

**DIAGNOSTIC EVALUATION
OF A PARASITIC HEAT RELEASE
ZONE IN GROUND SOURCE HEAT
PUMP SYSTEMS****PARAZITA HŐLEADÁSI ZÓNA
DIAGNOSZTIKAI ÉRTÉKELÉSE
TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS
RENDSZEREKBE**ZÓNAI Viktor¹ – SÁNTA Róbert²**Abstract**

The operational reliability of ground source heat pump systems is strongly influenced by the actual thermal behaviour of the borehole heat exchanger. In heating mode, a parasitic heat release zone may develop along the return leg, especially in shallow sections, which can reduce the useful source-side temperature level and affect system performance. This study evaluates the robustness of the exothermic–endothermic transition depth derived from multi-depth temperature measurements. The analysis focuses on the effects of time-window selection, exclusion of initial transients, uncertainty-based thresholding, sampling reduction and missing-data handling. The results indicate that the transition depth can serve as a robust spatial diagnostic indicator under appropriate operating and data-quality conditions. Performance-related indicators, such as average parasitic heat loss and source-side temperature equivalent, are more sensitive to data-processing choices.

Keywords

ground source heat pump, borehole heat exchanger, parasitic heat release, transition depth, diagnostic reliability

Absztrakt

A talajszondás hőszivattyús rendszerek üzembiztonságát jelentős mértékben befolyásolja a talajszonda valós hőtechnikai viselkedése. Fűtési üzemben a visszatérő ág sekélyebb szakaszain parazita hőleadási zóna alakulhat ki, amely csökkenti a hasznos forrásoldali hőmérséklet szintet és kedvezőtlenül befolyásolja a rendszer működési feltételeit. A tanulmány a többmélységű hőmérsékletmérésekből meghatározott exoterm–endoterm átmeneti mélység robusztusságát értékeli. A vizsgálat az időablak-választás, a kezdeti tranziens szakasz kizárása, a bizonytalanságalapú küszöbölés, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatására fókuszál. Az eredmények alapján az átmeneti mélység megfelelő üzemi és adatminőségi feltételek mellett robusztus térbeli diagnosztikai indikátorként alkalmazható. A teljesítményjellegű mutatók, például az átlagos parazita veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték, érzékenyebben reagálnak az adatfeldolgozási beállításokra.

Kulcsszavak

talajszondás hőszivattyú, furathőcserélő, parazita hőleadás, átmeneti mélység, diagnosztikai megbízhatóság

¹ zonai.viktor@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0008-5415-8096 | PhD candidate, Doctoral School on Safety and Security Sciences, Óbuda University | PhD hallgató, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Óbudai Egyetem

² santar@uniduna.hu | ORCID: 0000-0001-7559-2758 | full professor, Department of Mechanical Engineering and Material Sciences, Institute of Engineering Sciences, University of Dunaújváros | egyetemi tanár, Műszaki Intézet, Dunaújvárosi Egyetem

BEVEZETÉS

A talajszondás hőszivattyús rendszerek energiahatékony és alacsony környezeti terhelésű hőellátási megoldások, amelyek teljesítményét nemcsak a hőszivattyú berendezés névleges paraméterei, hanem a primer oldali hőcserélő, vagyis a talajszonda valós üzemi viselkedése is meghatározza [1], [2], [3], [4], [5]. A mérnöki gyakorlatban a talajszondákat gyakran teljes furathosszra vonatkozó, átlagolt jellemzőkkel írják le, ezek azonban csak korlátozottan mutatják meg, hogy a hőáram hogyan oszlik meg mélység szerint [1], [2], [6], [7], [8], [9], [10]. Emiatt egyre nagyobb szerepe van azoknak a monitoring- és kiértékelési módszereknek, amelyek a lokális hőátadási viszonyokat is értelmezhetővé teszik [7], [8], [10], [11].

Fűtési üzemben a visszatérő ágban áramló hőhordozó közegnek ideális esetben hőt kellene felvennie a környező talajból [1], [2]. Valós üzemi körülmények között azonban előfordulhat, hogy a sekélyebb szakaszokon a folyadék nem hőt vesz fel, hanem hőt ad le a környezetének [11], [12], [13]. Ez a folyamat parazita, veszteségjellegű hőleadásként értelmezhető, mivel kedvezőtlenül befolyásolja a primer körben rendelkezésre álló hőmérsékletszintet és ezen keresztül a hőszivattyú működési feltételeit [3], [5], [13], [14].

A jelenség helye és kiterjedése hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékletekre épülő mérésekből nem határozható meg kellő részletességgel [1], [2], [15], [16]. Többmélységű hőmérséklet-monitorozás esetén viszont lehetőség nyílik a visszatérő ág szegmensenkénti értelmezésére, az időintegrált szegmensenergia meghatározására, valamint az exoterm, endoterm és bizonytalan viselkedésű tartományok elkülönítésére [11], [13]. A parazita hőleadási zóna egyik tömör diagnosztikai mutatója az exoterm–endoterm átmeneti mélység, amely a veszteségjellegű hőleadási tartomány és a hasznos hőfelvételi tartomány közötti határt jellemzi [13].

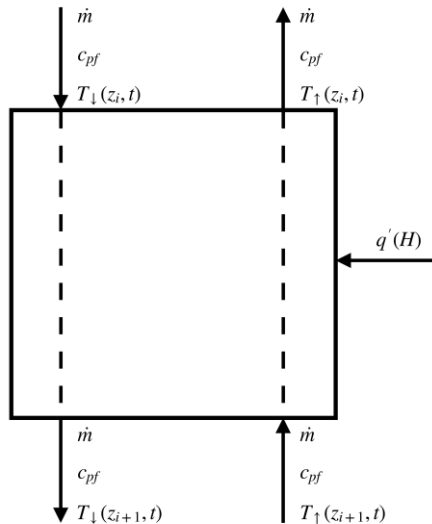
Az átmeneti mélység alkalmazhatósága azonban nem ítélhető meg pusztán abból, hogy egy adott mérési adatsoron számítható-e [13]. Üzemi monitoringkörnyezetben az idősorok tranzienst hatások, hidraulikai ingadozásokat, mérési zajt és adatkimaradásokat is tartalmazhatnak [13], [15], [16], [17]. A mérési bizonytalanság és a jel–zaj viszony ezért közvetlenül befolyásolja, hogy az egyes szegmensek hőleadó vagy hőfelvevő jellege mennyire tekinthető megbízhatóan azonosíthatónak [13], [17].

Jelen tanulmány a korábbi, többmélységű hőmérsékletméréseken alapuló zónaazonosítási munka kiegészítéseként azt vizsgálja, hogy a parazita exoterm mélységindikátor milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett tekinthető stabil, reprodukálható és diagnosztikai célra használható mutatónak [13]. A cikk az időablak-választás, a kezdeti tranzienst szakasz kizárása, a bizonytalanság alapú küszöbskálázás, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatását értékeli [13], [15], [16], [17].

VIZSGÁLT RENDSZER ÉS MÉRÉSI HÁTTÉR

A mérési bizonytalanság a diagnosztikai értelmezés egyik meghatározó tényezője. A terepi telepítést megelőzően az érzékelők kalibrálása és rendszerszintű összehasonlítása megtörtént. A teljes mérési láncra vonatkozó kombinált kiterjesztett bizonytalanság $k = 2$ lefedési tényező mellett $U \approx \pm 0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ értékkel került becslésre. Ez az érték a későbbi

szegmensosztályozásban nem utólagos hibabecslésként, hanem az exoterm, endoterm és bizonytalan kategóriák elkülönítésének alapfeltételeként jelenik meg. A visszatérő ág szegmensenkénti értelmezésének elvi alapját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A talajszonda szegmensenkénti energiámérlegének sematikus ábrázolása [14]

A vizsgált rendszer és a mérőrendszer főbb műszaki jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze. A táblázatban szereplő adatok közül a jelen vizsgálat szempontjából különösen fontos a 100 m-es furatmélység, a 10 m-es mélységi felbontás, valamint az előremenő és visszatérő ágon egyaránt alkalmazott 10–10 hőmérséklet-érzékelő. Ezek a paraméterek határozzák meg, hogy a furathőcserélő mentén milyen térbeli részletességgel értelmezhető a hőáram iránya és intenzitása. [13], [14]

Az 1. táblázatban bemutatott mérési kialakítás lehetővé teszi a visszatérő ág mentén kialakuló hőtechnikai viselkedés szegmensenkénti értékelését, ugyanakkor a módszer alkalmazhatóságát a mérési felbontás és az érzékelők bizonytalansága is befolyásolja. A 10 m-es mélységi osztás mérnöki szempontból alkalmas a főbb hőáram-tartományok elkülönítésére, de az átmeneti mélység meghatározása továbbra is interpolációt és bizonytalanság alapú értelmezést igényel. [13]

A mérési kampány egy referencia-egyensúlyi állapotot és két aktív, fűtési üzemi fázist tartalmazott. [13], [14] A referenciaállapot a keringésmentes, közel zavartalan hőmérsékleti profil rögzítésére szolgált, míg az aktív mérési fázisok a visszatérő ági hőáram-viselkedés üzemi értékelését tették lehetővé. A két aktív fázis eltérő térfogatárammal készült, ezért alkalmas volt annak vizsgálatára, hogy a hidraulikai terhelés miként befolyásolja az exoterm–endoterm átmeneti mélység meghatározhatóságát és robusztusságát. [13]

Paraméter	Érték / jellemző
Furatmező	80 db, egyenként 100 m mélységű talajszonda
Vizsgált szonda	100 m mélységű, szimpla U-csöves furathőcserélő

Paraméter	Érték / jellemző
Csőméret	2x40x3,7 mm HDPE
Fúrólukátmérő	130 mm
Mérési pontok	10-10 db érzékelő az előremenő és visszatérő ágon
Mélységi felbontás	10 m
Kiterjesztett bizonytalanság	$U \approx \pm 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 2$

1. táblázat: A vizsgált rendszer és mérőrendszer főbb jellemzői

A mérési fázisok főbb adatait a 2. táblázat tartalmazza. A 2. táblázat alapján látható, hogy az aktív mérési szakaszok eltérő időtartammal és eltérő térfogatárammal rendelkeztek. Az alacsonyabb, $0,585 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramú mérési fázis hosszabb tartózkodási időt és nagyobb szegmensenkénti hőmérsékletváltozásokat eredményezhetett, míg a $0,815 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramú fázis egyenletesebb, de kisebb hőmérséklet-különbségekkel jellemezhető üzemi állapotot képviselt. A két állapot összehasonlítása ezért megfelelő alapot biztosított az átmeneti mélység robusztussági és érzékenységi vizsgálatához.

Mérési fázis	Dátum	Időintervallum	Térfogatáram [m^3/h]	Időtartam [h]
Referencia-egyensúlyi állapot	2025.03.18.	11:25-16:03	-	4,38
1. aktív mérési fázis	2025.03.20.	10:20-12:41	0,585	2,21
2. aktív mérési fázis	2025.03.24.	12:18-17:11	0,815	4,53

2. táblázat: A mérési kampány főbb fázisai

A PARAZITA EXOTERM MÉLYSÉGINDIKÁTOR MÓDSZERTANI ALAPJAI

A jelen tanulmányban alkalmazott parazita exoterm mélységindikátor a visszatérő ág mentén mért többmélységű hőmérséklet-idősorokból származtatható. A módszer részletes matematikai és energetikai levezetése korábbi saját vizsgálat tárgyát képezte, ezért ebben a fejezetben csak azok az alapösszefüggések szerepelnek, amelyek a robusztussági és adatminőségi értékelés megértéséhez szükségesek. [13]

A visszatérő ág a mérési pontok alapján mélységi szegmensekre bontható. A vizsgált mérőrendszerben az érzékelők 10 m-es mélységi osztással helyezkednek el, ezért az egyes szegmensek két szomszédos mérési pont közötti tartományként értelmezhetők. Az adott szegmens hőtechnikai viselkedése a hőhordozó közeg tömegárama, fajhője és a szegmens két végpontján mért visszatérő ági hőmérséklet különbsége alapján írható le. Az így meghatározott vonalmenti hőáram előjele a lokális hőcsere irányát mutatja [13]:

- exoterm szakasz esetén a hőhordozó közeg hőt ad le a környezetének,
- endoterm szakasz esetén pedig hőt vesz fel a talajból.

A számítási gerinc első lépése az i -edik visszatérő ági szegmens pillanatnyi vonalmenti hőáramának meghatározása:

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

ahol $\dot{m}$ a hőhordozó közeg tömegáram, c_f a hőhordozó közeg fajhője, Δz_i az i -edik szegmens hossza, $T_{\uparrow}(Z_i, t)$ és $T_{\uparrow}(Z_{i+1}, t)$ pedig két szomszédos mélységi pont visszatérő ági hőmérséklete. A képletben alkalmazott előjel-konvenció szerint a pozitív érték a hőhordozó közeg oldaláról értelmezett veszteségjellegű hőleadást, a negatív érték pedig hőfelvételt jelez.

A pillanatnyi hőáramok önmagukban érzékenyek lehetnek a mérési zajra, a rövid idejű hidraulikai ingadozásokra és a tranziens folyamatokra. Ezért a diagnosztikai értékelésben nem egyetlen pillanatnyi érték, hanem a kiválasztott időablakra vonatkozó időintegrált vonalmenti szegmensenergia kerül felhasználásra:

$$Q_{\uparrow,i} = \int_0^{\tau_f} q_{\uparrow,i}(t) dt \quad (2)$$

Ez a mennyiség fejezi ki, hogy az adott szegmens a vizsgált időszak egészében nettó hőleadó vagy hőfelvevő jellegű volt-e. Az időintegrált értelmezés előnye, hogy mérsékli a rövid idejű mérési ingadozások hatását, és jobban jellemzi az adott üzemállapotban kialakuló domináns hőcsereirányt.

A terepi mérési adatok esetében a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek egyes esetekben kismértékűek lehetnek, ezért a hőcsere irányát nem célszerű kizárólag az előjel alapján értelmezni. A mérési bizonytalanság figyelembevételére szegmensenkénti osztályozási küszöb alkalmazható:

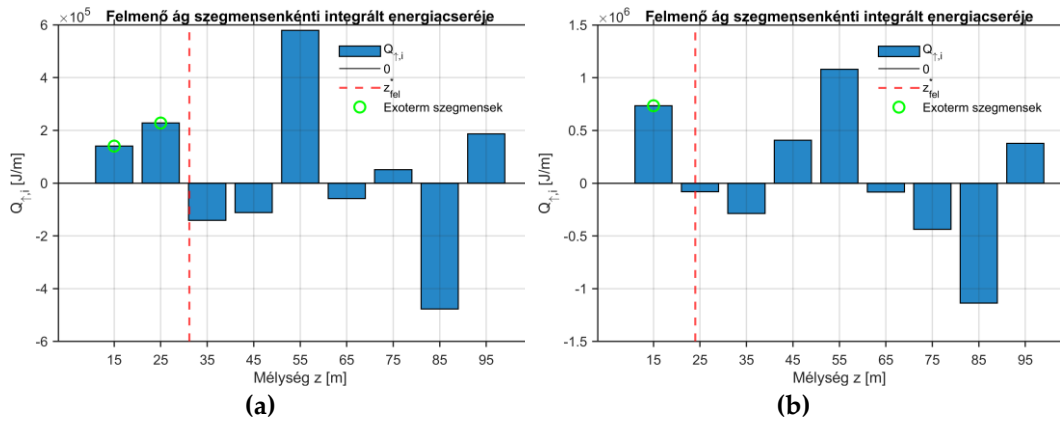
$$\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i} \quad (3)$$

ahol (k) a küszöbskálázó tényező, $\sigma_{Q,i}$ pedig az i -edik szegmens időintegrált mennyiségéhez tartozó becsült bizonytalanság. A szegmensek besorolása ennek megfelelően három kategória szerint történik. Ha $Q_{\uparrow,i}$, akkor a szegmens exotermnek tekinthető. Ha $Q_{\uparrow,i}$, akkor a szegmens endotermként értelmezhető. Amennyiben $Q_{\uparrow,i}$, a szegmens besorolása bizonytalan, mert a számított érték nem különíthető el megbízhatóan a mérési bizonytalanság hatásától [13].

A módszer fő kimeneti mennyisége az exoterm–endoterm átmeneti mélység. Ez azt a mélységi határt jelöli, ahol a visszatérő ág mentén a veszteségjellegű hőleadási tartomány átmegy a hasznos hőfelvételi tartományba. Az átmeneti mélység meghatározása a stabil előjelváltást mutató szomszédos szegmensek időintegrált értékei alapján, lineáris interpolációval történik:

$$z_{\uparrow}^* = z_{c,i^*} + \frac{Q_{\uparrow,i^*}}{Q_{\uparrow,i^*} - Q_{\uparrow,i^*+1}} (z_{c,i^*+1} - z_{c,i^*}) \quad (4)$$

Az így kapott $z_{\uparrow}^*$ érték a parazita hőleadási zóna térbeli kiterjedésének tömör, mérnöki szempontból jól értelmezhető diagnosztikai indikátora. A módszer értelmezését a 2. ábra szemlélteti, amely a mélység szerinti időintegrált szegmensenergia-profilokat és az azonosított átmeneti mélységet mutatja be két eltérő hidraulikai üzemállapot mellett [13].



2. ábra: Mélység szerinti $Q_{\uparrow,i}$ profilok és az azonosított $z_{\uparrow}^*$:
(a) kis térfogatáramú állapot; (b) nagy térfogatáramú állapot [13]

Az ábra alapján az exoterm szegmensek a visszatérő ág sekélyebb tartományában jelennek meg, míg a mélyebb szakaszokban a hőhordozó közeg már hőt vesz fel a környező talajból. A két tartomány közötti határ adja az átmeneti mélységet. Ez az értelmezés különösen fontos, mert a parazita hőleadási zóna hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékletre épülő monitoring alapján nem lokalizálható.

Az átmeneti mélység mellett kiegészítő energetikai mutatók is meghatározhatók. Ezek nem a zóna térbeli lokalizálását szolgálják, hanem a jelenség energetikai súlyosságának nagyságrendi értelmezését segítik. A szignifikánsan exoterm szegmensekből származó összesített hőmennyiség és az ehhez tartozó átlagos veszteségteljesítmény az alábbi módon írható fel:

$$P_{exo} = \frac{E_{exo}}{\tau_f} \quad (5)$$

A parazita hőleadás forrásoldali hőmérséklet-egyenértéke a veszteségteljesítményből, a tömegáramból és a hőhordozó közeg fajhőjéből becsülhető:

$$\Delta T_{out} = \frac{P_{exo}}{\dot{m}c_f} \quad (6)$$

Ez a mutató azt fejezi ki, hogy az azonosított parazita hőleadás mekkora forrásoldali hőmérséklet-szint-csökkenéssel értelmezhető. A ΔT_{out} tehát nem közvetlenül mért hőmérsékletcsökkenés, hanem a veszteségteljesítményből származtatott mérnöki egyenérték.

Az időablak-választás előzetes ellenőrzésére a teljes visszatérő ágra vonatkozó globális hőcserejel is alkalmazható:

$$q_{glob,\uparrow}(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N_s} q_{\uparrow,i}(t) \Delta z_i \quad (7)$$

A globális jel önmagában nem alkalmas a parazita hőleadási zóna mélységi lokalizálására, mivel a teljes visszatérő ági viselkedést egyetlen összesített mennyiségben írja le.

Ugyanakkor hasznos előszűrőként szolgál az időablak-választáshoz, mert segítségével azonosíthatók azok a mérési szakaszok, amelyekben a kezdeti tranziens hatások már mérséklődtek, és a rendszer viselkedése stabilabb üzemi állapothoz közelít [13].

ROBUSZTUSSÁGI ÉS ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATI KERET

A parazita exoterm mélységindikátor üzemi monitoringban történő alkalmazása szempontjából nem elegendő annak igazolása, hogy az átmeneti mélység egy adott mérési adatsoron meghatározható. A gyakorlati alkalmazhatóság feltétele az is, hogy a kapott indikátor stabil maradjon a kiértékelési feltételek ésszerű változtatása mellett, illetve ismert legyen, hogy milyen adatminőségi és üzemi körülmények között válik bizonytalanná az értelmezése. A robusztussági vizsgálatok négy fő tényezőre terjedtek ki [13]:

- a kiértékelési időablak megválasztására,
- a bizonytalanságalapú küszöbskálázó tényező hatására,
- a mintavételi ritkítás következményeire és
- a hiányzó adatok kezelésére.

Értékelési szempontok

A robusztusság értelmezéséhez először rögzíteni kell, hogy mely változások tekinthetők elfogadhatónak. Az átmeneti mélység esetében a fő szempont az, hogy a különböző, fizikailag indokolt feldolgozási beállítások mellett az első stabil exoterm–endoterm átmenet ugyanabban vagy közel azonos mélységtartományban maradjon. Ezzel szemben az energetikai mutatók esetében kisebb százalékos eltérés elfogadható, mivel ezek közvetlenül függenek az integrálási időtartamtól, a pillanatnyi hőáram-idősoroktól és az adatfeldolgozási beállításoktól [13].

A vizsgálati logika ezért két szintet különít el. Az első szint a térbeli lokalizáció, vagyis annak ellenőrzése, hogy megmarad-e az átmeneti mélység, illetve változik-e az exoterm szegmensek száma és mélységi elhelyezkedése. A második szint az energetikai súlyosság értékelése, amely azt vizsgálja, hogy mennyire változik az átlagos veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás. Ez a kettős megközelítés lehetővé teszi, hogy az indikátort ne csupán számított eredményként, hanem üzemi döntéstámogató információként értelmezzük [13], [14].

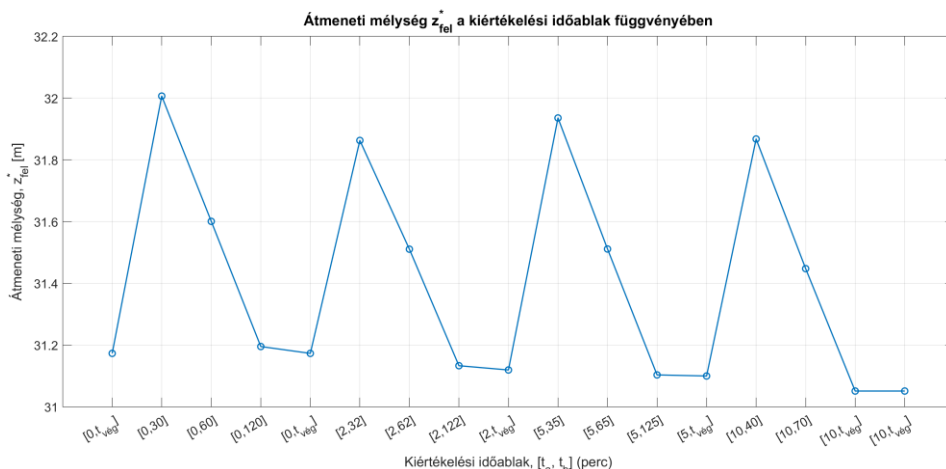
Időablak-választás és a kezdeti tranziens szakasz

Az üzemi idősorok értelmezésekor az egyik legfontosabb kérdés a kiértékelési időablak megválasztása. A mérés kezdetén gyakran jelentkeznek tranziens folyamatok, amelyek a hidraulikai állapot beállításából, valamint a hőhordozó közeg, a furathőcserélő és a környező talaj közötti hőtechnikai alkalmazkodásból származnak. Ha ezek a szakaszok változatlanul bekerülnek az időintegrált szegmensenergia számításába, akkor a szegmensbesorolás kevésbé tükrözheti a stabilabb üzemi viselkedést. [13]

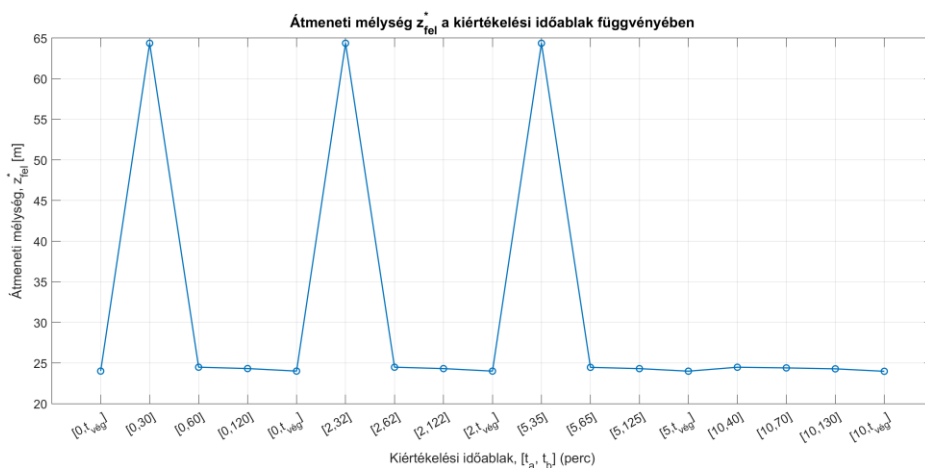
Az időablak-érzékenységi vizsgálat azt értékeli, hogy az átmeneti mélység és a kapcsolódó energetikai mutatók hogyan változnak eltérő kezdő- és záróidőpontok mellett. A térbeli indikátor akkor tekinthető robusztusnak, ha fizikailag indokolt időablakok esetén az exoterm és endoterm tartományok közötti határ csak kis mértékben változik. A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben érzékenyebbek lehetnek a rövidebb, korán induló vagy tranziens hatásokkal terhelt időablakokra. [13]

Az időablak-választás gyakorlati következménye, hogy a mérési kampány teljes hossza nem feltétlenül alkalmas egységes diagnosztikai kiértékelésre. A kezdeti beállási szakaszban a hőáram iránya és intenzitása még nem minden esetben a tartós üzemi viselkedést mutatja. A rövid idejű kezdeti hatások különösen az időintegrált mutatókat torzíthatják, mivel az integrálási időhöz képest aránytalanul nagy súlyt kaphatnak. Ezért a globális visszatérő ági jel, valamint a hőmérsékleti profil időbeli változása előszűrőként használható az értékelési időablak kijelöléséhez.

A vizsgált esetekben a stabilabb időablakok kiválasztása mellett az átmeneti mélység csak kis mértékben változott. Ez arra utal, hogy a parazita hőleadási zóna nem rövid idejű mérési zaj vagy véletlen tranziens következménye, hanem a rendszer adott üzemi állapotában következetesen megjelenő hőtechnikai jelenség. Az időablak-választás hatását a 3. ábra szemlélteti.



(a)



(b)

3. 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 [13]

A 3. ábra alapján az átmeneti mélység az értékelési időablak módosítása mellett is szűk tartományban maradt. Ez megerősíti, hogy az átmeneti mélység térbeli diagnosztikai

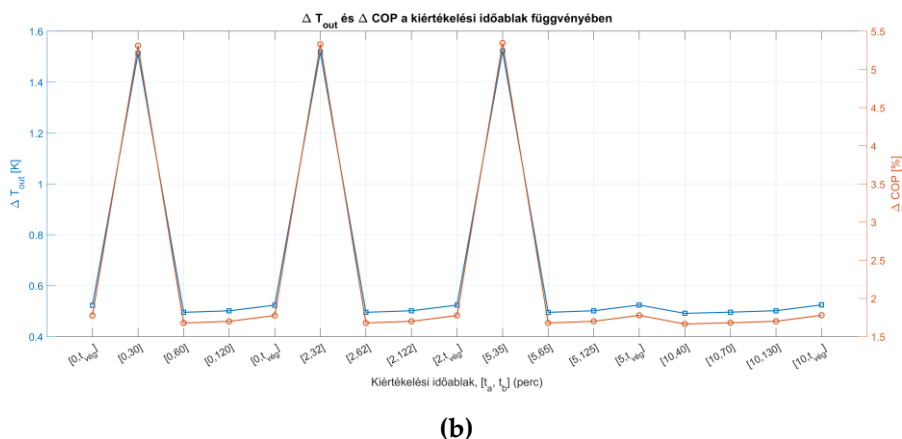
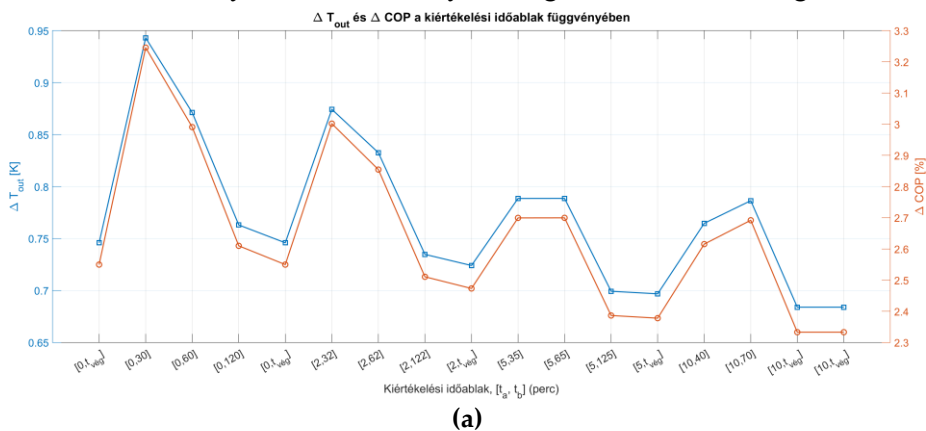
mutatóként stabilabbnak tekinthető, mint azok az energetikai mutatók, amelyek közvetlenül az időintegrált hőmennyiség nagyságából származnak.

Bizonytalanságalapú küszöbskalázás

A bizonytalanságalapú küszöbskalázás célja annak meghatározása, hogy a számított időintegrált szegmensenergia milyen mértékű eltérése tekinthető szignifikánsnak a mérési bizonytalansághoz képest. Alacsony küszöb esetén több szegmens sorolható egyértelműen exoterm vagy endoterm kategóriába, de nőhet a zajérzékenység. Magas küszöb esetén az osztályozás konzervatívabbá válik, ugyanakkor több szakasz kerülhet bizonytalan kategóriába. [13]

A vizsgálat során több küszöbskalázó tényező értéke került összehasonlításra. Az eredmények alapján az átmeneti mélység a vizsgált ésszerű tartományban stabil maradt: alacsonyabb térfogatáramnál 31,10 m, magasabb térfogatáramnál 24,00 m értéket adott. Ez azt jelzi, hogy az első stabil exoterm–endoterm átmenet helye nem a küszöb önkényes megválasztásának következménye, hanem a visszatérő ágban megjelenő hőtechnikai mintázat stabil térbeli jellemzője. [13]

A küszöbskalázás hatását a 4. ábra foglalja össze. Az ábra célja annak bemutatása, hogy az átmeneti mélység a vizsgált küszöbskalázási tartományban nem változott, vagyis az indikátor nem érzékeny túlzottan a bizonytalansági küszöb ésszerű megválasztására.



4. ábra: Időablak-érzékenység: ΔT_{out} és ΔCOP : (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot [13]

A 4. ábra alapján a kapott eredmény kedvező, mert az átmeneti mélység a vizsgált (k) értékek mellett változatlan maradt. Az indikátor nem a küszöb finomhangolásából adódik. A szegmensenkénti osztályozási struktúra stabilitása az exoterm és endoterm tartományok elkülönítése a mért hőmérsékletprofilokból származó időintegrált hőmennyiségek előjelen és nagyságán alapul, nem pedig a feldolgozási beállítások önkényességén.

A küszöbskálázás gyakorlati értelme az, hogy a diagnosztikai eljárás ne legyen túlérzékeny a mérési bizonytalanság tartományába eső kis eltérésekre. Ha a küszöb túl alacsony, akkor a zaj is exoterm vagy endoterm besorolást eredményezhet. Ha viszont túl magas, akkor a módszer elveszítheti a valóban jelen lévő, de mérsékelt hőtechnikai eltérések felismerésének képességét. Ezért a küszöböt nem optimalizálandó illesztési paraméterként, hanem konzervatív megbízhatósági feltételként célszerű kezelni.

Mintavételi ritkítás

Gyakorlati monitoringrendszerekben nem mindig áll rendelkezésre nagy időfelbontású adatsor. Az adatgyűjtési gyakoriságot befolyásolja az érzékelőrendszer kialakítása, az adattárolási kapacitás, a kommunikációs infrastruktúra és az utólagos feldolgozás módja. Ezért szükséges vizsgálni, hogy a módszer mennyire érzékeny a mintavételi sűrűség csökkentésére. [13]

A ritkítási vizsgálat során az eredeti hőmérséklet-idősorokból ritkított adatsorok képezhetők, majd ezek alapján újraszámítható az időintegrált szegmensenergia, az átmeneti mélység és a kiegészítő energetikai mutatók. A módszer akkor tekinthető robusztusnak, ha mérsékelt ritkítás mellett az átmeneti mélység lényegében változatlan marad. A teljesítményjellegű mutatók ugyanakkor erősebben függhetnek az időbeli integrálás pontosságától.

A mintavételi ritkítás eredményeinek értelmezésekor fontos különbséget tenni a térbeli és az energetikai kimenetek között. A térbeli kimenet, vagyis az átmeneti mélység akkor marad stabil, ha a szegmensek alapvető exoterm vagy endoterm jellege nem változik. Az energetikai mutatók ezzel szemben az időbeli integrálás részletességétől is függenek, ezért nagyobb mértékben módosulhatnak, ha az idősor rövid idejű ingadozásait a ritkított adat már nem követi.

Monitoringtervezési szempontból ez kedvező következtetéshez vezet. Ha az elsődleges cél a parazita hőleadási zóna lokalizálása, akkor az átmeneti mélység mérsékelt ritkítás mellett is alkalmazható lehet. Ha azonban az üzemeltető a veszteségteljesítmény vagy a COP-hatás nagyságrendi becslését is használni kívánja, akkor nagyobb időfelbontásra és szigorúbb adatfolytonosságra van szükség.

Hiányzó adatok kezelése

A valós üzemi monitoringadatok gyakran nem teljesek. Rövid adatkimaradások keletkezhetnek kommunikációs zavar, érzékelőlekérdezési hiba, adatnaplózási probléma vagy utólagos adattisztítás következtében. Mivel a parazita exoterm mélységindikátor időintegrált szegmensenergiákon alapul, az adathiányok hatása nemcsak azok hosszától, hanem időbeli és mélységi elhelyezkedésüktől is függ. [13]

Rövid, elszórt adatkimaradások általában lineáris interpolációval kezelhetők, különösen akkor, ha nem érintik közvetlenül az exoterm–endoterm átmeneti tartományt. Hosszabb vagy koncentrált adathiány esetén azonban az interpolált értékek már nem feltétlenül tükrözik a tényleges hőtechnikai viselkedést. Ilyen esetben az átmeneti mélységet nem célszerű egyetlen pontértékként megadni; indokoltabb bizonytalan mélységtartományt kijelölni, vagy az adott időablakot kizárni a diagnosztikai értékelésből.

A hiányzó adatokkal kapcsolatos vizsgálatok rámutatnak arra, hogy az interpoláció nem tekinthető minden esetben semleges adatfeldolgozási műveletnek. Rövid, elszórt hiány esetén a lineáris pótlás a hőmérsékleti idősor folytonosságát megfelelően visszaadhatja, hosszabb adathiány esetén azonban elfedhet tényleges tranziens vagy lokális hőtechnikai változásokat. Ez különösen akkor jelent kockázatot, ha az adathiány az átmeneti mélység környezetében jelentkezik. [13]

A megbízható diagnosztikai alkalmazás ezért megköveteli, hogy az adathiányokat ne kizárólag mennyiségi arányuk alapján értékeljük. Azonos hiányarány eltérő hatást okozhat attól függően, hogy a hiány a stabil endoterm tartományban, a sekély exoterm szakaszon vagy az átmeneti zónában található. Emiatt az adathiányok időbeli és mélységi elhelyezkedése az indikátor alkalmazhatósági feltételei közé tartozik.

A robusztussági vizsgálatok főbb szempontjait és diagnosztikai jelentőségét a 3. táblázat foglalja össze.

Vizsgált tényező	Fő kérdés	Diagnosztikai jelentőség
Időablak-választás	Kizárhatók-e a kezdeti tranziens szakaszok?	A stabil üzemi állapot kijelölése csökkenti a téves következtetés kockázatát
Küszöbskálázás	Változik-e az átmeneti mélység a küszöb módosítására?	A stabil átmeneti mélység az indikátor robusztusságát jelzi
Mintavételi ritkítás	Megmarad-e a szegmensbesorolás ritkább adatsor esetén?	Meghatározza a gyakorlati monitoring minimális adatfelbontását
Hiányzó adatok	Mekkora és milyen elhelyezkedésű adatvesztés mellett értelmezhető még az eredmény?	Az adatfolytonosság és az interpoláció hatását minősíti

3. táblázat: A robusztussági vizsgálatok szerepe az indikátor értelmezésében

EREDMÉNYEK ÉS DIAGNOSZTIKAI ÉRTELMEZÉS

A robusztussági és érzékenységi vizsgálatok fő eredménye, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység megfelelően kiválasztott üzemi időablak és kielégítő adatminőségi feltételek mellett stabilabb diagnosztikai indikátorként viselkedik, mint a teljesítményjellegű mutatók. Ez a megállapítás gyakorlati szempontból azért lényeges, mert üzemi állapotfelügyeletben a cél gyakran nem az egyes pillanatnyi veszteségteljesítmények pontos meghatározása, hanem a kedvezőtlen hőtechnikai viselkedés térbeli lokalizálása és megbízható értelmezése. [13]

Az időablak-érzékenységi vizsgálat alapján az átmeneti mélység mindkét vizsgált hidraulikai üzemállapotban viszonylag stabilnak bizonyult. Alacsonyabb térfogatáram esetén a becsült átmeneti mélység a vizsgált időablakok mellett szűk tartományban, 31,05–32,01 m között változott. Tehát a parazita hőleadási zóna térbeli határa nem egyetlen önkényesen kiválasztott kiértékelési ablak eredménye, hanem a visszatérő ág mérési adataiban következetesen megjelenő hőtechnikai mintázat.

A küszöbskálázási vizsgálat további megerősítést adott az indikátor stabilitására. Az ésszerű tartományban változtatott bizonytalansági küszöb nem módosította az

első stabil exoterm–endoterm átmenet helyét. Alacsonyabb térfogatáram mellett az átmeneti mélység 31,10 m, magasabb térfogatáram mellett 24,00 m értéken maradt. Ez diagnosztikai szempontból kedvező eredmény, mert jelzi, hogy az átmeneti mélység nem a küszöbérték önkényes megválasztásából, hanem a mért hőtechnikai viselkedésből származtatható.

A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben érzékenyebben reagáltak az adatfeldolgozási feltételekre. Rövidebb, a mérés kezdetéhez közelebb eső időablakoknál az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték nagyobb eltérést mutatott a referenciaablakhoz képest. Ennek oka, hogy ezek a mutatók közvetlenül az időintegrált hőmennyiség nagyságából származnak, így a tranziens folyamatok, a rövid idejű ingadozások és az integrálási időtartam erősebben befolyásolják őket.

A mintavételi ritkítás eredményei szerint az átmeneti mélység a vizsgált ritkítási beállítások mellett mindkét üzemállapotban stabil maradt. A térbeli lokalizációs mutató mérsékelt adatritkítás mellett is használható lehet üzemi monitoringban. Az energetikai mutatók ugyanakkor, különösen alacsonyabb térfogatáramnál, érzékenyebbnek bizonyultak az adatfelbontás változására. Ez megerősíti azt az értelmezést, hogy az átmeneti mélység elsődlegesen térbeli diagnosztikai indikátor, míg a teljesítményjellegű mutatók inkább a jelenség energetikai súlyosságának becslésére alkalmasak.

A hiányzó adatok vizsgálata azt mutatta, hogy rövid, elszórt adatkimaradások lineáris interpolációval többnyire kezelhetők, amennyiben nem az átmeneti tartományt érintik. Hosszabb, 10–15 perces adathiányok alacsonyabb térfogatáramnál már érzékelhető eltéréseket okozhattak a teljesítményjellegű mutatókban. Szélső esetben a veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték változása 3,2% nagyságrendű volt. Magasabb térfogatáram esetén az interpoláció hatása lényegesen kisebb, legfeljebb 0,11% volt. A hiányadat-kezelés értékelése ezért nemcsak az adathiány hosszától, hanem annak időbeli és mélységi elhelyezkedésétől is függ.

A diagnosztikai értelmezésben célszerű az átmeneti mélységet elsődleges lokalizációs indikátorként kezelni. Ez adja meg, hogy a veszteségjellegű hőleadási zóna milyen mélységig terjed. A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben kiegészítő szerepet töltenek be: a lokalizált jelenség energetikai súlyosságának becslésére használhatók, de önmagukban nem alkalmasak a zóna térbeli azonosítására. Az indikátorok ilyen elkülönített értelmezése segíti annak meghatározását, hogy az eredmény üzemi döntéstámogatásra megbízhatóan felhasználható-e.

Az eredmények alapján a parazita exoterm mélységindikátor három diagnosztikai értelmezési kategóriába sorolható. A kategóriák célja annak jelzése, hogy az adott mérési és adatfeldolgozási feltételek mellett az átmeneti mélység milyen megbízhatósággal használható állapotfelügyeleti információként. A 4. táblázat ezt a diagnosztikai minősítési rendszert foglalja össze.

Kategória	Jellemző feltételek	Értelmezés
Megbízható	Stabil időablak, kizárt kezdeti tranziens, jó adatfolytonosság, stabil küszöbérzékenység	Az átmeneti mélység üzemi monitoringban alkalmazható térbeli indikátor

Kategória	Jellemző feltételek	Értelmezés
Korlátozottan megbízható	Rövidebb időablak, mérsékelt zaj, kisebb adathiány, néhány bizonytalan szegmens	Az indikátor használható, de bizonytalansági megjegyzéssel
Nem javasolt	Erős tranziens hatás, jelentős vagy koncentrált adathiány, gyenge jel-zaj viszony, instabil átmeneti mélység	A diagnosztikai következtetés nem tekinthető megbízható döntéstámogató információnak

4. táblázat: A parazita exoterm mélységindikátor diagnosztikai értelmzési kategóriái

A fő robusztussági eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázat célja annak áttekinthető bemutatása, hogy az egyes érzékenységi vizsgálatok milyen módon támasztják alá az átmeneti mélység elsődleges diagnosztikai szerepét, illetve hol jelennek meg a teljesítményjellegű mutatók érzékenységi korlátai. [13]

Vizsgálat	Alacsony térfogat- áram	Magas térfogatáram	Értelmezés
Időablak-érzékenység	31,05-32,01 m	stabil tartomány	Az átmeneti mélység csak kismértékben változik
Küszöbskálázás	31,10 m	24,00 m	A k ésszerű tartománya nem módosítja az átmenetet
Mintavételi ritkítás	átmeneti mélység stabil, energetikai mutatók érzékenyebbek	átmeneti mélység stabil	A lokalizáció robusztusabb, mint a teljesítménybecslés
Hiányadat-kezelés	10-15 perces hiány érzékelhető eltérést okozhat	hatás kisebb, legfeljebb 0,11%	Az adathiány helye és hossza döntő

5. táblázat: A fő robusztussági eredmények összefoglalása

Az 5. táblázat alapján megállapítható, hogy az átmeneti mélység a vizsgált feldolgozási feltételek mellett következetesen stabilabb mutatóként viselkedett, mint a teljesítményjellegű indikátorok. Ez nem jelenti azt, hogy az energetikai mutatók elhagyhatók, hanem azt, hogy eltérő szerepben célszerű használni őket. Az átmeneti mélység a zóna térbeli lokalizálását szolgálja, míg az átlagos veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás a lokalizált jelenség energetikai jelentőségét segíti értelmezni.

Az eredmények üzemi döntéstámogatási jelentősége

A bemutatott eredmények üzemeltetési szempontból azért lényegesek, mert a parazita hőleadási zóna azonosítása önmagában még nem jelenti azt, hogy azonnali beavatkozás szükséges. A döntéshez azt is mérlegelni kell, hogy a jelenség térben milyen kiterjedésű, energetikailag milyen nagyságrendű hatást képvisel, és az indikátor milyen adatminőségi feltételek mellett került meghatározásra. A diagnosztikai keret ezért nemcsak hibakeresési eszközként, hanem döntési szűrőként is értelmezhető: segít elkülöníteni a stabilan megje-

lenő, üzemeltetési szempontból releváns hőtechnikai mintázatokat azoktól az eredményektől, amelyek inkább adatminőségi problémákból vagy átmeneti üzemi hatásokból származhatnak. [13], [14]

Az átmeneti mélység elsődleges szerepe a lokalizáció. Ha a veszteségjellegű hőleadási tartomány ismételt azonos vagy közel azonos mélységtartományban jelenik meg, akkor az a szonda vagy a furatkör adott szakaszához köthető hőtechnikai sajátosságra utalhat. Ilyen esetben az üzemeltető célzottabban vizsgálhatja a sekély zóna hőtechnikai hatását, a csőágak közötti belső hőátadást, a hidraulikai beszabályozást vagy a furatmezőn belüli kölcsönhatások szerepét. Ha viszont az átmeneti mélység erősen ingadozik az adatfeldolgozási beállítások függvényében, akkor az eredmény nem tekinthető kellően megalapozott döntéstámogató információnak.

Az energetikai mutatók másodlagos, de fontos szerepet töltenek be. Az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték segít megítélni, hogy a lokalizált jelenség rendszerszinten elhanyagolható, mérsékelt vagy jelentősebb hatású. Ugyanakkor ezek az értékek érzékenyebben reagálhatnak az időablak-választásra, az adathiányokra és a mintavételi felbontásra, ezért önmagukban nem célszerű beavatkozási döntés alapjául szolgálniuk. A megbízható értékeléshez a térbeli lokalizációt és az energetikai súlyosságot együtt kell értelmezni. [13], [14]

Összevetés a hagyományos monitoringmegközelítéssel

A hagyományos primer oldali monitoring jellemzően a belépő és kilépő hőmérsékletre, a térfogatáramra és az ezekből számított összesített hőteljesítményre épül. Ezek a mennyiségek alkalmasak a rendszer globális energiaforgalmának értékelésére, de nem mutatják meg, hogy a talajszonda mentén hol alakulnak ki kedvező vagy kedvezőtlen hőtechnikai szakaszok. Ennek következtében egy sekély visszatérő ági hőleadási zóna globális mérésekből akár rejtve is maradhat, vagy csak közvetett módon, a forrásoldali hőmérsékletszint romlásán keresztül érzékelhető [1], [2], [15], [16].

A mélységfelbontású hőmérsékletmérés hozzáadott értéke abban áll, hogy a hőcserét nem egyetlen összesített értéként, hanem mélységi eloszlásként teszi értelmezhetővé. Ez különösen akkor előnyös, ha a rendszerben nem homogén viselkedés, rétegzett talajkörnyezet, eltérő furatközi kölcsönhatás, vagy az előremenő és visszatérő csőág közötti belső hőcsere jelentkezik. A módszer ezért a hagyományos primer oldali monitoringot nem váltja, hanem kiegészíti: a globális energiaforgalmi adatok mellé térbeli diagnosztikai információt rendel [11], [13].

Ebből következik, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység különösen hasznos lehet olyan rendszereknél, ahol a hosszabb távú teljesítményromlás vagy kedvezőtlen forrásoldali viselkedés oka nem állapítható meg pusztán a hőszivattyú berendezésoldali adataiból. A furathőcserélő mélységi viselkedésének vizsgálata segíthet elkülöníteni, hogy a megfigyelt jelenség a forrásoldali hőcsere lokális sajátosságaiból, a hidraulikai üzemállapotból, a furatmezőn belüli kölcsönhatásokból vagy a mérési adatok minőségéből ered-e. A hagyományos primer oldali monitoring és a mélységfelbontású diagnosztikai monitoring főbb jellemzőit a 6. táblázat foglalja össze [1], [2], [11], [13].

Szempont	Hagyományos primer oldali monitoring	Mélységfelbontású diagnosztikai monitoring
Mért információ	Belépő/kilépő hőmérséklet, térfogatáram, összesített teljesítmény	Mélységi hőmérsékletprofil, szegmensenkénti hőcsere
Fő előny	Egyszerű, olcsó, általánosan alkalmazható	Lokális hőtechnikai zónák azonosítása
Fő korlát	Nem lokalizálja a furat menti jelenségeket	Több érzékelőt és adatminőségi ellenőrzést igényel
Döntéstámogatás	Globális energetikai értékelés	Térbeli diagnosztika és célzott beavatkozás előkészítése

6. táblázat: A hagyományos és a mélységfelbontású monitoring összehasonlítása

ALKALMAZHATÓSÁGI FELTÉTELEK ÉS KORLÁTOK

A parazita exoterm mélységindikátor üzemi monitoringban akkor alkalmazható megbízhatóan, ha a felhasznált mérési adatok és üzemi feltételek alkalmasak a visszatérő ág mentén kialakuló hőáram-viselkedés értelmezésére. A módszer nem önmagában vett számítási eljárás, hanem diagnosztikai kiértékelési keret, amelyben az eredmény megbízhatósága közvetlenül függ az adatminőségtől, a hidraulikai állapottól és a feldolgozási beállítástól [13].

Az egyik legfontosabb alkalmazási feltétel a stabil vagy közel stabil üzemi időablak kijelölése. A kezdeti tranziens szakasz változatlan bevonása torzítja az időintegrált szegmensenergiákat, ezért a módszer alkalmazása előtt célszerű előzetes stabilitásvizsgálatot végezni. Ugyancsak szükséges a mérési adatok folytonosságának, a jel–zaj viszonynak és a térfogatáram stabilitásának ellenőrzése. Ezek hiányában az átmeneti mélység ugyan számítható lehet, de diagnosztikai jelentése bizonytalanra válhat [13].

A bizonytalanságalapú küszöbölés a módszer egyik alapvető eleme. Azok a szegmensek, amelyeknél a számított hőmennyiség nem haladja meg a bizonytalansági küszöböt, nem sorolhatók felelősen egyértelműen exoterm vagy endoterm kategóriába. A bizonytalan kategória alkalmazása csökkenti annak kockázatát, hogy a mérési zajból, érzékelőbizonytalanságból vagy rövid idejű hidraulikai ingadozásból származó eltérések tévesen hőtechnikai jelenségeként kerüljenek értelmezésre [13].

A módszer gyakorlati alkalmazhatóságának további feltétele, hogy rendelkezésre álljanak a visszatérő ág mentén több mélységben rögzített hőmérséklet-idősorok. Hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékleteket mérő primer oldali monitoring esetében az exoterm–endoterm átmeneti mélység nem határozható meg. A módszer ezért nem általános, minden hőszivattyús rendszerre közvetlenül alkalmazható értékelési eljárás, hanem kifejezetten mélységfelbontású mérési infrastruktúrát igénylő diagnosztikai módszer.

Az energetikai hatások értelmezése szintén óvatosságot igényel. Az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték a mérési adatokból származtatható, a becsült COP-hatás azonban egyszerűsített helyettesítő modellre épül. Emiatt a COP-változás nem tekinthető berendezésspecifikus, abszolút teljesítmény-előrejelzésnek. Diagnosztikai célra alkalmas lehet a jelenség nagyságrendi értelmezésére, de részletes hőszivattyúmodell vagy gyártói teljesítményadatok nélkül csak korlátozott érvényességgel használható.

A módszer biztonságstudományi jelentősége abban áll, hogy a mérési adatokból származtatott hőtechnikai indikátort üzemi döntéstámogató információként kezeli. A parazita exoterm átmeneti mélység lokalizálja a visszatérő ág mentén jelentkező kedvezőtlen hőleadási tartományt, az adatminőségi értékelés pedig megmutatja, hogy az eredmény milyen megbízhatósággal használható. Ez hozzájárul ahhoz, hogy a talajszondás hőszivattyús rendszerek monitoringja ne csupán adatgyűjtésre, hanem megalapozott állapotértékelésre és üzemeltetési döntéstámogatásra is alkalmas legyen. [13], [14]

Gyakorlati alkalmazási javaslat

A módszer gyakorlati bevezetésekor célszerű lépcsőzetes diagnosztikai eljárást alkalmazni. Első lépésben ellenőrizni kell a mérőrendszer működését, az érzékelők rendelkezésre állását, az időbélyegek folytonosságát és a térfogatáram stabilitását. Második lépésben ki kell választani azt az üzemi időablakot, amelyben a kezdeti tranziens szakasz már nem dominál. Harmadik lépésként elvégezhető a szegmensenkénti osztályozás, majd az exoterm–endoterm átmeneti mélység meghatározása. Végül érzékenységi ellenőrzéssel kell minősíteni, hogy az eredmény megbízható, korlátozottan megbízható vagy nem javasolt diagnosztikai kategóriába tartozik-e.

Üzemeltetői szempontból az átmeneti mélység legnagyobb előnye, hogy közvetlen térbeli információt ad. Nemcsak azt jelzi, hogy a primer oldalon veszteségjellegű jelenség van jelen, hanem azt is, hogy ez milyen mélységi tartományig terjed. Ez segítheti a célzott beavatkozási lehetőségek mérlegelését, például a sekély szakasz hőtechnikai hatásának vizsgálatát, a mérőrendszer további ellenőrzését vagy a furatmező hidraulikai beszabályozásának felülvizsgálatát.

A gyakorlati alkalmazás során javasolt ellenőrzési lépéseket és azok döntési következményeit a 7. táblázat foglalja össze. A táblázat célja, hogy az indikátor használatát ne pusztán számítási eredményként, hanem ellenőrzött diagnosztikai folyamatként tegye értelmezhetővé.

Ellenőrzési lépés	Elfogadható feltétel	Döntési következmény
Időablak stabilitása	A kezdeti tranziens kizárható	Kiértékelés folytatható
Adatfolytonosság	Nincs hosszú vagy átmeneti zónát érintő hiány	Pontértékű átmeneti mélység megadható
Bizonytalansági küszöb	A k módosítása nem változtatja az átmeneti mélységet	Indikátor robusztusnak tekinthető
Mintavételi sűrűség	Ritkítás mellett a szegmens-besorolás stabil	Hosszú távú monitoringra alkalmas
Energetikai mutatók	Eltérésük ismert és dokumentált	Csak kiegészítő súlyossági mutatóként használhatók

7. táblázat: Javasolt alkalmazási ellenőrzőlista üzemi monitoringhoz

Általánosíthatóság és kutatási korlátok

A vizsgálat eredményei egy konkrét mérőrendszerhez és üzemeltetési környezethez kapcsolódnak. A vizsgált furathőcserélő 100 m mélységű, szimpla U-csöves talajszonda volt, 10 m-es mélységi hőmérsékletfelbontással. Más furatgeometria, eltérő csőelrendezés, más tömedékelési minőség, jelentősen eltérő talajrétegződés vagy más hidraulikai beállítás

esetén az átmeneti mélység számszerű értékei és érzékenysége eltérhetnek. Ezért az eredmények általánosítása további terepi vizsgálatokat igényel. [13]

További korlátot jelent, hogy a módszer visszatérő ági többmélységű hőmérséklet-mérés rendelkezésre állását feltételezi. A hagyományos primer oldali monitoring esetén, ahol csak belépő és kilépő hőmérsékletet mérnek, az átmeneti mélység nem határozható meg. A módszer tehát nem minden hőszivattyús rendszerben alkalmazható közvetlenül, hanem kifejezetten olyan mérési infrastruktúrát igényel, amely képes a talajszonda mélységi viselkedésének követésére.

A becsült COP-hatás értelmezése szintén korlátozott. A forrásoldali hőmérséklet-egyenértékből származtatott relatív COP-változás diagnosztikai jellegű mutató, nem pedig berendezésspecifikus teljesítménygarancia. A hőszivattyú tényleges COP-értékét a kompresszor karakterisztikája, a szabályozási stratégia, a részterhelés, a szekunder oldali hőmérsékletszint és a teljes rendszer hidraulikai állapota is befolyásolja. Emiatt a COP-hatás csak nagyságrendi, összehasonlító értelmezésre használható. [13], [14]

ÖSSZEGZÉS

A vizsgálat középpontjában nem a zónaazonosítási módszer részletes matematikai levezetése állt, hanem annak értékelése, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett alkalmazható megbízható monitoringindikátorként. A többmélységű visszatérő ági hőmérsékletmérések alapján a talajszonda mentén szegmensenként értelmezhető a hőhordozó közeg hőleadó vagy hőfelvevő viselkedése. Az időintegrált szegmensenergia és a bizonytalanságalapú osztályozás lehetővé teszi az exoterm, endoterm és bizonytalan szakaszok elkülönítését. Az ezekből meghatározott átmeneti mélység a parazita hőleadási zóna térbeli kiterjedésének tömör, mérnöki szempontból jól értelmezhető mutatója.

Az eredmények alapján az átmeneti mélység a vizsgált üzemi állapotokban stabilabb diagnosztikai indikátorként viselkedett, mint a közvetlen teljesítményjellegű mutatók. Az időablak-érzékenységi vizsgálat szerint alacsonyabb térfogatáram esetén az átmeneti mélység szűk tartományban, 31,05–32,01 m között változott. A küszöbskálázási vizsgálat szintén kedvező eredményt adott: az átmeneti mélység alacsonyabb térfogatáram mellett 31,10 m, magasabb térfogatáram mellett 24,00 m értéken maradt. Ez arra utal, hogy az indikátor nem a feldolgozási beállítások önkényes megválasztásából, hanem a visszatérő ágban következetesen megjelenő hőtechnikai mintázatból származtatható.

A vizsgálatok ugyanakkor azt is igazolták, hogy az indikátor megbízható alkalmazása nem függetleníthető az adatminőségi feltételektől. A kezdeti tranziens szakasz kizárása, a bizonytalanságalapú küszöbölés, a mintavételi sűrűség és a hiányzó adatok kezelése közvetlenül befolyásolja az eredmények értelmezhetőségét. A mintavételi ritkítás mellett az átmeneti mélység stabil maradt, míg a teljesítményjellegű mutatók érzékenyebbnek bizonyultak. A hiányadat-kezelés esetében különösen fontosnak bizonyult az adathiány időbeli és mélységi elhelyezkedése: alacsonyabb térfogatáramnál a 10–15 perces hiányok már érzékelhető eltérést okozhattak, míg magasabb térfogatáramnál az interpoláció hatása lényegesen kisebb volt.

A teljesítményjellegű mutatók, például az átlagos parazita veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás fontos kiegészítő információt

adnak a lokalizált jelenség energetikai súlyosságáról. Ezek azonban érzékenyebben reagálnak az időablak-választásra, az adathiányokra és a mintavételi beállításokra, ezért elsődleges lokalizációs indikátorként az exoterm–endoterm átmeneti mélység alkalmazása indokoltabb. A térbeli lokalizáció és az energetikai súlyosság együttes értelmezése adhat megalapozott üzemi döntéstámogató információt.

A további kutatásokban indokolt a módszer kiterjesztése több furatra, hosszabb mérési kampányokra és eltérő szezonális üzemállapotokra. Különösen fontos annak vizsgálata, hogy a parazita hőleadási zóna ismétlődően azonos mélységtartományban jelentkezik-e, illetve hogyan változik hosszabb távú terhelési ciklusok, fűtési és hűtési üzemváltások, valamint eltérő hidraulikai beszabályozások mellett. Ezek az eredmények tovább erősíthetik a módszer üzemi állapotfelügyeleti és biztonság tudományi alkalmazhatóságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] G. Florides and S. Kalogirou, 'Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications', *Renew. Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2461–2478, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.12.014.
- [2] H. Yang, P. Cui, and Z. Fang, 'Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems', *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 16–27, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.038.
- [3] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, 'Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options', *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 341–348, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.048.
- [4] P. Christodoulides, C. Christou, and G. A. Florides, 'Ground Source Heat Pumps in Buildings Revisited and Prospects', *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3329, Jul. 2024, doi: 10.3390/en17133329.
- [5] M. Soltani *et al.*, 'A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems', *Sustain. Cities Soc.*, vol. 44, pp. 793–818, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.036.
- [6] H. Y. Zeng, N. R. Diao, and Z. H. Fang, 'A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers', *Heat Transfer—Asian Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 558–567, Nov. 2002, doi: 10.1002/htj.10057.
- [7] T. V. Bandos *et al.*, 'Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations', *Geothermics*, vol. 38, no. 2, pp. 263–270, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.geothermics.2009.01.003.
- [8] D. Marcotte and P. Pasquier, 'Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems', *Geothermics*, vol. 37, no. 6, pp. 651–665, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.08.003.
- [9] L. Lamarche and B. Beauchamp, 'A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes', *Energy Build.*, vol. 39, no. 2, pp. 188–198, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.06.003.
- [10] P. Pasquier and D. Marcotte, 'Joint use of quasi-3D response model and spectral method to simulate borehole heat exchanger', *Geothermics*, vol. 51, pp. 281–299, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.02.001.
- [11] N. Aranzabal, J. Martos, H. Steger, P. Blum, and J. Soret, 'Temperature measurements along a vertical borehole heat exchanger: A method comparison', *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 1247–1258, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.092.

- [12] K. Zhou, J. Mao, Y. Li, H. Zhang, and Z. Deng, '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 Built Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 179–194, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.11.001.
- [13] V. Zonai, L. Garbai, and R. Santa, 'Multipoint Temperature-Based Depth Analysis of a U-Tube Borehole Heat Exchanger', *Technologies*, vol. 14, no. 3, p. 187, Mar. 2026, doi: 10.3390/technologies14030187.
- [14] V. Zonai and R. Santa, 'In-situ identification of axial borehole thermal conductivity from measured transient heat extraction', *Energy Build.*, vol. 363, p. 117613, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.enbuild.2026.117613.
- [15] J. D. Spitler and S. E. A. Gehlin, 'Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1125–1137, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.061.
- [16] S. Wilke, K. Menberg, H. Steger, and P. Blum, 'Advanced thermal response tests: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, p. 109575, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109575.
- [17] P. Bujok *et al.*, 'Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values', *Energy*, vol. 64, pp. 120–129, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.11.079.