

A Demjén környéki terület felszín alatti hőmérsékletviszonyainak becslése

VASS P.

Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros
E-mail: peter.vass@uni-miskolc.hu

A geotermikus energia helyi hasznosítása szempontjából nagyon fontos a kisebb területek felszín alatti hőmérsékleti viszonyainak kutatása. A tanulmányban bemutatásra kerülnek a Demjén környéki olajkutatás és -termelés során mélyített fúrásokban mért hőmérsékleti adatok feldolgozási módszerei és a korrigált adatok együttes kiértékelésének folyamata. A feldolgozásban használt Horner-módszer alkalmazhatóságának vizsgálata pozitív eredményt hozott. A helyi hőmérséklet–mélység függvény becsléséhez pedig egy olyan modellt használtam, amely a konduktív és a konvektív hőáramlást egyaránt figyelembe veszi. A modellparaméterek optimális értékeinek meghatározását a reziduumok L1 és L2 normák szerinti minimalizálással hajtottam végre. Az eredmények ellenőrzésénél további fúrások talphőmérsékleti adataira és a szakirodalomra támaszkodtam. A becsült hőmérséklet–mélység függvényekből meghatároztam a geotermikus gradiens függvényeit is. Az összehasonlító vizsgálatok alapján az L1 norma szerinti minimalizálással kapott eredmény minősült jobbnak.

Vass, P.: Estimation of subsurface temperature conditions in the vicinity of Demjén

The research for the subsurface temperature conditions of smaller areas is very important from the point of view of utilizing local sources of geothermal energy. In this study the data processing methods of bottomhole temperature values measured in boreholes drilled for exploration and production of oil in the vicinity of Demjén and the joint evaluation of the corrected temperature data are presented. The feasibility of the Horner method used for temperature data processing was investigated and the result was positive. A model which takes into account both the conductive and the convective heat flows was selected for the estimation of local subsurface temperature as a function of depth. The optimal values of the model parameters were determined by minimizing the L1 and the L2 norms of residuals, respectively. The verification of the results was based on static bottomhole temperature data coming from additional boreholes and the relevant literature. The geothermal gradient functions were also derived from the estimated subsurface temperature functions. Based on the comparative investigations, it can be stated that the temperature function gained by minimizing the L1 norm of residuals is regarded as a better estimation.

Beérkezett: 2023. augusztus 7.; *elfogadva:* 2023. szeptember 20.

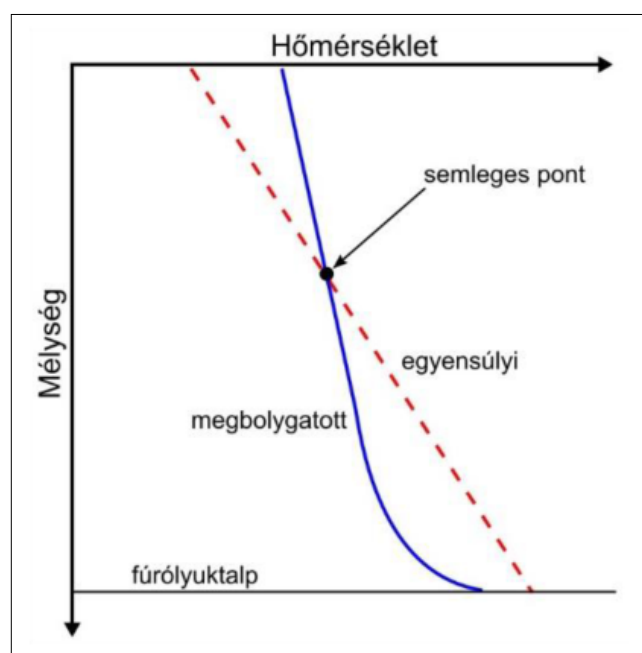
Bevezetés

A felszín alatti kőzetformációk hőmérsékletének, illetve az egyensúlyi hőmérséklet adott területre érvényes mélységfüggésének lehető legpontosabb ismerete több szempontból is nagy jelentőséggel bír. A fúrások és a fluidumtermelő kutak kiépítésének tervezése, valamint a mélyfúrású geofizikai szelvények kiértékelése során alkalmazott számítási módszerek egy része bemeneti paraméter formájában igényli a hőmérsékletet. A geotermikus energia hasznosítására irányuló tervezési munka szempontjából pedig az egyik legfontosabb információt jelenti a helyi hőmérséklet–mélység összefüggés.

A fúrólukokban végzett hőmérsékletméréseket leggyakrabban olyan körülmények között hajtják végre, amelyek csak többé-kevésbé közelítik meg a hőmérsékleti egyensúly állapotát. A nyitott fúrólukban az iszapöblítés hatása, annak leállításra és a fúrószerszám eltávolítása után még nagyon sokáig befolyásolja a mért értékeket. A fúróluktalpon vagy annak közelében mért hőmérséklet (Bottomhole Temperature, BHT) kisebbnek adódik, mint a környezetével hőmérsékleti egyensúlyban álló ugyanazon mélységpont hőmérséklete (Bottomhole Static Temperature, BHST). Ez a különbség akár 10–40 °C-ot is jelenthet (Fertl et al. 1986). A termelési geofizikai mérések során sem mérhető az egyensúlyi (nyugalmi)

hőmérséklet, mivel a kútban áramló fluidum a kút lezárása után szintén nagyon sokáig okoz az egyensúlyhoz képest jelentősen eltérő hőmérséklet-eloszlást. A lokális hőmérsékleti térben keletkező perturbáció mértékének elhanyagolhatóvá válása gyakran nagyon hosszú várakozási időt igényel (néhány nap is lehet mélyebb fúrások esetén), és ez a várakozási idő a legtöbb esetben nem illeszthető be az elsődlegesen nem geotermikus hasznosítás céljából fúrt kutak mérési programjába.

A szénhidrogén-kutató fúrások nyitott lyukban végzett hőmérsékletmérésének rendszeresített formája a fúrási geofizikai szelvényezésekhez kapcsolódik. A szelvényezési programban előírt mérések meghatározott csoportját mindig egy mélységszakasz lefúrása, a lyuk kiöblítése és a fúrószerszám kiépítése után hajtják végre. Ekkor a fúróluk még nincs termikus egyensúlyi állapotban, ugyanis az iszapöblítés során cirkuláltatott iszap hűti a fúróluk alsó részét, a felszínre visszatérő, felmelegedett iszap pedig fűti a fúróluk felső részét. Ennek eredményeképpen az 1. ábrán látható hőmérséklet-eloszlás alakul ki egy homogénnek tekinthető felszín alatti közegben. Az iszapöblítés hatása az öblítési időn kívül függ még az öblítés sebességétől, az iszap típusától és a talpmélységtől is.

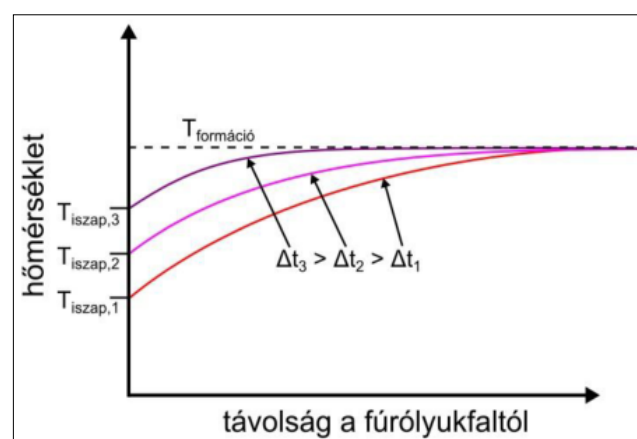


1. ábra Az egyensúlyi, valamint az iszapöblítés hatására megváltozott hőmérséklet-eloszlás egy homogénnek tekinthető felszín alatti közegben (Serra, Serra 2004 alapján)

Figure 1 Temperature profiles for thermal equilibrium (red dashed line) and for disturbed condition produced by drilling mud circulation (blue solid curve) in a homogeneous subsurface medium (based on Serra, Serra 2004)

A fúrási geofizikai szelvényezés során alkalmazott szondavonatok mindegyike képes mérni a művelet során beálló legnagyobb hőmérséklet értékét, amely tulajdonképpen a szondavonaton által elért legnagyobb mélységre vonatkozik, hiszen a hőmérséklet-eloszlás még megboly-

gatott állapotában is mélységgel növekvő hőmérsékleti értékeket eredményez. Mivel a mérendő mélységintervallum legalsó pontja általában a lyuktalp, a mért maximum-hőmérséklet leggyakrabban ennek a pontnak a termikus állapotát jellemzi a szondavonaton lyuktalpra érkezésének időpontjában. Ez az időpont fontos adat, és az iszapöblítés leállításától eltelt idő formájában kell rögzíteni a mért maximum-hőmérsékleti értékkel együtt. Amikor összehasonlítjuk az ugyanazon fúrólukszakaszban egymás után következő, más-más szondavonatokkal végzett szelvényezési fuvarokból (logging trip) származó idő-hőmérséklet adatpárokat, általában azt tapasztaljuk, hogy a későbbi időpontokban ugyanazon mélységpontra vonatkozó hőmérsékletértékek egyre nagyobbak. Ez a növekedés a hőmérsékleti egyensúly állapota felé törekvő rendszer természetes válasza a zavart okozó hatás megszűnésére. A folyamat nem lineárisan megy végbe az idő függvényében. A változás sebessége kezdetben nagyobb, és fokozatosan csökken az idővel. Az iszapöblítés hőmérsékletet befolyásoló hatása a fúrólukfaltól számított távolság függvényében szintén csökken, és az öblítés befejezése után eltelt idő növekedésével egyre szűkebb az a környezet, amelyen belül a nyugalmi hőmérséklethez képest el nem hanyagolható az eltérés. A távolság és az



2. ábra A hőmérséklet sugárirányú eloszlása ugyanabban a mélységben, az öblítés befejezése után eltelt különböző időpontokban (Zaki 1994 alapján)

Figure 2 Temporal change in the radial distribution of temperature at a fixed depth level after the mud circulation was stopped (based on Zaki 1994)

idő előzőekben ismertetett hatását mutatja be a 2. ábra. Az ábrán szereplő mennyiségek: Δt_i az öblítés befejezésétől eltelt i -edik idő, $T_{\text{izsap},i}$ a fúróiszap hőmérséklete az öblítés befejezésétől eltelt i -edik időben, $T_{\text{formáció}}$ a kőzetformáció hőmérséklete termikus egyensúlyi állapotban. A hővezetés differenciálegyenletének megoldása alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az iszapöblítés hatása a kút belső terének határától számított 10 láb (~3 m) távolságon túl már általában kicsi (Edwardson et al. 1962).

Egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározása Horner-módszerrel

Timko és Fertl (Timko, Fertl 1972) dolgozott ki egy módszert, amely tulajdonképpen a folyadéktermelő kutak vizsgálata során alkalmazott, zárás utáni nyomásemelkedés-mérések értelmezésének Horner módszerén alapul (Horner 1951). A vizsgálat lényege a következő: meghatározott termelési idő után a kutat lezárják, majd a termelőréteg mélységébe beépített műszer segítségével mérik és rögzítik a nyomás értékének növekedését az idő függvényében. Elegendően hosszú idő után a nyomás állandósulna, és felvinné a tárolóréteg statikus (egyensúlyi) nyomásának értékét, amely egy fontos rezervoármechanikai paraméter. Természetesen a vizsgálat számára célszerűen biztosított időtartam általában nem elég hosszú az egyensúlyi állapot eléréséhez. Ennek megfelelően a rendelkezésre álló idő–nyomás adatpárok alapján kell becsülni a kívánt paraméter értékét.

Horner módszerének alapját a meghatározott feltételek kikötése mellett érvényes diffúzitásegyenlet képezi. A mért nyomást (P_w) lineáris skálán, a zárástól eltelt idő (Δt) és a zárást megelőző termeltetési idő (t_0) összegének a zárástól eltelt időre vonatkoztatott hányadosát pedig logaritmus skálán értelmezve, a Horner-grafikonon (Horner plot) ábrázolt adatpárok egy bizonyos tartományba (a kút lezárásától számított nem túl közeli és nem túl távoli idők tartományáról van szó) eső pontjaira egy egyenes illeszthető. Az egyenest $\Delta t = \infty$, azaz $(t_0 + \Delta t)/\Delta t = 1$ értékre extrapolálva a logaritmus skálán, a tárolóréteg statikus nyomásának becsült értéke (P_{wst}) leolvasható a nyomás tengely lineáris skáláján.

A már említett szerzőpáros által javasolt módszer esetében a zárás után mért nyomás az öblítés befejezése után mért talphőmérsékletnek (T_{BHT}), a termeltetési idő a fúrás befejezését követő öblítési időnek (t_k), a zárástól eltelt idő pedig az öblítés befejezésétől eltelt időnek (Δt) felel meg. A Horner-grafikon talphőmérsékletekre alkalmazott változatánál az ordinátatengely képviseli lineáris skálával a talphőmérsékletet, és az abszcisszatengely a $(t_k + \Delta t)/\Delta t$ kifejezésnek megfelelően van logaritmus skálázva. A mérési adatokra illesztett egyenes segítségével extrapolált egyensúlyi talphőmérsékletet (T_{BHST}) az ordinátán kimetszett érték adja meg. A módszert korábban már ismertette, és a felszín alatti tér egyensúlyi hőmérséklet eloszlását meghatározó problémával is foglalkozott Boda és Zilahi-Sebess (Boda, Zilahi-Sebess 2013).

A két módszer között jelentős különbség mutatkozik az elemzésbe bevonható adatpárok száma tekintetében. Míg a nyomásmérésnél lényegében az adatbőség esete áll fenn, a mért talphőmérséklet-értékek száma attól függ, hogy hány fuvarban hajtották végre a fúrás geofizikai szelvényezést ugyanabban a fúrólukszakaszban, ugyanazon szelvényezési munkafolyamat (job) keretein belül. Ez a szám az adott mélységtartományra vonatkozó mérési programtól függ, de az öt vagy annál nagyobb érték már figyelemre méltónak tekinthető. Ugyanakkor a pontpárookra illesztett

egyenes megbízhatóságának alsó korlátja a maximum-hőmérséklet három független mérését igényli. Ebből következik, hogy sajnos nem minden fúrólukszakasz esetében alkalmazható a módszer, valamint az idő- és hőmérsékletadatokat pontosságára vonatkozó érzékenységgel is számolni kell.

Jóllehet a módszer formailag kivitelezhető, és az esetek jelentős részében elfogadható eredmények származtathatók az alkalmazásával, az elméleti háttérrel tekintve nincs megalapozva. Ugyanis a zárás után bekövetkező nyomásemelkedés és az öblítés befejezése után meginduló hőmérséklet-emelkedés folyamatai eltérnek egymástól.

Dowdle és Cobb (Dowdle, Cobb 1975) vizsgálták, hogy milyen feltételek mellett használható a Horner-módszer az egyensúlyi talphőmérséklet becslésére. A folyadéktermelő kutak rétegnomására és a lyuktalp hőmérsékletére felírható diffúziós egyenletek formailag azonos szerkezetűek. Hengerszimmetrikus esetben mindkettő a vizsgált mennyiségnek a sugárirányú távolság és az idő szerinti viselkedése közötti összefüggést magában foglaló differenciálegyenlet a tárolóréteg, ill. a lyuktalp szintjére vonatkozóan. Általános alakja a következőképpen írható fel:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad (1)$$

ahol $u(r,t)$ az r sugárirányú távolság és t idő függvényeként értelmezett nyomás (P) vagy hőmérséklet (T), az a konstans általános elnevezése diffúziós tényező. A nyomás esetében $a = k/(\phi\mu c)$, ahol k a réteg permeabilitása, ϕ a porozitása, μ a folyadék viszkozitása és c a kőzet-folyadék rendszer összenyomhatósága (kompresszibilitása). A hőmérsékletre felírható differenciálegyenlet, a hővezetési egyenlet, diffúziós tényezője (hőmérséklet-vezetési tényező) $a = k_h/(c_f\rho)$, ahol k_h a hővezető képesség, c_f a fajlagos hőkapacitás (fajhő) és ρ a halmazsűrűség.

Az egyenletek érvényességi kereteit természetesen a modellekben rögzített feltételek teljesülése határozza meg. A megoldáshoz szükséges kezdeti feltételek és a kút terén kívüli lecsapolási területre vonatkozó (külső) határfeltételek megfeleltethetők egymásnak. Az eltérés a kút terén belülre vonatkozó határfeltételnél jelentkezik, ugyanis a nyomás esetében az állandó hozammal termeltetett kút belső terének sugaránál a nyomásgradiense konstans, és a lezáráskor nullára csökken az értéke. A talphőmérséklet az állandó sebességgel végzett öblítés során az iszap hőmérsékletének feleltethető meg, amely gyakorlatilag konstansnak tekinthető. Az öblítés befejezésének hatására azonban a hőmérséklet gradiense nem lesz zérus, hanem az értéke függ az időtől (fokozatosan, de nem lineárisan csökken, amíg be nem áll a termikus egyensúlyi állapot). A zárás utáni folyamatok eltérése miatt elméletileg a nyomásra vonatkozó megoldást, amelyen a Horner-féle grafikon alapszik, nem lehetne alkalmazni az egyensúlyi talphőmérséklet becsléséhez.

Ugyanakkor Dowdle és Cobb felhívják a figyelmet arra is, hogy a hőmérsékleti gradiensnek a változása nagyon las-

sú, ezért rövid öblítési idő (t_k) esetén a gradiens értéke állandónak vehető, és a Horner-féle grafikonra alapozott talphőmérséklet becslésének módszere megbízható eredményt biztosít. Lényegében a módszer az öblítési időtartamtól függő mértékben alábecsüli a tényleges egyensúlyi talphőmérsékletet. Ennek mértékére vonatkozóan két példát említenek. Egy tipikusnak mondható, 2,4 órás öblítési időnél 2%-kal kisebb a becsült érték, míg egy nagyon hosszú, 50 órás öblítési időnél már 11%-os eltérésre számíthatunk. Az öblítési időnek tehát fontos szerepe van a módszer esetében.

Az (1) egyenletnek a kútlezárás után bekövetkező nyomásemelkedésre vonatkozó megoldásából származtatott összefüggésében szereplő mennyiségek egy részét az egyensúlyi talphőmérséklet (T_{BHST}) meghatározásához szükséges mennyiségekkel helyettesítve, az alábbi formulához jutunk:

$$T_{\text{BHST}} = T_{\text{BHT}} - C \log\left(\frac{t_k + \Delta t}{\Delta t}\right), \quad (2)$$

ahol T_{BHT} a fúróluktalp hőmérséklete az öblítés befejezése után Δt idővel, t_k az öblítés időtartama és C a hőmérsékletvezetési tényező reciproka. Utóbbi ismeretére a Horner-módszer alkalmazásánál nincs szükség, mert a mérési adatok segítségével a feladat megoldása lineáris regresszióra vezethető vissza.

A módszer végrehajtásának és az öblítési idő hatásának bemutatása érdekében egy demjéni fúrás geofizikai szelvényezési során mért talphőmérséklet-adatokat használtam fel. A ferdeségi adatok korrekcióját elvégezve, a fúrás felszíntől számított függőleges mélysége 926 m-nek adódott. A szelvényezési műveletek megnevezéseit, az öblítés befejezése óta eltelt időket és a mért maximum-hőmérsékleteket az 1. táblázat tartalmazza. Ennél a fúrásnál az a ritka eset áll fenn, hogy „nagyinak” mondható független hőmérsékleti adatszám (7) vonható be a feldolgozásba. A mért értékek pontosságát nem ismerjük ugyan, de min-

denképpen fel kell tételezni valamilyen mértékű véletlen hibát. Az öblítés befejezésétől eltelt idő növekedése növekvő talphőmérséklet-értékekkel párosul, és ez megfelel a termikus egyensúly felé törekvéssel szemben elvárható változásnak. A trendet az utolsó adat megtöri, ugyanis a két utolsó mérés között eltelt három és fél óra alatt nem mutatkozik hőmérséklet-változás. Ez akár arra is utalhat, hogy a lyuktalp már beállt a termikus egyensúly állapotába, vagy ahhoz közeli állapotban van, de a hibás mérés vagy hibás adatrögzítés eseteivel is számolnunk kell.

Az öblítés időtartamára vonatkozó közvetlen adatot nem találtam a kútkönyvben. Míg az öblítés befejezése és a szondavonat talpra érkezése között eltelt idő, valamint a szelvényezés során mért maximum-hőmérséklet számára a nyomtatott fúrási geofizikai szelvény fejlécén külön mezők vannak biztosítva a fontosabb adatok számára fenntartott táblázatban, viszont furcsa módon az öblítési időtartam rögzítésére nincs adatmező. Ennek eredményeképpen a gyakran egyébként is hiányosan kitöltött fejlécen esélyünk sincs megtalálni ezt a nagyon fontos adatot. Csak a kútkönyv egyéb dokumentumainak alapos áttekintésével remélhetünk olyan információkra bukkanni, amelyek révén következtethetünk az öblítés időtartamára. Mindezekre azért tartom fontosnak felhívni a figyelmet, mert a hiányos vagy hanyag, esetleg hibás, rosszul megtervezett dokumentáció nagyon fontos adatok és információ elvesztéséhez vezet. Ez pedig megnehezíti, bizonytalanná vagy akár lehetetlenné is teszi bizonyos feldolgozási, kiértékelési és kutatási munkák elvégzését.

A példaként választott esetben a földtani napi jelentések alapján ismert, hogy melyik napon fúrták le a lyuk utolsó 15 m-es szakaszát. Az öblítés és a fúrószerszám kiépítése ezután következett. A fúrási geofizikai szelvényezési műveletek még ugyanezen a napon megkezdődtek. Az utolsó szelvényezéshez kapcsolódó talpra érkezés, amint az 1. táblázatban látható, több mint 22 órával az öblítés befejezése után történt, de még szintén azon a napon. Ennek

1. táblázat Egy demjéni fúrás alsó szakaszán végrehajtott fúrási geofizikai szelvényezések megnevezései, az öblítés befejezése és a szondavonat talpra érkezése között eltelt idők, valamint a mért maximum-hőmérsékletek összefoglalása

Table 1 Tool combinations of successive well logging trips in the first, elapsed times between the end of mud circulation and BHT measurements in the second, and the measured BHT values in the third column for a borehole drilled at Demjén

Szelvényezési művelet neve	Az öblítés befejezése óta eltelt idő	A mért maximum-hőmérséklet
Optimális laterolog, természetes potenciálszelvényezés (OL – SP)	5 h 20 min = 320 min	53 °C
Pszedo-laterolog hosszú, természetes potenciálszelvényezés (PLH – SP)	7 h = 420 min	55 °C
Mikrolaterolog, természetes potenciálszelvényezés (MLL – SP9)	9 h 10 min = 550 min	56,5 °C
Mikrolog, lyukátmérő-szelvényezés (ML – DL)	12 h 30 min = 750 min	59 °C
Sűrűség, lyukátmérő-szelvényezés (DEL – DL)	15 h = 900 min	61,5 °C
Akusztikus intervallumfutási időszelvényezés (ATL)	18 h 50 min = 1130 min	64 °C
Mészköre hitelesített neutron porozitás, természetes-gammasugárzás-szelvényezés (FINLM – TG)	22 h 20 min = 1340 min	64 °C

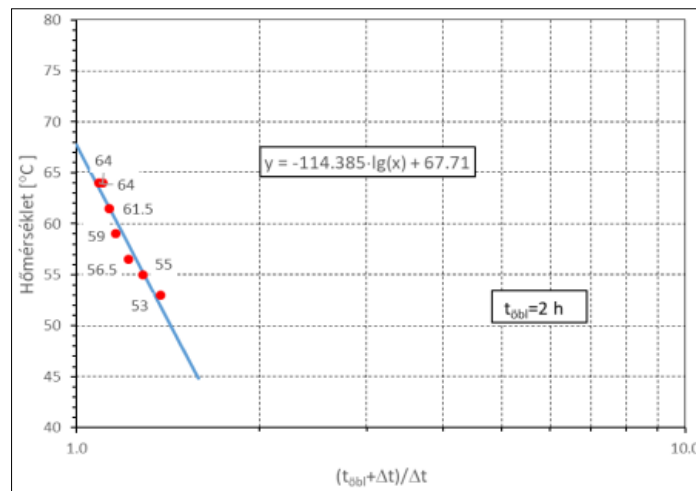
2. táblázat | Az öblítés óta eltelt idők (Δt_i), a mért maximum-hőmérsékletek ($T_{max,i}$) és a Horner-grafikon abszcisszatengelyéhez tartozó kifejezés számított értékei kétórás öblítési idő ($t_{öbl}$) feltételezésével

Table 2 | Times elapsed from the end of mud circulation (Δt_i), the measured BHT values ($T_{max,i}$) and the corresponding abscissa values of the Horner plot assuming two hour mud circulation time ($t_{öbl}$)

Δt_i [min]	$T_{max,i}$ [°C]	$(t_{öbl} + \Delta t_i)/\Delta t_i$
320	53	1,3750
420	55	1,2857
550	56,5	1,2182
750	59	1,1600
900	61,5	1,1333
1130	64	1,1062
1340	64	1,0896

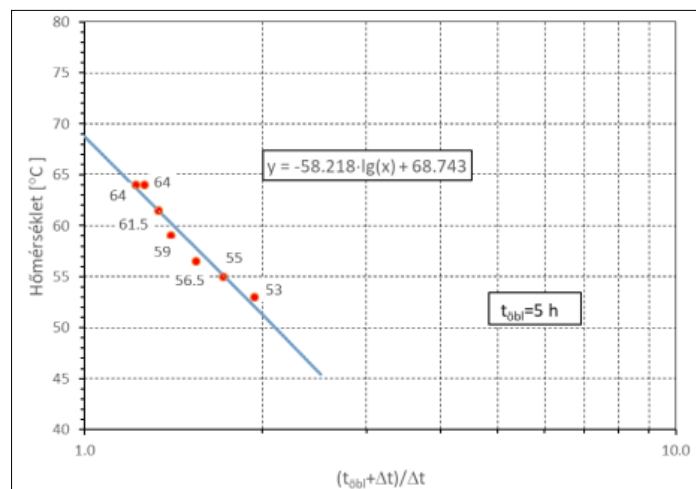
alapján arra következtethetünk, hogy az öblítés nem tartott sokáig. Ha elfogadjuk a tevékenységekkel kapcsolatban rögzített adatokat, akkor legfeljebb kétórás öblítéssel kell számolnunk. Ez az időtartam elfogadhatónak tekinthető, hiszen az indokolatlanul elnyújtott öblítési folyamat gazdaságossági szempontból egyáltalán nem kívánatos.

Az öblítési időtartam hatásának vizsgálata érdekében négy különböző érték választása mellett alkalmaztam a Horner-módszert. Az öblítési idők növekvő sorrendben 2, 5, 10 és 15 óra. A kétórás öblítési időhöz tartozó adatokat a 2. táblázat foglalja össze. A (2) egyenletben alkalmazott jelölések közül T_{BHT} helyett T_{max} , t_k helyett pedig $t_{öbl}$ jelenik meg a fejlécben. Az adatok alapján készült Horner-grafikont a 3. ábra mutatja be, melyen a piros körök jelzik a táblázat megfelelő értékpárjai által meghatározott pontok helyzetét. A legkisebb négyzetek elvének alkalmazásával illesztett lineáris összefüggést a kék egyenes szemlélteti. Az egyenes paramétereit tartalmazó egyenlet a



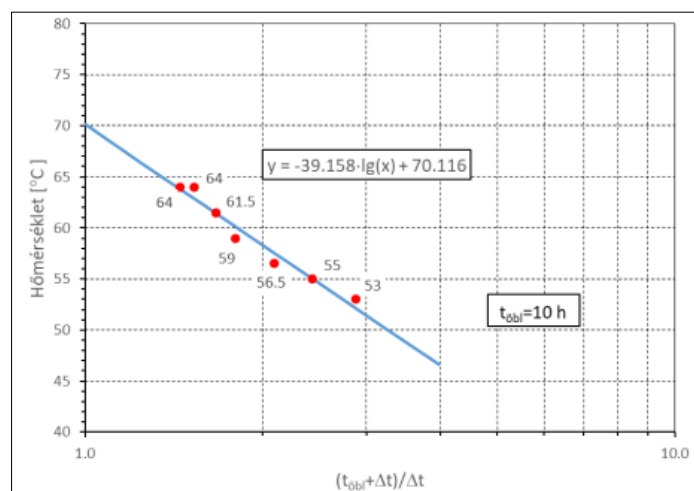
3. ábra | A kétórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmus skála 1-es értékére extrapolált egyszüli lyuktalpi hőmérséklet, $T_{BHST} = 67,7\text{ °C}$

Figure 3 | Horner plot for two hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{BHST} = 67.7\text{ °C}$



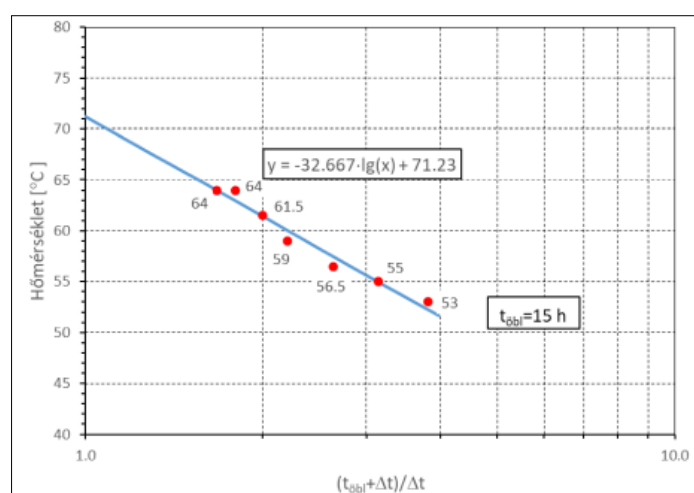
4. ábra | Az ötórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmus skála 1-es értékére extrapolált egyszüli lyuktalpi hőmérséklet, $T_{BHST} = 68,7\text{ °C}$

Figure 4 | Horner plot for five hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{BHST} = 68.7\text{ °C}$



5. ábra | A tízórás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmusos skála 1-es értékére extrapolált egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet, $T_{\text{BHST}} = 70,1 \text{ °C}$

Figure 5 | Horner plot for ten hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{\text{BHST}} = 70.1 \text{ °C}$



6. ábra | A tizenöt órás öblítési idő alkalmazásával készített Horner-grafikon. A logaritmusos skála 1-es értékére extrapolált egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet, $T_{\text{BHST}} = 71,2 \text{ °C}$

Figure 6 | Horner plot for fifteen hour mud circulation time. The static bottomhole temperature extrapolated by the fitted line is $T_{\text{BHST}} = 71.2 \text{ °C}$

grafikon egyik szövegdobozában látható. A két konstans közül a második a lényeges, amely az egyenes ordinátametszetét adja meg. Ez tulajdonképpen az öblítés után eltelt végtelen hosszú időre extrapolált fúróllyuktal-phőmérséklet, azaz az egyensúlyi lyuktal-phőmérséklet becsült értéke ($T_{\text{BHST}} = 67,7 \text{ °C}$). Az 5, 10 és 15 órás öblítési időkkel készített Horner-grafikonokat és a becsült egyensúlyi talphőmérsékleteket sorrendben a 4–6. ábrák mutatják be.

A különböző öblítési idők esetében kapott egyensúlyi lyuktal-phőmérsékleteket a 3. táblázat foglalja össze. Az értékek mindegyike nagyobb, mint a legutoljára végzett fúrás geofizikai szelvényezés során mért maximum-hőmérséklet ($\Delta t_7 = 22 \text{ h } 20 \text{ min}$, $T_{\text{max},7} = 64 \text{ °C}$). Ez arra utal, hogy az öblítés befejezése után nagyjából egy nap elteltével a fúróllyuktal még nem érte el a hőmérsékleti egyensúly állapotát. A hosszabb öblítési idő feltételezése mellett nagyobb egyensúlyi lyuktal-phőmérsékletet kapunk. Ez érthető, hiszen a hosszabb öblítési idő nagyobb

mértékű hőmérséklet-különbséget eredményez az öblítés leállításakor érvényes talphőmérséklet és az egyensúlyi talphőmérséklet között. Ha összehasonlítjuk az értékeket, akkor azt tapasztaljuk, hogy az öblítési idők viszonylag széles tartományában (13 óra) a becsült egyensúlyi talphőmérséklet nem mutat nagy változást ($3,5 \text{ °C}$). Ugyanakkor a korábban ismertetett tapasztalatokat figyelembe véve, nem szabad elfelejtenünk arról, hogy a becsült értékek megbízhatósága a tényleges öblítési idő növekedésével romlik. Ebben az esetben a dokumentált adatok alapján rövid öblítési időre következtethetünk, s emiatt a táblázat első két sorának adataira érdemes koncentrálni. A két talphőmérséklet-érték között mindössze 1 °C különbség van. A becsült értékek becsült szórásai, amelyek a lineáris regresszióval meghatározott paraméter bizonytalanságát jellemzik, tizedre kerekítve megegyeznek, és a nagyságot tekintve kis értéket képviselnek.

Az R^2 (determinációs együttható) számításával jellemezhető az illeszkedés jósága. Látható, hogy nincsenek jelen-

3. táblázat A különböző öblítési idők alkalmazásával kapott egyensúlyi lyuktalphőmérsékletek, a becsült hibákkal és a lineáris regresszióval kapott modell „jószágát” jellemző statisztikai mennyiségek értékeivel
Table 3 Estimated static bottomhole temperatures with the estimated error (column 2) in the function of the mud circulation time (column 1). R squared vales (column 3) and relative corrected standard deviations of the residuals (column 4) characterizing the goodness of fit

Öblítési idő [h]	Becsült egyensúlyi lyuktalp-hőmérséklet [°C]	R^2	Relatív korrigált reziduális szórás
2	67,7 ± 1,1	0,94	0,020
5	68,7 ± 1,1	0,95	0,018
10	70,1 ± 1,1	0,96	0,016
15	71,2 ± 1,1	0,96	0,015

tős különbségek közöttük. Az 1-hez közeli R^2 -értékek arra utalnak, hogy a független változó teljes varianciájának a regresszióval magyarázott hányada nagy (>94%), és ez jó illeszkedést jelent a modellhez (Köves, Párniczky 1975). A relatív korrigált reziduális szórás, amely a függőváltozó mért értékeinek átlagára normált korrigált reziduális szórás, tulajdonképpen a függőváltozó nagyságrendjétől függetlenül torzítatlan becslése a lineáris összefüggésből számított becslés szórásának. Minél kisebb az értéke, annál pontosabban lehet megbecsülni a függőváltozó értékeit a lineáris modellel a független változó értékeiből (Köves, Párniczky 1975). A 3. táblázat negyedik oszlopát vizsgálva egymáshoz közeli kis értékeket láthatunk. Statisztikai értelemben kijelenthető, hogy a lineáris modell választása mind a négy esetben indokolt.

A Magyarország mélyfúrású kútjainak katasztere XXXIII. kötetében található K-11-es kataszteri számú demjéni hévízkutat 2008-ban fúrták le. A kút légvonalban számított távolsága a példában szereplő fúrástól 3166,5 m. Mélysége 950 m, ami nagyon közel van a fúrás 926 m-es függőleges mélységéhez. Ennek a kútnak a kataszterben rögzített lyuktalpi hőmérséklete 68,3 °C. Az érték nagyon jól illeszkedik a rövidebb öblítési idővel számított egyensúlyi talphőmérsékletek értékeihez, és ez megerősíti a Horner-módszer alkalmazhatóságába vetett bizalmat a demjéni terület esetében. További megerősítést jelentenek a hazai geotermikus viszonyok jellemzése érdekében különböző mélységekre készített hőmérsékleteloszlás-térképek (Lenkey et al. 2021). Az Egerhez közeli Demjénben az átlagoshoz képest nagyobb hőmérséklet jelentkezik a felszín alatti 500 és 1000 m-es szinteken. Az 500 m-es mélységben 40–50 °C-os, az 1000 m-es mélységre becsült térkép szerint pedig 60–70 °C-os tartományba eső hőmérsékletértékekre lehet számítani ezen a területen. Az országos átlagok az említett mélységekben 40 °C és 60 °C (Lenkey et al. 2021).

Egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározása a hőmérséklet stabilizálódását leíró paraméteres görbe illesztésén alapuló módszerrel

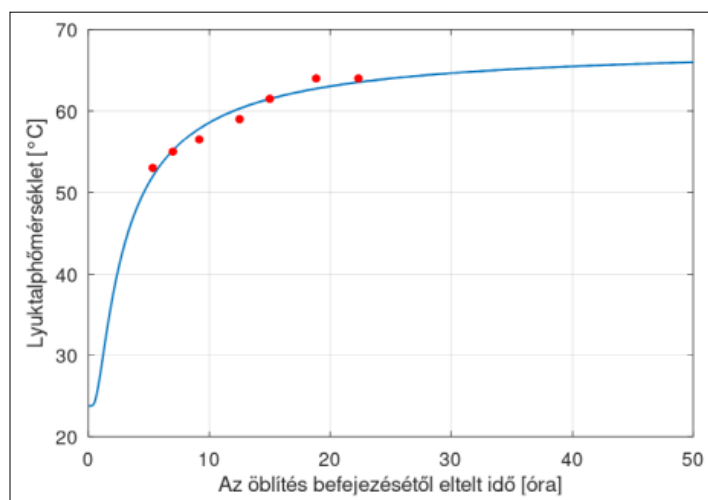
Az egyensúlyi lyuktalphőmérséklet meghatározásának egy másik megközelítési módját Middleton javasolta (Middleton 1979). Az általa alkalmazott modellben, amely lyuktalp-

hőmérséklet egyensúly felé törekvésének folyamatát igyekszik leírni, azt feltételezi, hogy az öblítés leállításakor ($t = 0$) a fúróluk alsó néhány méterében egységesen fennálló hőmérséklet az iszap (T_m) hőmérsékletének felel meg. Ugyanebben az intervallumban a fúrólukat körülvevő közetformáció a hőmérsékleti egyensúly állapotában van (T_f). Tehát a folyamat kezdetén a sugárirányú hőmérséklet-eloszlásban ugrásszerű változást feltételez a fúrólukfalnál. Az öblítés leállítása után a fúrólukba hő áramlik be minden irányból azonos hőáramsűrűséggel. A hőátadásban csak a konduktív folyamat van figyelembe véve, és a fúrólukon belüli közeg hőmérséklet-vezetési tényezője (a) megegyezik a külső közegével.

A hővezetés differenciálegyenletének a modellben felállított feltételek figyelembevételével mellett kapott megoldásával olyan összefüggést származtatott, amellyel ki lehet fejezni a fúróluk alsó szakaszában az iszap hőmérsékletének változását az idő függvényében. Ezáltal az ismeretlen paraméterek (T_f , T_m , a) különböző kombinációjára előállíthatók a lyuktalphőmérséklet stabilizálódásának görbéi. A görbék aszimptotái, a $t = \infty$ -hez tartozó T_f egyensúlyi hőmérsékletnek felelnek meg. A gyakorlati alkalmazáshoz legalább három különböző időpontban mért talphőmérsékleti adatra van szükség, hasonlóan a Horner-módszerhez. Az öblítési idő ismeretére azonban nincsen szükség. A feladat megoldását az ismeretlen paraméterek értékeinek olyan megválasztása jelenti, amelyekkel előállított hőmérséklet-stabilizálódási görbe a legjobban illeszkedik az öblítés leállításától számított idők és a mért lyuktalphőmérsékletek által meghatározott pontok rendszerére.

A Middleton által kidolgozott modellben a fúróluk keresztmetszete négyzet alakú volt, és a hőmérséklet stabilizálódására kapott megoldás nem felelt meg az előzetesen megszabott feltételeknek. Erre Leblanc, Pascoe és Jones mutatott rá (Leblanc et al. 1981). A javításon kívül megoldották a problémát körkeresztmetszetű fúróluk esetére is, amely jobban illeszkedik a valóságos körülményekhez. A lyuktalp hőmérsékletének időbeli változását leíró egyenlet ebben a modellben:

$$T_{\text{BHT}}(t) = T_f + \Delta T \left[\exp\left\{-r^2/(4at)\right\} - 1 \right], \quad (3)$$



7. ábra | A nemlineáris hőmérséklet-emelkedési modellnek a mérési adatokra legjobban illeszkedő típusgörbéje a hőmérséklet-vezetési tényező értékének $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ -re történő választása esetén

Figure 7 | Best fitting non-linear temperature build-up curve for the measured data with the assumption of thermal diffusivity value of $0.27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

ahol t az öblítés leállításától eltelt idő, $\Delta T = (T_f - T_m)$ az egyensúlyi hőmérséklet, valamint az öblítés befejezésekor fennálló lyuktalpi hőmérséklet különbsége, r a fúróluk sugara és a a közeg hőmérséklet-vezetési tényezője. A görbeillesztés problémája egyszerűsíthető, ha a kőzetformáció hőmérséklet-vezetési tényezőjére vonatkozó megfontolások, ill. apriori ismeretek alapján, rögzítjük ennek a paraméternek az értékét, vagy több, de véges számú értéket vonunk be a feldolgozásba. Ilyen módon a regressziós feladat lineárisává válik. Az egyenes meredekségét befolyásoló ismeretlen paraméter Δt , az ordinátametszet értéke pedig a becsült egyensúlyi hőmérséklet (T_f) (Leblanc et al. 1982).

A hőmérséklet-vezetési tényező értékének megválasztásánál érdemes figyelembe venni az alábbi megfontolást. A vízre vonatkozó érték $0,144 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, és ez nagyjából a tizede a törmelékes üledékes kőzetekre vonatkozó átlagos értéknek. A fúrólukban vízbázisú iszapot, a közvetlen környezetében pedig törmelékes üledékes kőzetet feltételezve, az érték valahol a kettő közötti tartományban van. Félíg vízből, félíg kőzetből álló keverékre $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ értéket származtattak (Leblanc et al. 1981). A helyi adottságoktól (iszap, kőzet) függően érdemes lehet azonban megvizsgálni más értékeket is a $0,2-0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ tartományban (Leblanc et al. 1982).

A görbeillesztéses módszer vizsgálatának érdekében a már korábban említett fúrás talphőmérséklet- és időadatait használtam fel (1. táblázat). Az alsó szakaszra érvényes lyukátmérő $7 \frac{5}{8}$ " volt. A hőmérséklet-vezetési tényező értékét $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ -ra állítottam be. A legkisebb négyzetek elve alapján végrehajtott lineáris regresszió eredményeként becsült egyensúlyi hőmérséklet tizedesre kerekítve $T_f = 68,1 \text{ °C}$ -nak adódott. Ez nagyon közel áll az előzőekben bemutatott Horner-módszerrel származtatott és az adatbázisból vett értékekhez. A pontok és az illesztett görbe viszonyát a 7. ábra mutatja be.

A görbeillesztést elvégeztem a hőmérséklet-vezetési tényező két másik értéke mellett is, és a kapott eredményeket a 4. táblázatban foglaltam össze. Mindhárom esetben közeli értékek adódtak az egyensúlyi talphőmérsékletre, és a becslés tizedesre kerekített becsült szórásai is meggyeznek. A ΔT -nél viszont nagyobb eltérések jelentkeztek, és a becsült értékek bizonytalansága is nagyobb. Ebből arra lehet következtetni, hogy az öblítés leállításának pillanatakor fennálló iszaphőmérséklet becslése sokkal érzékenyebb a hőmérséklet-vezetési tényező értékének megváltozására. Az R^2 -értékek jó illeszkedést jeleznek a hőmérséklet-vezetési tényező rögzítése révén lineárisává alakított modellhez. A relatív korrigált reziduális szórások értékei

4. táblázat | A görbeillesztéses módszerrel becsült paraméter értékek a becsült szórásaikkal és a regresszióval kapott modell „jóóságát” jellemző statisztikai mennyiségek értékeivel

Table 4 | Estimated parameters (columns 2 and 3) in the function of thermal diffusivity (column 1) gained by temperature build-up curve fitting method. R squared values (column 4) and relative corrected standard deviation of the residuals (column 5) characterizing the goodness of fit

a [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]	$T_f = T_{\text{BHST}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	R^2	Relatív korrigált reziduális szórás [$^{\circ}\text{C}$]
0,20	$68,6 \pm 1,1$	$36,1 \pm 3,7$	0,95	0,018
0,27	$68,1 \pm 1,1$	$44,2 \pm 4,8$	0,94	0,019
0,30	$67,9 \pm 1,1$	$47,9 \pm 5,3$	0,94	0,019

pedig kedvezően kis értékűek. A hőmérséklet-vezetési tényező értékének csökkentése kicsit javított mind az R^2 , mind a relatív korrigált reziduális szórás értékein. A tényező kisebb értékeinek a vizsgálata már nem lenne indokolt, hiszen a tiszta vízre érvényes értékhez kerülnénk közelebb, és ennek a feltételezése már a valóságtól nagyon távol állna.

A felszín alatti hőmérséklet mélység-függésének becslése a demjéni területre konvektív hőáramlás figyelembevételével

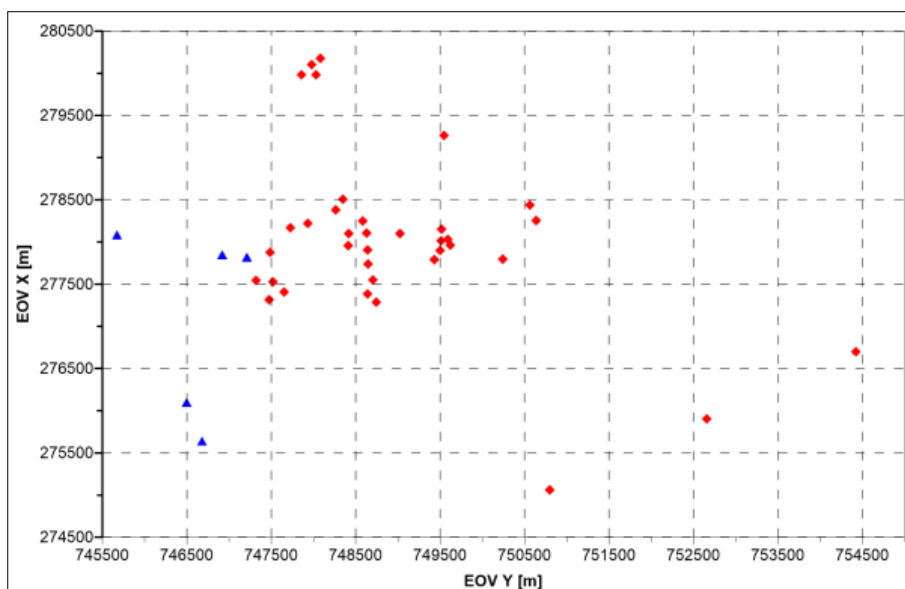
A mintaadatrendszer feldolgozásával becsült és más forrásokból származó információk által is megerősített eredmény alapján a továbblépés kézenfekvő iránya a demjéni területen mélyült további fúrások talphőmérsékleti adatainak feldolgozása irányába mutatott. Elegendően nagyszámú, megbízható forrásból származó, a mélység tekintetében széles mélységtartományban, lehetőség szerint egyenletesen eloszló egyensúlyi talphőmérsékleti adatok segítségével lehetővé válik a területet jellemző átlagos hőmérsékleti mélységprofil származtatása. Természetesen a felsorolt optimális feltételek együttes teljesülése a gyakorlatban csak ritkán fordul elő, ez azonban nem jelenthet akadályt a már rendelkezésre álló adatok együttes elemzését célzó vizsgálataink végrehajtásával szemben.

A demjéni területen korábban szénhidrogén-kutatási céllal mélyített fúrások kútkönyvi dokumentumai, a „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” című, GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű projekt támogatása révén vált lehetővé. Az elemzésbe bevont 90 fúrás anyagának alapos áttekintése

során feldolgozásra alkalmas talphőmérséklet-mérési adataikat csak 36 fúrás esetében találtam. A fúrások nagyobb részében sajnos vagy hiányos volt az adatrögzítés, vagy egyáltalán nem volt adat. Az öblítési idő hosszára vonatkozóan pedig egyetlen egy fúrásnál sem találtam adatot. Tehát jelentős mennyiségű adatvesztésről beszélhetünk a technológiai fegyelem és a tevékenységek ellenőrzésének hiányosságai miatt. A fúrások területi eloszlását a 8. ábra mutatja be. A 9×6 km-es terület kelet-északkeleti irányban fekszik Demjén határában. A fúrások egyenletes területi eloszlása sajnos nem teljesül. A délkeleti negyed három kutatófúrása a legmélyebb, felszíntől számított függőleges mélységük közelíti a 2000 m-t.

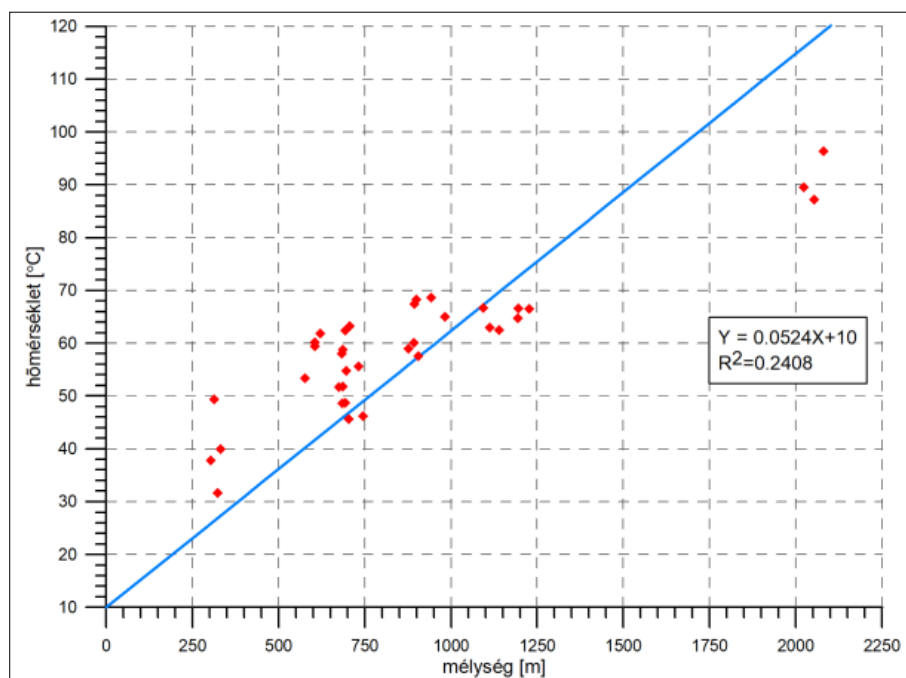
A fúráspontok tengerszint feletti magassága a 131,4 és 242,2 m közötti tartományba esett. A területre vonatkozó lokális referenciaszintet ($z_0 = 0$ m) a két szélsőérték átlagaként határoztam meg ($h_{ref} = 186,6$ m). A fúrások felszíntől számított függőleges talpmélységét erre a szintre vonatkozóan számítottam át. A lokális referenciaszinthez hazánk évi középhőmérsékletét rendeltem hozzá ($T_0 = 10$ °C). A fúrások egyensúlyi talphőmérsékleteinek a becslését a Horner-módszerrel végeztem el. Az öblítési időre vonatkozó információhiány miatt egy normál körülmények között indokolhatóan tekinthető értéket, 5 órát alkalmaztam a számítások során.

Az előállított mélység-hőmérséklet adatait rendszerre először egyenest illesztettem a lokális referenciaszintre vonatkozó kezdő hőmérséklet határfeltételének rögzítése mellett. Az eredményt a 9. ábra mutatja be, melyen egyértelműen látszik, hogy az egyenes nem alkalmas a felszín alatti hőmérséklet változásának leírására ebben az esetben. A legkisebb négyzetek módszerével végrehajtott lineáris regresszió eredményét negatív értelemben minősíti az ábrán



8. ábra | Az elemzésbe bevont fúrások területi eloszlása a Demjén kelet-északkeleti határában fekvő területen. *Piros rombusz*: a talphőmérsékleti adatok feldolgozásába bevont szénhidrogénkutató fúrás helye. *Kék háromszög*: 2006 és 2017 közötti időszakban mélyített hévízkutató-fúrás helye

Figure 8 | Areal distribution of borehole sites involved into the analysis in the vicinity of Demjén. *Red rhombus symbols*: the sites of HC boreholes whose BHST data used for data processing. *Blue triangles*: thermal borehole sites drilled later and used for the verification of results



9. ábra | A Horner-módszerrel számított egyensúlyi hőmérsékletek mélység szerinti eloszlása és az adatrendszerre illesztett egyenes gráfja
Figure 9 | BHST values versus depth determined by Horner method and the linear function fitted to the data

megjelenő R^2 kis értéke is. A lineáris hőmérséklet függvény sekély tartományban kisebb hőmérsékletet becsül annál, ami az egyébként erősen szóródó adatok alapján elvárható lenne. A legmélyebb fúrásokból származtatott adatokhoz képest viszont túlzottan magas értéket becsül ($T = 114,8$ °C, $z = 2000$ m-ben). Mindezekből arra lehet következtetni, hogy a területet egyetlen átlagos geotermikusgradiens-értékkel nem lehet jellemezni. Ez egyben azt is jelenti, hogy a hőáramlásnak nemcsak a konduktív, hanem a konvektív formája is jelen van. Ha az utóbbi hatását el lehetne hanyagolni, akkor az adatoknak a lineáris modellhez sokkal jobban illeszkedő elrendeződést kellene mutatniuk. Számolni kell tehát a függőleges irányú fluidumáramlással is, amelyhez természetes módon hőáramlás társul. A hőmérsékleti adatok mélység szerinti megoszlásával kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a 250 m-nél sekélyebb, a 300–500 m-es és az 1250–2000 m-es tartományokban adathiány áll fenn. A kevés adat és egyenetlen eloszlás sajnos a hőmérséklet mélységfüggésének vizsgálatát nehezíti, és a becsült eredmények bizonytalanságát növeli.

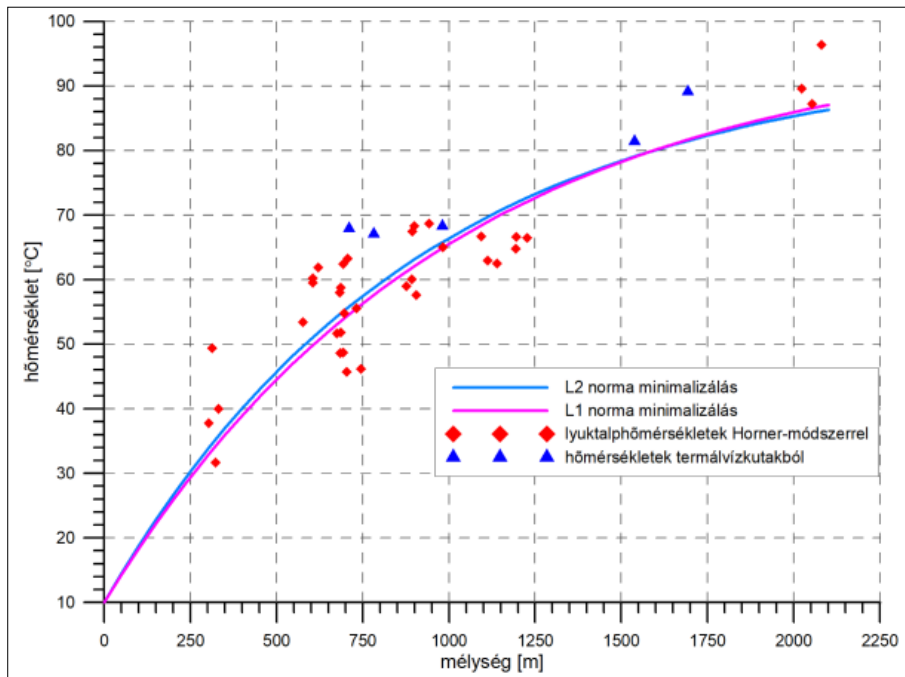
A felszín alatti függőleges irányú vízmozgás hatását is figyelembe vevő, elméleti hőmérséklet–mélység függvény meghatározásának problémájával Bredehoeft és Papadopoulos foglalkozott (Bredehoeft, Papadopoulos 1965). Az együttesen fennálló konduktív hővezetés és fluidumáramlás általános leírására szolgáló parciálisdifferenciálegyenletből kiindulva, az alábbi feltételek kikötésével oldották meg a feladatot. A felszín alatti közeg homogén, izotróp és féligáteresztő a kizárólag függőleges irányú fluidumáramlásra nézve. Ezzel tulajdonképpen csak egyirányú áramlás van figyelembe véve (egydimenziós áramlás esete). Az alulról felfelé áramló fluidum hőtöbbletet

eredményez a felsőbb tartományban, és ez nagyobb hőmérsékletet hoz létre a kizárólag konduktív hővezetés által befolyásolt állapothoz képest. A felszín közeléből lefelé áramló fluidum fordított hatást fejt ki. A modell állandósult hő- és fluidumáramlást feltételez. A megoldáshoz felhasznált határfeltételek két különböző mélységben fennálló hőmérséklet rögzítését igénylik az áramlás által befolyásolt intervallumon belül. A matematikai részleteket mellőzve, az említett szerzők által közölt megoldás a következő formában írható fel:

$$T(z) = T_0 + (T_M - T_0) \left[\frac{\exp\{Kz/M\} - 1}{\exp\{K\} - 1} \right]. \quad (4)$$

Az egyenlet a z mélységre érvényes T hőmérsékletet adja meg abban az esetben, ha ismerjük a vizsgált mélységintervallum z_0 tetőszintjében fennálló T_0 hőmérsékletet, az alsó z_M szint T_M hőmérsékletét és az áramló fluidum, valamint a porózus közeg jellemzőitől függő K konstans értékét. Az M -mel jelölt mennyiség a két mélysztint közötti különbséget ($z_M - z_0$) jelenti. Látható, hogy a modellezéshez használható összefüggés nemlineáris, és nem vezethető vissza lineáris esetre logaritmusképzéssel sem.

Esetünkben kétféleképpen vonható be a vizsgált terület jellemző hőmérséklet–mélység függvényének becslésebe. Mindkét esetben ugyanazok a bementi mélységre és egyensúlyi talphőmérsékletre vonatkozó adatsorok ($T_i = T(z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$), valamint megadjuk a z_0 , T_0 értékeket is. A $z_0 = 0$ m és $T_0 = 10$ °C értékek rögzítésével tulajdonképpen a lokális referenciaszinthez hozzárendeljük az évi középhőmérsékletet. Ezután kezelhetjük úgy a feladatot, hogy keressük az általunk megválasztott z_M mélységszint



10. ábra | A kétparaméteres optimalizálás során, a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott regressziós görbék

Figure 10 | Regression curves obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals when two unknown parameters were specified in the model

T_M hőmérsékletének és a K konstansnak az optimális értékeit, amelyekkel a modell a bemeneti adatokhoz legjobban illeszkedő görbét, azaz hőmérséklet–mélység függvényt adja. A másik esetben a z_M alsó mélységszinthez megadjuk az általunk feltételezett T_M hőmérsékletet is, és csak a K konstans értékére vonatkozóan kell az optimumkeresést elvégezni. Szerencsére az ismeretlen paramétereknek a feladat számára relevánsnak tekinthető tartományai könnyen behatárolhatók az apriori ismeretek alapján. A korábban már említett hőmérséklettérképek alapján a 2000 m-ben várható hőmérsékletnek a tartománya ezen a területen 90–100 °C, amely már nem jelent pozitív anomáliát, mivel az országos átlagot 100 °C-ra becsülik (Lenkey et al. 2021). A K konstans értéke negatív, ha alulról

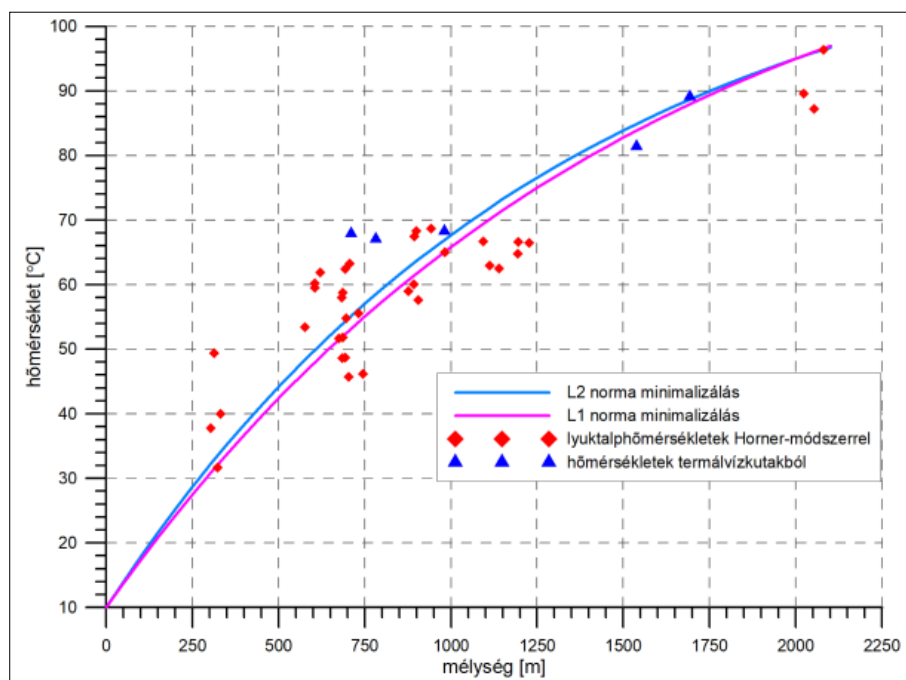
felfelé áramló fluidumról van szó, és ez az eset áll fenn a demjéni területre vonatkozóan. A $K = 0$ érték a fluidumáramlás nélküli konduktív hővezetést írja le. Minél kisebb értéket vesz fel K , annál nagyobb mértékű a fluidummal együtt áramló hő hatása a hőmérséklet–mélység függvényre. A különböző K értékekhez tartozó típusgörbék tanulmányozása alapján érthetővé válik, hogy például a $K = -20$ érték már nagyon jelentős eltérést okoz a görbe alakjában a $K = 0$ eset egyeneséhez képest (Bredehoeft, Papadopoulos 1965).

A kétparaméteres optimalizálás során alkalmazott keresési tartományok és a tartományokon belül alkalmazott felbontások a következők voltak: $80\text{ °C} \leq T_M \leq 120\text{ °C}$, $\Delta T_M = 0,1\text{ °C}$, $-3 \leq K \leq -1$, $\Delta K = 0,1$. A legkisebb négyze-

5. táblázat | A kétparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott optimális paraméterértékek és az illesztett görbék alapján különböző mélységszintekre becsült egyensúlyi hőmérsékletértékek

Table 5 | The optimal values of unknown parameters (rows 2 and 3) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when two unknown parameters were specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fitted curves (rows 4 to 7)

	L1 norma szerinti illesztés	L2 norma szerinti illesztés
Optimális K	-2,1	-2,3
Optimális $T_m(z_m = 2100\text{ m})$ [°C]	87,1	86,3
$T(z = 500\text{ m})$ [°C]	44,6	45,8
$T(z = 1000\text{ m})$ [°C]	65,5	66,4
$T(z = 1500\text{ m})$ [°C]	78,3	78,4
$T(z = 2000\text{ m})$ [°C]	86,0	85,3



11. ábra | Az egyparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott regressziós görbék

Figure 11 | Regression curves obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals when a single unknown parameter was specified in the model

tek elve (a reziduumok L2 norma szerinti minimalizálása) szerint és az abszolút eltérések összegének minimalizálásával (a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálása) kapott eredményeket a 10. ábra mutatja be.

A K és a T_m paraméterek optimális értékeit az 5. táblázat tartalmazza. A vizsgálati tartomány alsó szintjét $z_m = 2100$ m-ben rögzítettem, mivel a legmélyebb fúrás 2080,6 m-rel szerepel az adatrendszerben. A kapott nemlineáris modellekkel 500 m-enként növekvő mélységszintekre számított egyensúlyi hőmérsékletek is tanulmányozhatók a táblázat alsóbb soraiban. A két különböző görbeillesztési módszerrel kapott eredmények nagyon közel állnak egymáshoz. Ez mind a grafikonon megjelenített görbékre, mind a táblázatban szereplő adatokra igaz.

A számításokba bevont adatokat a piros rombusz szimbólum jelöli az ábrán. A kék háromszögek azoknak a fúrásoknak a talphőmérsékleti adatait mutatják, amelyeket a 2006 és 2017 közötti időszakban mélyítettek hévízkutatói céllal Demjén környékén. Az adatokat a Magyarország mélyfúrású kútjainak katasztere XXXII., XXXIII., XXXVII., XXXIX. és XL. kötetéből gyűjtöttem ki azzal a céllal, hogy a számítással kapott eredményeket ezekkel a független forrásból származó adatokkal is össze lehessen vetni. Az ábrán jól látható, hogy az adatok többsége az 250–1250 m-es tartományban helyezkedik el. A görbék az erősen szóródó pontthalmaz középső tartományán haladnak át. A szóródás okai között szerepelhet a mérési hiba, a Horner-módszer alkalmazásából származó hiba és a konvektív hőáram egyenetlen eloszlása a területen. Az utóbbi ok miatt egyes helyeken az „átlagoshoz” képest lényegesen nagyobb, ill. kisebb hőmérsékletek is előfordulhatnak.

Ha összehasonlítjuk a kapott modellek 500, 1000 és 2000 m-es szintekre becsült értékeit a korábban már említett hőmérsékleteloszlás-térképekből kiolvasható tartományokkal (Lenkey et al. 2021), akkor elmondható, hogy az 500 és 1000 m-es szintek esetében nincs ellentmondás. Nem ez a helyzet a 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékletekkel. A térkép szerint a területre jellemző tartomány 90–100 °C-nak felel meg, amely nem számít nagy értéknek a hazai viszonyokat tekintve. Valószínű, hogy ebben a mélységben a felszín alatti víz felfelé áramlása már nincs jelen. Ha Magyarország pre-kainozoos földtani térképét tekintjük (MBFSZ térképi portál, 2017), abból megállapítható, hogy a vizsgált terület északnyugati sarka kiemelt helyzetben van, és itt a mezozoos mészkőaljzat teteje 500 m körüli mélységszinttel jellemezhető. Ezen a részen harmadrendű kainozoos tektonikai elem létezése is valószínűsíthető, amely magyarázhatja felszín alatti vízzel felfelé szállított hő inhomogén eloszlását. Déli és délkeleti irányban az aljzat mélyül, a terület nyugati részén tömörülő fúrásponthoz már 1000 m-hez közelít az aljzattérség. A terület délkeleti sarkában pedig az 1500 m-t is eléri. A karbonátos aljzatban pozitív hőmérsékleti anomália valószínűleg már nincs. A számított modellekkel 2000 m-es szintre becsült hőmérsékletértékek viszont túl alacsonyak, hiszen még a 90 °C-ot sem éri el. Ennek az az oka, hogy a lokális referenciaszinttől számított 2000 m-es mélységet elérő három fúrásból kettő esetében 90 °C alatti egyensúlyi talphőmérsékletet kaptam (87,2 és 89,6 °C), és ez gyanút ébreszt a reprezentativitásukat illetően. Hiába van jelen a harmadik fúrás magasabb talphőmérséklettel (96,4 °C) az adatrendszerben, a regressziós modell illesztését a két adat

6. táblázat | Az egyparaméteres optimalizálás során a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával kapott optimális paraméter értékek és az illesztett görbék alapján különböző mélységszintekre becsült egyensúlyi hőmérsékletértékek

Table 6 | The optimal values of the unknown parameter (row 2) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when a single unknown parameter was specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fitted curves (rows 3 to 6)

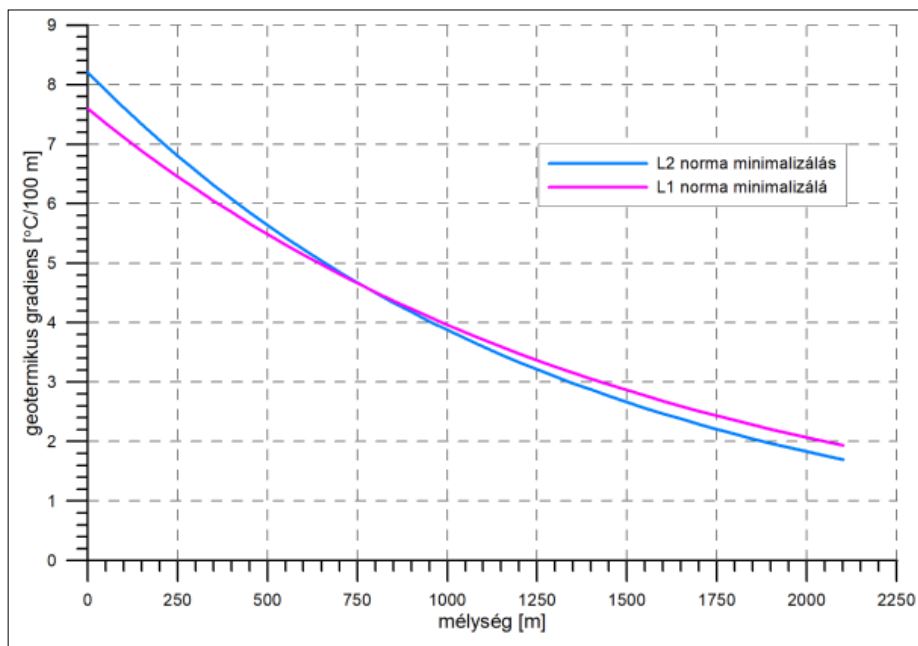
	L2 norma szerinti illesztés	L1 norma szerinti illesztés
Optimális K	-1,5	-1,3
$T(z = 500 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	44,2	42,4
$T(z = 1000 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	67,7	65,8
$T(z = 1500 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	83,9	82,8
$T(z = 2100 \text{ m}) [^{\circ}\text{C}]$	96,8	97,0

erősebben befolyásolja. Ez a nemkívánatos hatás abban is megmutatkozik, hogy az ellenőrzés érdekében bevont hévízkutak adatait megjelenítő kék háromszögekhez sem illeszkednek jól a görbék. Kijelenthető tehát, hogy a kevés számú adat miatt, főleg a nagyobb mélységek esetében a modellek alulbecsülik a területre valószínűsíthető hőmérséklet-eloszlást.

Javítást olyan módon érhetünk el, ha rögzítjük a $z_m = 2000$ m-es mélységre feltételezett T_m értéket, és csak a K paraméterre vonatkozóan hajtjuk végre az optimalizálást. A 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékleteloszlás-térképpel összhangban álló $T_m = 95$ °C értéket alkalmaztam a vizsgált tartomány alsó határához közeli hőmérsékleteként. A reziduumok L1 és L2 normái minimalizálása szerint végzett modellillesztések eredményeit a 11. ábra jeleníti meg, amelyen azonnal észlelhető a javulás a nagyobb mélységekre becsült hőmérsékleti görbeszakaszok esetén.

A kétparaméteres optimalizálásnál tapasztaltakhoz képest kicsit nagyobb ugyan az eltérés az L1 és L2 normás illesztések eredményei között, de nem mondható jelentősnek a különbség. A 6. táblázatba foglalt adatok tanulmányozása során sem találunk jelentős eltérést az optimális K értékek és a különböző mélységszintekre becsült hőmérsékletek között. A legnagyobb eltérés 1000 m körüli mélységben jelentkezik, ahol a 2 °C-ot közelíti. Jobban illeszkednek a görbék a hévízkutak talphőmérsékleti adataihoz is, és ez megerősítést jelent az eredmények elfogadhatóságát illetően.

Mindkét görbének vannak előnyös és hátrányos tulajdonságai. Az L1 norma szerinti illesztéssel kapott görbe kissé közelebb áll az 1000 m-nél mélyebb fúrásokból származó hőmérsékletekhez. A másik görbe viszont az ennél sekélyebb mélységtartományban mutat jobb illeszkedést a hőmérsékleti adathalmazra.



12. ábra | Az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvényekből származtatott geotermikusgradiens-függvények

Figure 12 | The curves of geothermal gradient functions derived from the temperature functions estimated by the single-parameter optimization

7. táblázat Az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvényekből származtatott geotermikusgradiens-függvények értékei néhány mélységszinten

Table 7 The optimal values of the unknown parameter (row 2) obtained by the minimization of L1 and L2 norms of the residuals (columns 2 and 3) when a single unknown parameter was specified in the model, and estimated static temperatures of different depth levels calculated from the equations of fit. The values of geothermal gradient functions derived from the temperature functions estimated by the single-parameter optimization (rows 2 and 3) for different depth levels (row 1) fitted curves (rows 3 to 6)

Mélység [m]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Geotermikus gradiens (L1 norma) [°C/100 m]	7,59	6,46	5,49	4,66	3,96	3,37	2,86	2,44	2,07
Geotermikus gradiens (L2 norma) [°C/100 m]	8,21	6,80	5,64	4,68	3,88	3,21	2,66	2,21	1,83

8. táblázat Sekélyebb és mélyebb mélységtartományokra becsült átlagos geotermikusgradiens-értékek

Table 8 Average geothermal gradient values estimated for shallower and deeper intervals (column 1). Country-wide average values (column 2), values calculated from the equation of curve fitted by the minimization of L1 norm of the residuals for the single-parameter optimization (column 3), values calculated from the equation of curve fitted by the minimization of L2 norm of the residuals for the single-parameter optimization (column 4)

	Geotermikus gradiens országos átlaga [°C/100 m]	Geotermikus gradiens hőmérsékletfüggvény alapján (L1 norma) [°C/100 m]	Geotermikus gradiens hőmérsékletfüggvény alapján (L2 norma) [°C/100 m]
500–1000 m	4	4,68	4,70
1000–2000 m	4	2,92	2,73

Ha a két eltérő célfüggvény alkalmazásával kapott hőmérsékletfüggvények közötti választást fontolgatjuk, akkor érdemes megvizsgálni a függvények mélység szerinti deriválásával számítható geotermikusgradiens-függvényeket. A (4) egyenlettel megadott matematikai modell esetében a deriválás művelete könnyen elvégezhető. A K konstans eltérő értéke miatt különböző gradiensfüggvények menete a 12. ábrán látható. Mindkét gradiens esetében elmondható, hogy nemlineáris csökkenés mutatkozik a mélységgel. A csökkenés természetes jelenség, hiszen nagyobb mélységben a kőzetek egyre tömörebbek és a hővezető képességük nő. A csökkenés mértékében viszont különbség jelentkezik. A becsült geotermikusgradiens-görbék a $z = 773.98 \text{ m} \cong 774 \text{ m}$ -ben keresztezik egymást, ahol az értékük $dT/dz|_{z=774 \text{ m}} = 4,59 \text{ °C}/100 \text{ m}$. A két gradiensfüggvény néhány mélységszintre számított értékei szerepelnek a 7. táblázatban.

A nagyak tekinthető értékek a metszéspont mélysége feletti szakaszban jelentkeznek. A terület aljzatviszonyait figyelembe véve, ez tekinthető annak a törmelékeny üledékekkel kitöltött „átlagos” tartománynak, amelyben a felfelé áramló vízzel szállított hő pozitív hőmérsékleti anomáliát okoz. A metszéspont alatti tartományban már jelentkezik, és egyre nagyobb szerepet tölt be az aljzat hatása. A tömör mészkőben a konduktív hővezetés dominál, de a felszín alatti mélykarszt járatrendszerében a Bükk hegység nyitott mészkő felszínein keresztül a mélybe jutó csapadékvíz áramlik valószínűleg oldalirányban is. A leszálló és szétáramló víz hűtő hatása jelentkezik a nagyobb mélységekben, és ez valószínűleg mérsékli a felfelé irányuló konduktív hőáram hőmérséklet-növelő hatását. A területre becsült hőáramsűrűség egyébként az országos átlagot ($90 \text{ mW}/\text{m}^2$)

alulról közelíti ($\sim 80 \text{ mW}/\text{m}^2$) az országos hőáramsűrűség-térkép alapján (Lenkey et al. 2021). Ezzel összhangban áll az, hogy a 2000 m-es mélységre becsült hőmérsékleteloszlás-térképen az országos átlagot (100 °C) szintén alulról közelíti a terület a $90\text{--}100 \text{ °C}$ -os tartománnyal.

A hőmérsékleteloszlás-térképek mélységszintjei közötti tartományokra becsült átlagos geotermikus gradiens értékek becsült értékei hasonlíthatók össze a 8. táblázatban. Az első oszlop országos átlagértékei a mélységszintek hőmérsékleti átlagai (40 °C , 60 °C és 100 °C) alapján adódnak (Lenkey et al. 2021). A második és harmadik oszlop értékeit az egyparaméteres optimalizálással kapott hőmérsékletfüggvények egyenleteivel lehet számítani.

Látható, hogy míg a sekélyebb tartományban az országos átlagot meghaladó gradiensértékeket lehet becsülni mindkét kiegyenlítési módszerrel, a mélyebb tartományra már az átlagtól kisebb értékeket kapunk. Ennek oka a sekélyebb tartomány hőtöbblete és a mélyebb tartomány hőhiánya az átlagos viszonyokhoz képest.

Visszatérve a két gradiensfüggvény-görbe minősítésére, a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálásával kapott hőmérsékletfüggvényből származó eredmény előnyösebb tulajdonságokkal rendelkezik. Mérsékeltőbb a gradiens változása a mélységgel, és a tanulmányozott intervallum határain is elfogadhatóbb értékeket vesz fel. Nem indul olyan nagy értékről ($< 8 \text{ °C}/100$), és nem csökken le annyira a 2000 m-es szintnél ($> 2 \text{ °C}/100$), mint a másik módszer alkalmazásával kapott eredmény. A becsült hőmérsékletfüggvényeket bemutató 11. ábrán megfigyelhető, hogy abban a középső tartományban, ahol a két görbe között az eltérés nagyobb, a reziduumok L1 norma szerinti minimalizálásával kapott eredmény görbéjének alakjára az adatok

szóródásának középső sávjától kieső pontok nincsenek olyan nagy hatással, mint a másik görbe esetében. Az L1 norma kiugró adatokkal szemben megnyilvánuló nagyobb rezisztenciájának köszönhetően a hőmérsékletfüggvény átlagos görbülete kisebb, és ennek megfelelően a gradiensfüggvény görbéje is enyhébb lecsengést mutat kisebb maximummal és nagyobb minimummal.

Összefoglalás

A fúróluktalp egyensúlyi talphőmérsékletének becsléséhez a lyuktalpon különböző időpontokban mért hőmérsékleti adatokra van szükség. Nagyon fontos lenne, hogy ne csak a mért hőmérséklet és az öblítés befejezésétől számított idő, hanem az öblítési idő hossza is szerepeljen a fúrési napló adatai között.

Az egyensúlyi talphőmérséklet meghatározásához gyakran alkalmazott Horner-módszer használatának egyik feltétele az öblítési idő ismerete. Az egyik demjéni fúrás esetében vizsgáltam, hogy a módszer mennyire érzékeny az öblítési idő hosszának változására. A széles tartományban változtatott öblítési idő nem eredményezett jelentős eltérést a becsült hőmérsékletértékekben. Ugyanakkor érdemes tisztában lenni a szakirodalomban tárgyalt korlátokkal is. A Horner-módszerrel kapott eredmény ellenőrzése érdekében egy másik módszert is alkalmaztam, melynek lényege abban áll, hogy a hőmérséklet stabilizálódását leíró matematikai modellt kell illeszteni a mért adatok rendszerére. Az öblítési idő hosszának ismeretére itt nincs szükség, de a fúróluktalp környezetét jellemző hőmérséklet-vezetési tényező értéket alkalmasan kell megválasztani az egyenletben. Fizikailag indokolt értéket alkalmazva, a Horner-módszerrel kapott eredményhez nagyon közeli értéket kaptam. További ellenőrzést jelentett egy a területen fúrt, hasonló mélységű hévízkút egyensúlyi talphőmérséklet-adata, amely mindkét becsült adathoz közel állt.

Ezt követően a 36 demjéni fúrás adatrendszerét dolgoztam fel. A különböző talpmélységű fúrások becsült egyensúlyi talphőmérsékleteit felhasználva a területre jellemző hőmérséklet–mélység függvényt meghatároztam. A legegyszerűbb lineáris modell alkalmatlannak bizonyult erre a célra. Ebből arra lehet következtetni, hogy a terület felszín alatti hőmérsékleti viszonyait nemcsak a konduktív, hanem konvektív hőáramlás is befolyásolja. Így olyan matematikai modellt alkalmaztam, amelyben a függőlegesen áramló fluidummal szállított hő hatása is figyelembe van véve. A modell két paraméterére vonatkozó optimalizálást a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával egyaránt elvégeztem. A kapott hőmérséklet–mélység függvények konkávok, és ezt a görbék alakját jellemző tulajdonságot az alulról felfelé áramló fluidummal szállított hő hatása okozza. Az eredmények a vizsgált mélységtartomány alsó részében, 1500–2000 m között, a korábbi kutatások eredményeit közlő szakirodalomban ismertetett eredményekkel nincsenek összhangban. A túlságosan alacsony becsült hőmérsékleti értékek oka a mélyebb tartományba

eső kevés adat, és az elvárhatóhoz képest alacsony egyensúlyi talphőmérséklet-értékek.

A probléma megoldása érdekében a modell egyik paraméterét, amely a vizsgált tartomány alsó határa egyensúlyi hőmérsékletének felel meg, a szakirodalmi adatokkal összhangban lévő érték hozzárendelésével rögzítettem. Az optimalizálást ilyen módon egyparaméteresre redukálva végeztem el, a reziduumok L1 és L2 norma szerinti minimalizálásával egyaránt. A kapott eredmények sokkal jobb illeszkedést eredményeztek az ellenőrzésbe bevont, hévízkutakból származó egyensúlyi talphőmérsékletekhez. Az L1 normás illesztéssel kapott függvény előnyösebb volt abban nyilvánul meg, hogy a kiugró értékűnek minősülő adatok nem befolyásolják annyira a görbe alakját, mint a másik illesztési módszer esetében.

Megvizsgáltam a területre a becsült hőmérséklet–mélység függvények deriválásával számítható geotermikusgradiens-függvényeket. A két gradiensgörbe 774 m-ben metszi egymást, ahol az érték $4,59\text{ °C}/100\text{ m}$. E szint felett az országos átlagtól nagyobbak, lefelé viszont az átlagos alá csökkennek az értékek. Nagyjából ez lehet az a területre átlagos értelemben jellemző mélység, amely felett a konvektív hőáram pozitív hatása érvényesül. A szint alatt a mészkőaljzat hatása jelentkezik, amely a felszínről származó karsztvíznek köszönhetően az átlagos hőmérsékletviszonyokhoz képest valamelyest kisebb hőmérsékleteket és jelentősen kisebb hőmérsékletigradiens-értékeket okoz.

Az L1 norma szerinti minimalizálás rezisztenciájának előnye a geotermikusgradiens-görbe vonatkozásában is megjelenik. Megállapítottam, hogy a konvektív hőáramot is figyelembe vevő modell egyparaméteres optimalizálásával nyert hőmérséklet–mélység függvényei közül az L1 norma szerinti minimalizálással kapott változat javasolható a demjéni terület felszín alatti hőmérséklet eloszlásának közelítésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A tanulmány szerzője

Vass Péter

Hivatkozások

- Boda E., Zilahi-Sebess L. (2013): A zavarmentes hőmérsékleti tér meghatározásának problémája. *Magyar Geofizika*, 54/1, 19–30.
- Bredhoeft J. D., Papadopoulos I. S. (1965): Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth's thermal profile. *Water Resource Research*, 1/2, 325–328. <https://doi.org/10.1029/wr001i002p00325>

- Dowdle W. L., Cobb W. M. (1975). Static formation temperature from well logs – An empirical method. *Journal of Petroleum Technology*, 27/11, 1326–1330. Paper Number: SPE-5036-PA, <https://doi.org/10.2118/5036-PA>
- Edwardson M. J., Girner H. M., Parkison H. R., Williams C. D., Matthews C. S. (1962): Calculation of formation temperature disturbances caused by mud circulation. *J. Pet. Technol.* 14/04, 416–426. Paper Number: SPE-124-PA, <https://doi.org/10.2118/124-PA>
- Fertl W. H., Chilingarian G. V., Yen, T. F. (1986): Determination of true static formation temperature from well logs. *Energy Sources*, 8/2–3, 277–288. DOI: 10.1080/00908318608946056
- Horner D. R. (1951): Pressure buildup in wells. In: *Proceedings Third World Petroleum Congress, The Hague, Section II, Preprint 7.*
- Köves P., Párniczky G. (1975): *Általános statisztika, 2. jav. kiadás, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest*, p. 583, p. 637.
- Leblanc Y., Pascoe L. J., Jones F. W. (1981): The temperature stabilization of a borehole. *Geophysics*, 46/9, 1301–1303. <https://doi.org/10.1190/1.1441268>
- Leblanc Y., Lam H. L., Pascoe L. J., Jones F. W. (1982): A comparison of two methods of estimating static formation temperature from well logs. *Geophysical Prospecting*, 30/3, 348–357. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1982.tb01311.x>
- Lenkey L., Mihályka J., Paróczy P. (2021): Review of geothermal conditions of Hungary. *Földtani Közlöny*, 151/1, 65–78., Budapest, 2021, DOI: 10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.65
- MBFSZ térképi portál (2017): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe 1:500 000, <https://map.mbfisz.gov.hu/preterc500/>
- Middleton M. F. (1979): A model for bottom-hole temperature stabilization. *Geophysics*, 44/8, 1458–1462. <https://doi.org/10.1190/1.1441018>
- Serra O., Serra L. (2004): *Well Logging Data Acquisition and Application. Editions Serralog, 25 rue des Chaumières, 14370 Méry Corbon, France*, p. 558.
- Timko D. J., Fertl W. H. (1972): *How Downhole Temperatures, Pressures Affect Drilling. World Oil.*
- Zaki B. (1994): *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs. Society of Petroleum Engineers, Inc., USA*, p. 76.