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics 2003;32:579–88. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00060-9.

[41] Lund JW, Sanner B, Rybach L, Curtis R, Hellström G. Geothermal (ground-source) heat pumps: A world overview. Geothermics 2004;33:409–24.

[42] Self SJ, Reddy BV, Rosen MA. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy 2013;101:341–8. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048.

[43] Soltani M, M. Kashkooli F, Dehghani-Sanij AR, Kazemi AR, Bordbar N, Farshchi MJ, et al. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. Sustainable Cities and Society 2019;44:793–818. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.036.

[44] Christodoulides P, Christou C, Florides GA. Ground Source Heat Pumps in Buildings Revisited and Prospects. Energies 2024;17:3329. https://doi.org/10.3390/en17133329.

[45] Zhang X, Han Z, Ji Q, Zhang H, Li X. Thermal response tests for the identification of soil thermal parameters: A review. Renewable Energy 2021;173:1123–35. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.028.

[46] Romanov D, Leiss B. Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022;167:112727. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112727.

[47] Spitler JD, Gehlin SEA. Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015;50:1125–37. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.061.

[48] Wilke S, Menberg K, Steger H, Blum P. Advanced thermal response tests: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020;119:109575. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109575.

[49] Brudermueller T, Potthoff U, Fleisch E, Wortmann F, Staake T. Estimation of energy efficiency of heat pumps in residential buildings using real operation data. Nat Commun 2025;16:2834. https://doi.org/10.1038/s41467-025-58014-y.

[50] Żelazna A, Pawłowski A. Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector. Energies 2025;18:3255. https://doi.org/10.3390/en18133255.

[51] Salhein K, Salheen SA, Annekaa AM, Hawsawi M, Alhawsawi EY, Kobus CJ, et al. A Comprehensive Review of Geothermal Heat Pump Systems. Processes 2025;13:2142. https://doi.org/10.3390/pr13072142.

[52] Albers A, Steger H, Zorn R, Blum P. Evaluating an enhanced thermal response test (ETRT) with high groundwater flow. Geotherm Energy 2024;12:1. https://doi.org/10.1186/s40517-023-00278-y.

[53] Zhang X, Han Z, Li X. Accurate identification of soil thermal parameters and groundwater flow from thermal response tests. Renewable Energy 2024;236:121393. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121393.

[54] El Samad T, Żabnieńska-Góra A, Jouhara H, Sayma AI. A review of compressors for high temperature heat pumps. Thermal Science and Engineering Progress 2024;51:102603. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603.

[55] Hwang YJ, Park N. Virtual design on the heat pump refrigeration cycle: challenges and approaches. Int J Air-Cond Ref 2024;32:8. https://doi.org/10.1007/s44189-024-00052-0.

[56] Kiss B, Neij L, Jakob M. Heat Pumps: A Comparative Assessment of Innovation and Diffusion Policies in Sweden and Switzerland. In: Grubler A, Wilson C, editors. Energy Technology Innovation. 1st ed., Cambridge University Press; 2013, p. 118–32. https://doi.org/10.1017/CBO9781139150880.013.

[57] Rybach L. Geothermal Heat Pump Production Sustainability—The Basis of the Swiss GHP Success Story. Energies 2022;15:7870. https://doi.org/10.3390/en15217870.

[58] Michailidis P, Michailidis I, Minelli F, Coban HH, Kosmatopoulos E. Model Predictive Control for Smart Buildings: Applications and Innovations in Energy Management. Buildings 2025;15:3298. https://doi.org/10.3390/buildings15183298.

[59] Jouhara H, Żabnieńska-Góra A, Delpech B, Olabi V, El Samad T, Sayma A. High-temperature heat pumps: Fundamentals, modelling approaches and applications. Energy 2024;303:131882. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131882.

[60] European Committee for Standardization. EN 14511: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling n.d.

[61] Gibb D, Rosenow J, Lowes R, Hewitt NJ. Coming in from the cold: Heat pump efficiency at low temperatures. Joule 2023;7:1939–42. https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.08.005.

[62] Wu J, Yang L, Zhang C. High-temperature heat pumps: key technologies and industrial applications toward carbon–neutral process heating. Carbon Neutral Syst 2025;1:21. https://doi.org/10.1007/s44438-025-00021-z.

[63] Huang Y, Zhao Z, Sun M. Performance Degradation of Ground Source Heat Pump Systems Under Ground Temperature Disturbance: A TRNSYS-Based Simulation Study. Energies 2025;18:3909. https://doi.org/10.3390/en18153909.

[64] Wang JL, Yan T, Tang X, Pan WG. Design and operation of hybrid ground source heat pump systems: A review. Energy 2025;316:134537. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134537.

[65] Heim E, Stoffel P, Düber S, Knapp D, Kümpel A, Müller D, et al. Comparison of simulation tools for optimizing borehole heat exchanger field operation. Geotherm Energy 2024;12:24. https://doi.org/10.1186/s40517-024-00303-8.

[66] Zadeh LA, Polak E. Rendszerelmélet. Budapest: Műszaki Könyvkiadó; 1972.

[67] Shahcheraghian A, Madani H, Ilinca A. From White to Black-Box Models: A Review of Simulation Tools for Building Energy Management and Their Application in Consulting Practices. Energies 2024;17:376. https://doi.org/10.3390/en17020376.

[68] Aguilera JJ, Padullés R, Meesenburg W, Markussen WB, Zühlsdorf B, Elmegaard B. Operation optimization in large-scale heat pump systems: A scheduling framework integrating digital twin modelling, demand forecasting, and MILP. Applied Energy 2024;376:124259. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124259.

[69] Salhein K, Kobus CJ, Zohdy M, Annekaa AM, Alhawsawi EY, Salheen SA. Heat Transfer Performance Factors in a Vertical Ground Heat Exchanger for a Geothermal Heat Pump System. Energies 2024;17:5003. https://doi.org/10.3390/en17195003.

[70] Shim BO. Evaluating borehole thermal resistance for ground source heat pumps: A comparative analysis of calculation methods and grout thermal conductivity. J Mech Sci Technol 2025;39:1653–61. https://doi.org/10.1007/s12206-025-2106-0.

[71] Ingersoll L, Adler F, Plass H, Ingersoll A. Theory of earth heat exchangers for the heat pump. ASHVE Transactions 1950;56:167–88.

[72] Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of Heat in Solids. 2nd ed. Oxford, UK: Clarendon Press; 1959.

[73] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Physics, University of Lund, 1987.

[74] Lamarche L, Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. Energy and Buildings 2007;39:188–98. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.003.

[75] Remund CP. Borehole thermal resistance: Laboratory and field studies. ASHRAE Transactions 1999;105:439–45.

[76] Gu Y, O'Neal DL. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tubes used in ground-coupled heat pumps. ASHRAE Transactions 1998;104:347–55.

[77] Claesson J, Hellström G. Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. HVAC&R Research 2011;17:895–911. https://doi.org/10.1080/10789669.2011.609927.

[78] Rees SJ, He M. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow. Geothermics 2013;46:1–13. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.10.004.

[79] Lee CK, Lam HN. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. Renewable Energy 2008;33:1286–96. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.07.006.

[80] Finite Difference Methods in Heat Transfer, Second Edition. CRC Press; 2017. https://doi.org/10.1201/9781315121475.

[81] LeVeque RJ. Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations: Steady-State and Time-Dependent Problems. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2007. https://doi.org/10.1137/1.9780898717839.

[82] Al-Khoury R, Bonnier PG, Brinkgreve RBJ. Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: steady state. Numerical Meth Engineering 2005;63:988–1013. https://doi.org/10.1002/nme.1313.

[83] Al-Khoury R, Bonnier PG. Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: transient. Numerical Meth Engineering 2006;67:725–45. https://doi.org/10.1002/nme.1662.

[84] Diersch H-JG, Bauer D, Heidemann W, Rühaak W, Schätzl P. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Computers & Geosciences 2011;37:1122–35. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003.

[85] Diersch H-JG, Bauer D, Heidemann W, Rühaak W, Schätzl P. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Computers & Geosciences 2011;37:1136–47. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002.

[86] Moukalled F, Mangani L, Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab. vol. 113. Cham: Springer International Publishing; 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6.

[87] Nabi M, Al-Khoury R. An efficient finite volume model for shallow geothermal systems. Part I: Model formulation. Computers & Geosciences 2012;49:290–6. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.03.019.

[88] Nabi M, Al-Khoury R. An efficient finite volume model for shallow geothermal systems—Part II: Verification, validation and grid convergence. Computers & Geosciences 2012;49:297–307. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.03.023.

[89] He M, Rees S, Shao L. Simulation of a domestic ground source heat pump system using a three-dimensional numerical borehole heat exchanger model. Journal of Building Performance Simulation 2011;4:141–55. https://doi.org/10.1080/19401493.2010.513739.

[90] Jia GS, Ma ZD, Xia ZH, Zhang YP, Xue YZ, Chai JC, et al. A finite-volume method for full-scale simulations of coaxial borehole heat exchangers with different structural parameters, geological and operating conditions. Renewable Energy 2022;182:296–313. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.017.

[91] Serageldin AA, Radwan A, Sakata Y, Katsura T, Nagano K. The Effect of Groundwater Flow on the Thermal Performance of a Novel Borehole Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump Systems: Small Scale Experiments and Numerical Simulation. Energies 2020;13:1418. https://doi.org/10.3390/en13061418.

[92] Yavuzturk C, Spitler JD. A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers. ASHRAE Transactions 1999;105:475–85.

[93] Cimmino M, Bernier M. A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields. International Journal of Heat and Mass Transfer 2014;70:641–50. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.037.

[94] Cimmino M. Fast calculation of the g -functions of geothermal borehole fields using similarities in the evaluation of the finite line source solution. Journal of Building Performance Simulation 2018;11:655–68. https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1423390.

[95] Marcotte D, Pasquier P. Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems. Geothermics 2008;37:651–65. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.08.003.

[96] Pasquier P, Marcotte D. Joint use of quasi-3D response model and spectral method to simulate borehole heat exchanger. Geothermics 2014;51:281–99. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.02.001.

[97] Hellström G. Ground Heat Storage: thermal analyses of duct storage systems. 1: Theory. Lund: Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden; 1991.

[98] Zeng HY, Diao NR, Fang ZH. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. Heat Trans Asian Res 2002;31:558–67. https://doi.org/10.1002/htj.10057.

[99] VDI 4640 Blatt 5:2020-07 – Thermal use of the underground – Thermal Response Test (TRT) 2020.

[100] Bandos TV, Montero Á, Fernández E, Santander JLG, Isidro JM, Pérez J, et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. Geothermics 2009;38:263–70. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.01.003.

[101] Ingersoll LR, Zobel OJ, Ingersoll AC. Heat conduction with engineering, geological, and other applications. Physics Today 1955;8:17.

[102] Nyers J, Nyers A, Maria EM, Pek Z. Local Energy Optimum of Warm Water Loop in the Heat Pump Heating System. 2019 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), Gödöllő, Hungary: IEEE; 2019, p. 000171–4. https://doi.org/10.1109/INES46365.2019.9109481.

[103] Pek Z, Nyers A, Nyers J. Determination of cop maximum of cold water loop of heat pump heating system by means of numerical-graphical optimization

procedure. Therm Sci 2021;25:4257–67. https://doi.org/10.2298/TSCI200131104P.

[104] Clarivate Analytics PLC. Web of Science n.d. https://www.webofscience.com/ (accessed March 20, 2024).

[105] VOSviewer. Visualizing scientific landscapes n.d. https://www.vosviewer.com/ (accessed March 20, 2024).

[106] Van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics 2010;84:523–38. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.

[107] Esen H, Esen M, Ozsolak O. Modelling and experimental performance analysis of solar-assisted ground source heat pump system. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence 2017;29:1–17. https://doi.org/10.1080/0952813X.2015.1056242.

[108] Cai B, Liu Y, Fan Q, Zhang Y, Liu Z, Yu S, et al. Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network. Applied Energy 2014;114:1–9. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.043.

[109] Liu Z, Xu W, Zhai X, Qian C, Chen X. Feasibility and performance study of the hybrid ground-source heat pump system for one office building in Chinese heating dominated areas. Renewable Energy 2017;101:1131–40. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.006.

[110] Ren F, Wang J, Zhu S, Chen Y. Multi-objective optimization of combined cooling, heating and power system integrated with solar and geothermal energies. Energy Conversion and Management 2019;197:111866. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111866.

[111] Wang Z, Wang F, Liu J, Ma Z, Han E, Song M. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system. Energy Conversion and Management 2017;153:603–15. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.038.

[112] Holmberg H, Acuña J, Næss E, Sønju OK. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers. Renewable Energy 2016;97:65–76. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.048.

[113] Zeng H, Diao N, Fang Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer 2003;46:4467–81. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00270-9.

[114] Marcos-Robredo G, Rey-Ronco MÁ, Castro-García MP, Alonso-Sánchez T. A Device to Register Temperature in Boreholes in Northwest Spain for Geothermal Research. Sensors 2022;22:4945. https://doi.org/10.3390/s22134945.

[115] Piotrowska-Woroniak J. Assessment of Ground Regeneration around Borehole Heat Exchangers between Heating Seasons in Cold Climates: A Case Study in Bialystok (NE, Poland). Energies 2021;14:4793. https://doi.org/10.3390/en14164793.

[116] Sáez Blázquez C, Piedelobo L, Fernández-Hernández J, Nieto IM, Martín AF, Lagüela S, et al. Novel Experimental Device to Monitor the Ground Thermal Exchange in a Borehole Heat Exchanger. Energies 2020;13:1270. https://doi.org/10.3390/en13051270.

[117] Gehlin S, D. Spitler J, Berglöf K, Mazzotti Pallard W, Witte H. : IEA HPT Annex 52 - Long - term performance monitoring of GSHP systems for commercial, institutional and multi - family buildings. Heat Pump Centre; 2021. https://doi.org/10.23697/M2EM-XQ83.

[118] Javadi H, Mousavi Ajarostaghi SS, Rosen MA, Pourfallah M. Performance of ground heat exchangers: A comprehensive review of recent advances. Energy 2019;178:207–33. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.094.

[119] Li M, Lai ACK. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. Applied Energy 2015;151:178–91. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.070.

[120] Lenkey L, Mihályka J, Paróczi P. Review of geothermal conditions of Hungary. Földt Közl 2021;151:65. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.65.

[121] Almási I, Szanyi J. Hydrogeology of the Pannonian Basin. Guelph, Ontario: The Groundwater Project; 2023.

[122] Zhou K, Mao J, Li Y, Zhang H, Deng Z. Prediction and parametric analysis of 3D borehole and total internal thermal resistance of single U-tube borehole heat exchanger for ground source heat pumps. Energy and Built Environment 2023;4:179–94. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.11.001.

[123] Seib L, Krusemark M, Lehr C, Ohagen M, Pham H, Schedel M, et al. Distributed geothermal response test on a 750 m deep borehole thermal energy storage system. Applied Thermal Engineering 2025;273:126322. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126322.

[124] Mazzotti Pallard WM, Lazzarotto A, Acuña J, Palm B. Calibration and Uncertainty Quantification for Single-Ended Raman-Based Distributed Temperature Sensing: Case Study in a 800 m Deep Coaxial Borehole Heat Exchanger. Sensors 2023;23:5498. https://doi.org/10.3390/s23125498.

[125] Cao D, Shi B, Zhu H-H, Wei G, Bektursen H, Sun M. A field study on the application of distributed temperature sensing technology in thermal response tests for borehole heat exchangers. Bull Eng Geol Environ 2019;78:3901–15. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1407-2.

[126] Cimmino M. g -Functions for fields of series- and parallel-connected boreholes with variable fluid mass flow rate and reversible flow direction. Renewable Energy 2024;228:120661. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120661.

[127] Pan S, Kong Y, Chen C, Pang Z, Wang J. Optimization of the utilization of deep borehole heat exchangers. Geotherm Energy 2020;8:6. https://doi.org/10.1186/s40517-020-0161-4.

[128] Crank J, Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. Math Proc Camb Phil Soc 1947;43:50–67. https://doi.org/10.1017/S0305004100023197.

[129] Tikhonov AN. Solution of Incorrectly Formulated Problems and the Regularization Method. Soviet Math Dokl 1963;5:1035–8.

[130] Hansen PC. Discrete Inverse Problems: Insight and Algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2010. https://doi.org/10.1137/1.9780898718836.

[131] Zeng HY, Diao NR, Fang ZH. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. Heat Trans Asian Res 2002;31:558–67. https://doi.org/10.1002/htj.10057.

[132] Bandos TV, Montero Á, Fernández E, Santander JLG, Isidro JM, Pérez J, et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. Geothermics 2009;38:263–70. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.01.003.

[133] Lamarche L, Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. Energy and Buildings 2007;39:188–98. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.003.

[134] Bujok P, Grycz D, Klempa M, Kunz A, Porzer M, Pytlik A, et al. Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values. Energy 2014;64:120–9. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.079.

[135] Jones GL. Geotrainet training manual for designers of shallow geothermal systems. Brussels: Geotrainet, EFG; 2011.

[136] Franco A, Conti P. Clearing a Path for Ground Heat Exchange Systems: A Review on Thermal Response Test (TRT) Methods and a Geotechnical Routine Test for Estimating Soil Thermal Properties. Energies 2020;13:2965. https://doi.org/10.3390/en13112965.

[137] Bahr MT, Kumawat PK, Billings BW, Panja P, Powell KM. A Dynamic 2d Borehole Thermal Energy Storage (Btes) Model for Enhanced Computational Efficiency 2025. https://doi.org/10.2139/ssrn.5104196.

A jelölt értekezéssel kapcsolatos publikációi:

[ZV1] Zonai V, Santa R. In-situ identification of axial borehole thermal conductivity from measured transient heat extraction. Energy and Buildings 2026;363:117613. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117613.

[ZV2] Zonai V, Garbai L, Santa R. Multipoint Temperature-Based Depth Analysis of a U-Tube Borehole Heat Exchanger. Technologies 2026;14:187. https://doi.org/10.3390/technologies14030187.

[ZV3] Zónai V, Kollár C, Sánta R. Talajszondás hőszivattyús rendszerek fehérdoboz modellezése és mesterséges intelligencia alapú optimalizálása. Safety and Security Sciences Review 2025;7.:117. https://doi.org/10.12700/btsz.2025.7.2.117.

[ZV4] Zonai V, Santa R. Bibliographic analysis and decision factors in the optimization and mathematical models of ground source heat pump systems. J Appl Eng Science 2025;23:607–20. https://doi.org/10.5937/jaes0-53479.

[ZV5] Sánta R, Zónai V. Numerical comparison of heat pump using scroll and reciprocating compressor, Subotica: 2023, p. 44–50.

[ZV6] Sánta R, Zónai V. Kétfokozatú kompressziós hőszivattyú. In: Kővári A, editor., Dunaújváros: Dunaújvárosi Egyetem; 2023, p. 45–9.

[ZV7] Sánta R, Zónai V. A hőszivattyús rendszerek rendszerelméleti modellezése. Dunakavics 2023;11:63–70.

[ZV8] Zónai V., Sánta R. Parazita hőleadási zóna diagnosztikai értékelése talajszondás hőszivattyús rendszerekben. Safety and Security Sciences; 2026, p. 125-143.

A jelölt értekezéssel nem kapcsolatos publikációi:

[ZV9] Garbai L, Sánta R, Zónai V. Assessment of Simultaneous Heating Demands for Consumer Groups. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 2024;68:211–5. https://doi.org/10.3311/PPme.36546.

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Indexek és koordináták

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{t}$	időváltozó (s)
$\boldsymbol{t_n}$	az n-edik diszkrét időszint (-)
$\boldsymbol{i}$	a furat menti mélységi szegmens indexe (-)
$\boldsymbol{i^*}$	az első stabil exoterm-endoterm előjelváltást adó szegmens indexe (-)
$\boldsymbol{j}$	radiális rácspont indexe (-)
$\boldsymbol{n}$	időlépés-index (-)
$\boldsymbol{z}$	mélységi koordináta a furat mentén (m)
$\boldsymbol{z_i}$, $\boldsymbol{z_{i+1}}$	az i-edik szegmens felső és alsó mélységi határa (m)
$\boldsymbol{r}$	radiális koordináta a talajtartományban (m)
$\boldsymbol{r_b}$	furatsugár / belső radiális perem (m)
$\boldsymbol{r_1}$	első radiális rácspont, a furatfalnál elhelyezve (m)
$\boldsymbol{r_j}$	a j-edik radiális rácspont (m)
$\boldsymbol{r_{max}}$	a számítási tartomány külső radiális pereme (m)
$\boldsymbol{r_{j-\frac{1}{2}}}, \boldsymbol{r_{j+\frac{1}{2}}}$	szomszédos radiális rácspontok közötti középsugarak (m)
$\boldsymbol{H}$	a TRT-kiértékelésben alkalmazott furathossz (m)
$\boldsymbol{L_i}$	az i-edik mélységi szegmens hossza; a jelen alkalmazásban 10 m

TRT és globális termikus paraméterek

Jel	Jelentés
$\Delta\boldsymbol{T_{(r,t)}}$	talajhőmérséklet-emelkedés az r radiális helyen és t időpontban a Kelvin-féle vonalforrás-megoldásban (°C)
$\boldsymbol{q}$	a Thermal Response Test (TRT) során alkalmazott hőbetáplálási teljesítmény (W)
$\boldsymbol{p}$	dimenzió nélküli időváltozó a Kelvin-féle vonalforrás-megoldásban (-)
$\boldsymbol{\beta}$	integrációs változó a Kelvin-féle vonalforrás-integrálban

$\boldsymbol{\lambda_{eff}}$	TRT-ből vagy energia-súlyozott aggregálásból származó effektív talaj-hővezetési tényező $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\boldsymbol{R_b}$	furat-termikus ellenállás $\left(\frac{mK}{W}\right)$
$\boldsymbol{T_0}$	a TRT-kiértékelésből származó kezdeti, zavartalan talajhőmérséklet (°C)

Mérési bizonytalanság és üzemállapot-elemzés

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{U}$	a mérési lánc kombinált kiterjesztett bizonytalansága (°C)
$\boldsymbol{k}$	kiterjesztési tényező a kiterjesztett bizonytalanság meghatározásában (k = 2) (-)
$\boldsymbol{\Delta T}$	tengelyirányú / mért folyadék-hőmérséklet-különbség (°C)
σΔT	a hőmérséklet-különbség ingadozásainak szórása (°C)
SNR	jel-zaj viszony (-)

Mért folyadékhőmérsékletek és szegmensenergia-mérleg

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{T_{\downarrow}(z_i, t), T_{\downarrow}(z_{i+1}, t)}$	folyadékhőmérsékletek a lefelé áramló, belépő ágban az i-edik szegmens felső és alsó csomópontjánál (°C)
$\boldsymbol{T_{\uparrow}(z_i, t), T_{\uparrow}(z_{i+1}, t)}$	folyadékhőmérsékletek a felfelé áramló, kilépő ágban az i-edik szegmens felső és alsó csomópontjánál (°C)
$\boldsymbol{\dot{m}}$	a keringtetett folyadék tömegárama $\left(\frac{kg}{s}\right)$
$\boldsymbol{c_{pf}}$	a keringtetett folyadék fajhője $\left(\frac{J}{kgK}\right)$
$\boldsymbol{Q_i(t)}$	az i-edik szegmensben átadott hőteljesítmény (W)
$\boldsymbol{q_i'(t)}$	szegmensenkénti vonalmenti hőáram / vonalforrás-hőáram az i-edik szegmensben $\left(\frac{W}{m}\right)$
$\boldsymbol{q'(t)}$	általános vonalmenti hőáram / lineáris hőteljesítmény $\left(\frac{W}{m}\right)$
$\boldsymbol{T_{f,i}(t)}$	szegmensátlagolt folyadékhőmérséklet (°C)

$\boldsymbol{T_{w,i}^{\text{meas}}(t)}$	az i-edik szegmensre rekonstruált pszeudo furatfal-hőmérséklet, a mért folyadékhőmérsékletekből származtatva (°C)
$\boldsymbol{T_{w}^{\text{meas}}(t)}$	általános mért / rekonstruált furatfal-hőmérséklet (°C)
$\boldsymbol{T_w}$	általános furatfal-hőmérséklet (°C)

Talaj hővezetési modellje

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{T(r,t)}$	talajhőmérséklet-mező (°C)
$\boldsymbol{T(r_{max},t)}$	talajhőmérséklet a külső radiális peremen (°C)
$\boldsymbol{T(r,0)}$	kezdeti talajhőmérséklet-eloszlás (°C)
$\boldsymbol{\alpha}$	a talaj hődiffuzivitása $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
$\boldsymbol{\lambda}$	a radiális modellben alkalmazott talaj-hővezetési tényező $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\boldsymbol{\rho_s c_s}$	a talaj térfogati hőkapacitása $\left(\frac{J}{m^3 K}\right)$
$\boldsymbol{q''(t)}$	előírt furatfali felületi hőáram $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$\boldsymbol{q_i''(t)}$	szegmensspecifikus furatfali felületi hőáram $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$\boldsymbol{T_{\infty,i}}$	az i-edik szegmenshez tartozó zavartalan egyensúlyi talajhőmérséklet (°C)
$\boldsymbol{T_{\infty}}$	általános zavartalan egyensúlyi talajhőmérséklet (°C)
$\boldsymbol{\theta(r,t)}$	perturbációs hőmérséklet az egyensúlyi talajhőmérséklethez viszonyítva (°C)
$\boldsymbol{\theta(r_{max},t)}$	perturbációs hőmérséklet a külső radiális peremen (°C)
$\boldsymbol{\theta(r,0)}$	kezdeti perturbációs hőmérséklet-mező (°C)
$\boldsymbol{N_r}$	radiális rácspontok száma (-)
$\boldsymbol{\theta_j^n}$	diszkrét perturbációs hőmérséklet a j-edik radiális rácspontban és az n-edik időszinten (°C)
$\boldsymbol{\theta_1^n, \theta_2^n}$	perturbációs hőmérsékletek az első és második radiális rácspontban (°C)
$\boldsymbol{\Delta r_{j-1}, \Delta r_j}$	helyi radiális rácstávolságok (m)
$\boldsymbol{\Delta t_n}$	időlépés mérete között t_n és t_{n+1} között (s)

$\boldsymbol{A}$	diszkrét radiális hővezetési operátor mátrixa (-)
$\boldsymbol{B}$	a hőáram-peremfeltételhez kapcsolódó forrástag-operátor (-)
I	egységmátrix a diszkrét lineáris rendszerekben és a regularizációs egyenletben (-)

Inverz feladat és regularizáció

Jel	Jelentés
$T_w^{\mathrm{mod}}(t_n;\boldsymbol{\lambda})$	a modell által előrejelzett furatfal-hőmérséklet (°C)
$T_{w,i}^{\mathrm{mod}}(t_n;\boldsymbol{\lambda})$	szegmensenkénti, modell által előrejelzett furatfal-hőmérséklet (°C)
$J_i(\lambda_i)$	célfüggvény / illesztési hiba az i-edik szegmensre (°C)
N_t	az illesztési hiba kiértékelésében használt időlépések száma (-)
λ_i	az i-edik szegmens inverz módon meghatározott hővezetési tényezője $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\lambda_{min}, \lambda_{max}$	a skaláris hővezetési tényező optimalizálásában alkalmazott alsó és felső korlát $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\boldsymbol{L}$	a mélység szerinti simításhoz használt diszkrét Laplace-operátor (-)
$\boldsymbol{\beta}$	a regularizáció erősségét szabályozó pozitív simítási paraméter (-)
$\boldsymbol{\lambda}$	az egyenként invertált szegmensenkénti hővezetési tényezők vektora a simítás előtt $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{smooth}}$	regularizáció után kapott simított hővezetési tényezőprofil $\left(\frac{W}{mK}\right)$
$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{smooth},i}$	az i-edik szegmenshez rendelt simított hővezetési tényező $\left(\frac{W}{mK}\right)$

Aggregált és elemzési mennyiségek

Jel	Jelentés
E_i	t időintegrált abszolút vonalmenti hőáram, amely szegmensenkénti energia-súlyként kerül felhasználásra $\left(\frac{J}{m}\right)$
w_i	az i-edik szegmens normalizált energia-súlya (-)
$\lambda(z)$	mélységfüggő hővezetési tényezőprofil $\left(\frac{W}{mK}\right)$

Mérési, hidraulikai és hőmérsékleti mennyiségek

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{T_{\uparrow}(Z_k, t_n)}$	A visszatérő, felfelé áramló ágban mért hőmérséklet a Z_k mélységben és t_n időpillanatban (°C)
$\boldsymbol{T_{\uparrow}(Z_i, t)}$; $\boldsymbol{T_{\uparrow}(Z_{i+1}, t)}$	Az i-edik szegmens felső és alsó mérési pontján mért visszatérő ági hőmérsékletek (°C)
$\boldsymbol{T_{out}}$	Forrásoldali kilépő hőmérséklet, illetve annak referenciaértelmezése a hőszivattyú forrásoldalán (°C)
$\boldsymbol{\Delta T}$	Mért hőmérséklet-különbség két pont között (°C)
$\boldsymbol{\sigma_T}$	A hőmérsékletmérés standard bizonytalansága (°C)
$\boldsymbol{\sigma_{\Delta T}}$	Két független hőmérsékletmérés különbségének standard bizonytalansága (°C)
$\boldsymbol{U}$	A mérőlánc kombinált kiterjesztett hőmérsékleti bizonytalansága (°C)
$\boldsymbol{\dot{m}}$	A keringtetett hőhordozó közeg tömegárama $\left(\frac{kg}{s}\right)$
$\boldsymbol{\dot{V}}$	Térfogatáram $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
$\boldsymbol{\rho_f}$	A hőhordozó közeg sűrűsége $\left(\frac{kg}{s}\right)$
$\boldsymbol{c_f}$	A hőhordozó közeg fajhője $\left(\frac{J}{kgK}\right)$
$\boldsymbol{H}$	A furat teljes mélysége (m)
$\boldsymbol{L}$	A műszerezett szakasz hossza (m)

Visszatérő ági szegmensenergia-mérleg és osztályozás

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{q_{\uparrow,i}(t)}$	Az i-edik visszatérő ági szegmens vonalmenti hőárama $\left(\frac{W}{m}\right)$
$\boldsymbol{q_{glob,\uparrow}(t)}$	A teljes műszerezett visszatérő ági szakaszra vonatkozó, hosszirányban átlagolt vonalmenti hőáram $\left(\frac{W}{m}\right)$
$\boldsymbol{Q_{\uparrow,i}}$	Az i-edik szegmens időintegrált vonalmenti nettó hőmennyisége a kiértékelési időablakban $\left(\frac{J}{m}\right)$
$\boldsymbol{\sigma_{q,i}}$	Az i-edik szegmens vonalmenti hőáramának standard bizonytalansága $\left(\frac{J}{m}\right)$

$\boldsymbol{\sigma_{Q,i}}$	Az i-edik szegmens időintegrált vonalmenti hőmennyiségének standard bizonytalansága $\left(\frac{J}{m}\right)$
$\boldsymbol{\varepsilon_{Q,i}}$	Az i-edik szegmens osztályozási küszöbe $\left(\frac{J}{m}\right)$
$\boldsymbol{z_{\uparrow}^{*}}$	Exoterm-endoterm átmeneti mélység a visszatérő ág mentén (m)
$\boldsymbol{C_{\uparrow}}$	A $z_{\uparrow}^{*}$ felett elhelyezkedő, szignifikánsan exoterm szegmensek indexhalmaza (-)
$\boldsymbol{N_{exo}}$	Exoterm kategóriába sorolt szegmensek száma (-)
$\boldsymbol{N_{semleges}}$	Semleges kategóriába sorolt szegmensek száma (-)
$\boldsymbol{N_{end}}$	Endoterm kategóriába sorolt szegmensek száma (-)

Parazita hőleadási és energetikai mutatók

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{E_{exo}}$	A parazita exoterm zónához tartozó összesített hőleadási energia (J)
$\boldsymbol{P_{exo}}$	Az elemzési időablakra számított átlagos exoterm veszteségteljesítmény (W)
$\boldsymbol{P_{exo,avg}}$	Átlagos parazita exoterm hőleadási veszteségteljesítmény (W)
$\boldsymbol{\Delta T_{out}}$	A parazita exoterm hőleadás forrásoldali kilépő hőmérsékletre vetített hőmérséklet-egyenértéke (K)
$\boldsymbol{Q_{\uparrow}(z)}$	A mélység függvényében értelmezett időintegrált vonalmenti hőmennyiség közelítő függvénye $\left(\frac{J}{m}\right)$

COP-becslés és Carnot-skálázott helyettesítő modell

Jel	Jelentés
$\boldsymbol{COP}$	A hőszivattyú teljesítménytényezője (-)
$\boldsymbol{COP_C(T_{src})}$	Ideális, Carnot-alapú fűtési COP a forrásoldali hőmérséklet függvényében (-)
$\boldsymbol{COP_{ref}}$	Referencia üzemi ponthoz tartozó teljesítménytényező (-)
$\boldsymbol{\Delta COP}$	A COP abszolút vagy relatív változása az alkalmazott értelmezéstől függően (-)
$\boldsymbol{\Delta COP_{\%}}$	A COP relatív százalékos változása (%)

T_{cond}	Referencia kondenzációs hőmérséklet a Carnot-skálázott helyettesítő modellben (K)
T_{src}	Forrásoldali hőmérséklet a COP-becslésben (K)
$T_{src,ref}$	Referencia forrásoldali hőmérséklet (K)
$T_{src,new}$	A ΔT_{out} figyelembevételével módosított forrásoldali hőmérséklet (K)
η	A valós hőszivattyús viselkedést közelítő, Carnot-COP-ra alkalmazott skálázási hatásfok (-)

Érzékenységi és robusztussági vizsgálatok jelölései

Jel	Jelentés
f	Mintavételi ritkítási tényező (-)
gap	Szintetikusan beillesztett hiányzó adatszakasz hossza a hiányadat-érzékenységi vizsgálatban (min)
$centre$	A hiányzó adatszakasz relatív pozíciója a kiértékelési időablakon belül (-)
$full$	A teljes elérhető idősor alkalmazása a kiértékelésben (-)
Δ%	A referenciaablakhoz vagy referenciaesethez viszonyított relatív eltérés (%)

Alsó- és felső indexek, operátorok

Jel	Jelentés
↑	Visszatérő / felfelé áramló ág
↓	Előremenő / lefelé áramló ág
exo	Exoterm, hőleadó vagy parazita hőleadási komponens
end	Endoterm, hőfelvevő komponens
avg	Átlagos érték
$glob$	Globális, a teljes műszerezett hosszra átlagolt mennyiség
ref	Referencia üzemi pont vagy referenciaérték
new	Módosított / javított állapothoz tartozó érték
$cond$	Kondenzátorhoz, illetve kondenzációs hőmérséklethez kapcsolódó jelölés

$\boldsymbol{src}$	Forrásoldali mennyiség
$\boldsymbol{out}$	Kilépő oldali mennyiség
$\boldsymbol{f}$	Folyadék / hőhordozó közeg
$\boldsymbol{i}$	Szegmensindex
$\boldsymbol{k}$	Mélységi mérési pont indexe
$\boldsymbol{n}$	Időlépés-index

Rövidítések

Jel	**Jelentés**
TRT	Thermal Response Test, azaz termikus választeszt
GSHP	Ground Source Heat Pump, talajhő-hasznosító / talajszondás hőszivattyús rendszer
BHE	Borehole Heat Exchanger, fúrólyuk-hőcserélő / talajszonda
LSM	Line-Source Model, vonalforrás-modell
HDPE	High-Density Polyethylene, nagy sűrűségű polietilén
COP	Coefficient of Performance, teljesítménytényező
ETRT	Enhanced Thermal Response Test, továbbfejlesztett termikus választeszt
DTS	Distributed Temperature Sensing, elosztott hőmérsékletmérés

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. TÁBLÁZAT: A TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS RENDSZEREK MODELLEZÉSI MEGKÖZELÍTÉSEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA 27

2. TÁBLÁZAT: A VIZSGÁLT FÚRÓLYUK FŐ GEOMETRIAI ÉS SZERKEZETI ADATAI 37

3. TÁBLÁZAT: A MÉLYSÉGFELBONTÁSÚ HŐMÉRSÉKLETMÉRÉSI KAMPÁNY MÉRÉSI FÁZISAI, ÜZEMI FELTÉTELEI ÉS MINTASZÁMAI 40

4. TÁBLÁZAT: A KÉT TÉRFOGATÁRAM MELLETT KAPOTT SIMÍTOTT SZAKASZONKÉNTI HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK $\lambda smooth$ ÖSSZEHASONLÍTÁSA A SZAKIRODALMI TARTOMÁNYOKKAL ÉS A FURAT MENTI GEOLÓGIAI ÉRTELMEZÉSSEL. 57

5. TÁBLÁZAT: A TRT-BŐL SZÁRMAZTATOTT TERMIKUS PARAMÉTEREK ÖSSZEFOGLALÁSA. 61

6. TÁBLÁZAT: A TRT-BŐL ÉS A SZEGMENSENKÉNTI INVERZIÓBÓL SZÁRMAZTATOTT EFFEKTÍV HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA. 63
7. TÁBLÁZAT: AZ Rb MÓDOSÍTÁSÁNAK HATÁSA A REKONSTRUÁLT EFFEKTÍV HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐRE. 64
8. TÁBLÁZAT: A SZEGMENSENKÉNTI $\lambda(z)$ REKONSTRUKCIÓ MEGBÍZHATÓ ALKALMAZÁSÁNAK FELTÉTELEI 70
9. TÁBLÁZAT: A Λ(Z) REKONSTRUKCIÓ KIÉRTÉKELÉSI ÉRVÉNYESSÉGI SZINTJEI 71
10. TÁBLÁZAT: A PARAZITA EXOTERM ZÓNA FŐ INDIKÁTORAI A KÉT VIZSGÁLT ÜZEMI ÁLLAPOTBAN. 79
11. TÁBLÁZAT: IDŐABLAK-ÉRZÉKENYSÉG ALACSONY TÉRFOGATÁRAMNÁL. A ZÁRÓJELEK A REFERENCIAABLAKTÓL VETT RELATÍV ELTÉRÉST JELZIK: $ta = 0\,min, \tau f = 120\,min.$ 84
12. TÁBLÁZAT: IDŐABLAK-ÉRZÉKENYSÉG MAGAS TÉRFOGATÁRAMNÁL. A ZÁRÓJELEK A REFERENCIAABLAKTÓL VETT RELATÍV ELTÉRÉST JELZIK: $ta = 0\,min, \tau f = 120\,min.$ 84
13. TÁBLÁZAT: A PARAZITA HŐLEADÁSI ÁTMENETI MÉLYSÉGMUTATÓ MEGBÍZHATÓ ALKALMAZÁSÁNAK FELTÉTELEI 94
14. TÁBLÁZAT: A $z\uparrow*$ INDIKÁTOR ÉS A KAPCSOLÓDÓ TELJESÍTMÉNYJELLEGŰ MUTATÓK KIÉRTÉKELÉSI ÉRVÉNYESSÉGI SZINTJEI. 95

ÁBRAJEGYZÉK

1. ÁBRA: TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS RENDSZER FŐ ALRENDSZEREI, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV3] 16
2. ÁBRA: ÜZEMBEN LÉVŐ TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS RENDSZER INPUT–OUTPUT SZEMLÉLETŰ FEHÉRDOBOZ-MODELLJE, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV3] 21
3. ÁBRA: A TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS RENDSZEREK MATEMATIKAI MODELLEZÉSÉVEL FOGLALKOZÓ PUBLIKÁCIÓK HÁLÓZATA AZ ELMÚLT 10 ÉVBEN, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV4] 32
4. ÁBRA: A FEJLESZTETT MÉRŐEGYSÉG KAPCSOLÁSI RAJZA, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1, ZV2] 35
5. ÁBRA: A FÚRÓLYUKFEJNÉL TELEPÍTETT HŐMÉRSÉKLET-ÉRZÉKELŐK TEREPI ELRENDEZÉSE, SZORÍTÓ TÖMSZELENCÉS, VÍZZÁRÓ RÖGZÍTÉSSEL. [ZV1] 39

6. ÁBRA: A DIGITÁLIS ADATGYŰJTŐ RENDSZER TEREPI MÉRŐEGYSÉGE: MIKROKONTROLLER, KIJELZŐ, SD-KÁRTYÁS ADATNAPLÓZÓ ÉS AZ ÉRZÉKELŐHÁLÓZAT CSATLAKOZÁSA. [ZV1] 39
7. ÁBRA: A VIZSGÁLT TALAJSZONDA-KÖR ÜZEMI PARAMÉTEREINEK BEÁLLÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ 20 ÁGÚ OSZTÓ-GYŰJTŐ EGYSÉG. [ZV1] 40
8. ÁBRA: IDŐBEN ÁTLAGOLT ELŐREMENŐ ÉS VISSZATÉRŐ FOLYADÉKHŐMÉRSÉKLETEK A MÉLYSÉG FÜGGVÉNYÉBEN, 0,585 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 43
9. ÁBRA: IDŐBEN ÁTLAGOLT ELŐREMENŐ ÉS VISSZATÉRŐ FOLYADÉKHŐMÉRSÉKLETEK A MÉLYSÉG FÜGGVÉNYÉBEN, 0,815 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 43
10. ÁBRA: MÉLYSÉGFÜGGŐ ZAVARTALAN TALAJHŐMÉRSÉKLET ZÉRUS TÉRFOGATÁRAMÚ, EGYENSÚLYI ÁLLAPOTBAN, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 44
11. ÁBRA: A TALAJSZONDA SZEGMENSENKÉNTI ENERGIAMÉRLEGÉNEK SEMATIKUS ÁBRÁZOLÁSA, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 46
12. ÁBRA: A MÉRT ÉS MODELLEZETT FÚRÓLYUKFAL-HŐMÉRSÉKLETEK, TwMEAS ÉS TwMOD ÖSSZEHASONLÍTÁSA 0,585 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 53
13. ÁBRA: A MÉRT ÉS MODELLEZETT FÚRÓLYUKFAL-HŐMÉRSÉKLETEK, TwMEAS ÉS TwMOD ÖSSZEHASONLÍTÁSA 0,815 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 54
14. ÁBRA: AZ INVERZIÓS ELJÁRÁSSAL KAPOTT SIMÍTOTT HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ PROFIL, λSMOOTH, 0,585 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 55
15. ÁBRA: AZ INVERZIÓS ELJÁRÁSSAL KAPOTT SIMÍTOTT HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ PROFIL, λSMOOTH, 0,815 M³/H TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 55
16. ÁBRA: A SZEGMENSENKÉNT SZÁMÍTOTT VONALMENTI HŐÁRAM HŐTÉRKÉPE 0,585 $m3/h$ TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 57
17. ÁBRA: A SZEGMENSENKÉNT SZÁMÍTOTT VONALMENTI HŐÁRAM HŐTÉRKÉPE 0,815 $m3/h$ TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 57
18. ÁBRA: A GERT-CAL SZOFTVERREL GENERÁLT PARAMÉTERILLESZTÉSI TÉRKÉP, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 61
19. ÁBRA: $\lambda(z)$ PROFIL ZAJ OKOZTA BIZONYTALANSÁGGAL, ALACSONY TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 67

20. ÁBRA: VONALMENTI HŐÁRAM $qi'(t)$ ZAJJAL, ALACSONY TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 67
21. ÁBRA: $\lambda(z)$ PROFIL ZAJ OKOZTA BIZONYTALANSÁGGAL, NAGY TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 68
22. ÁBRA: VONALMENTI HŐÁRAM $qi'(t)$ ZAJJAL, NAGY TÉRFOGATÁRAM MELLETT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV1] 68
23. ÁBRA: MÉLYSÉG SZERINTI $Q\uparrow, i$ PROFILOK ÉS AZ AZONOSÍTOTT $z\uparrow*$: (A) KIS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) NAGY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 80
24. ÁBRA: CARNOT-SKÁLÁZOTT COP-HELYETTESÍTŐ MODELL ÉS REFERENCIA/MÓDOSÍTOTT PONTOK: (A) KIS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) NAGY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 81
25. ÁBRA: A VISSZATÉRŐ ÁG GLOBÁLIS JELE $qglob,\uparrow t$: (A) KIS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) NAGY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 83
26. ÁBRA: A BECSÜLT ÁTMENETI MÉLYSÉG ÉRZÉKENYSÉGE AZ ÉRTÉKELÉSI IDŐABLAK [ta, tb] KIVÁLASZTÁSÁRA A VISSZATÉRŐ ÁG ESETÉN: (A) ALACSONY TÉRFOGATÁRAMÚ ÉS (B) MAGAS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 86
27. ÁBRA: IDŐABLAK-ÉRZÉKENYSÉG: $\Delta Tout$ ÉS ΔCOP: (A) ALACSONY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) MAGAS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2]..... 87
28. ÁBRA: K-ÉRZÉKENYSÉG: $z\uparrow*$ ALAKULÁSA k FÜGGVÉNYÉBEN: (A) ALACSONY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) MAGAS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 88
29. ÁBRA: k-ÉRZÉKENYSÉG: $Pexo, avg$ ÉS $\Delta Tout$: (A) ALACSONY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) MAGAS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2]..... 89
30. ÁBRA: BESOROLÁSI ÉRZÉKENYSÉG: AZ EXOTERM/SEMLEGES/ENDOTERM SZEGMENSEK SZÁMA k FÜGGVÉNYÉBEN: (A) ALACSONY TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT; (B) MAGAS TÉRFOGATÁRAMÚ ÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 90
31. ÁBRA: A MINTAVÉTELI RITKÍTÁS HATÁSA A SZÁRMAZTATOTT MUTATÓKRA (A) $Pexo, avg$ ÉS A $\Delta Tout$ ALACSONY TÉRFOGATÁRAM ESETÉN; (B) $Pexo, avg$ ÉS A $\Delta Tout$ MAGAS TÉRFOGATÁRAM ESETÉN; (C) $z\uparrow*$ ALACSONY TÉRFOGATÁRAM ESTÉN; (D) $z\uparrow*$MAGAS TÉRFOGATÁRAM ESTÉN, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 92
32. ÁBRA: A HIÁNYZÓ ADATSZAKASZOK IDŐTARTAMÁNAK ÉS RELATÍV HELYZETÉNEK HATÁSA A SZÁRMAZTATOTT MUTATÓKRA LINEÁRIS INTERPOLÁCIÓ ALKALMAZÁSA

MELLETT, (A–B) $\Delta Tout$; (C–D) $Pexo, avg$; (E–F) $z \uparrow *$; BAL OLDALI RÉSZÁBRÁK: KIS TÉRFOGATÁRAMÚ ÜZEMÁLLAPOT; JOBB OLDALI RÉSZÁBRÁK: NAGY TÉRFOGATÁRAMÚ ÜZEMÁLLAPOT, SAJÁT SZERKESZTÉS [ZV2] 93

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik doktori tanulmányaim és kutatómunkám során szakmai, emberi és erkölcsi támogatásukkal hozzájárultak értekezésem elkészítéséhez.

Elsősorban köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. habil. Sánta Róbertnek, aki szakmai iránymutatásával, hasznos tanácsaival és folyamatos támogatásával jelentősen hozzájárult kutatásom előrehaladásához. Köszönöm, hogy munkám során mindvégig segítette a tudományos gondolkodásom fejlődését, és értékes észrevételeivel támogatta a disszertáció elkészítését.

Köszönetemet fejezem ki a Biztonságtudományi Doktori Iskola oktatóinak és munkatársainak, akik doktori tanulmányaim során szakmai tudásukkal és támogatásukkal hozzájárultak kutatói fejlődésemhez.

Külön köszönettel tartozom az Ópusztaszeri Nemzeti Történelmi Emlékpark munkatársainak, akik a mérési infrastruktúra kialakításában, a terepi adatgyűjtésben, valamint a vizsgálatok gyakorlati megvalósításában segítséget nyújtottak. Támogatásuk nélkül a talajszondás hőszivattyús rendszer részletes mérésalapú vizsgálata nem valósulhatott volna meg ilyen formában.

Végül, de nem utolsósorban, nagyon hálás vagyok a családomnak, a barátaimnak és munkatársaimnak a türelmükért, bátorításukért és megértésükért, különösen feleségemnek Dr. Almási Szintiának, aki bátorított, minden nap mellettem állt és biztos hátteret nyújtott a kihívásokkal teli úton.