

Használható-e a kutakban mért geotermikus gradiens a kőzetek hővezetőképességének számítására?

Készítette:

Szlukovinyi Áron

Témavezetők:

Dr. Lenkey László egyetemi docens

Dr. Szijártó Márk tudományos munkatárs



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Budapest

2022

Tartalom

Bevezetés	3
Numerikus modell	8
A modellgeometria bemutatása	8
Határfeltételek	9
Végeselem rácsháló	9
A fűrólyuk hővezető-képességei.....	10
A számítás válaszparamétere(i)	11
Eredmények	12
Szintetikus rétegsor	12
Szintetikus modell.....	12
Különböző réteghatárokon történő gradiens értékek változása	16
Valós modell.....	18
Hőfluxusok	24
A fűrólyuk hatása a távoli zónában	26
Következtetések	27
Köszönetnyilvánítás	28
Irodalomjegyzék.....	29
Absztrakt	31

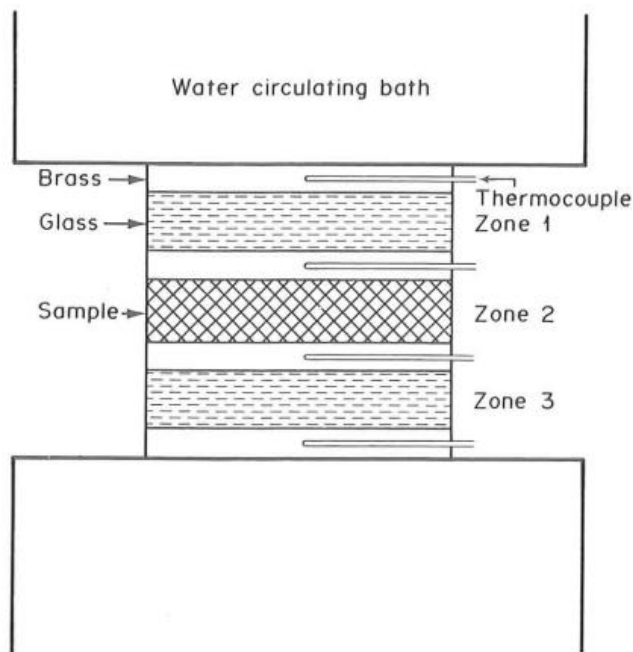
Bevezetés

A hővezető-képesség az a termikus anyagi paraméter, amely lineáris kapcsolatot teremt a hőfluxus, illetve a hőmérsékleti gradiens között, így jellemezve a hő konduktív módon történő transzportját egy kiszemelt anyagban. A konduktív hőtranszportfolyamatot a Fourier-törvény írja le (pl. Artamonov et al., 2021),

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

ahol $\mathbf{q}$ a hőáramsűrűség vagy másképpen hőfluxus, λ a hővezető-képesség, ami homogén közeg esetén skalármennyiség, általános esetben pedig tenzor és T a hőmérséklet. A hővezető-képesség a geotermikus kutatásokban azért fontos, mert annak pontos meghatározása nélkül nem lehet meghatározni a földi hőfluxust. A kőzetek, ásványok hővezető-képessége egy nagyságrenden belül, $\lambda=1-7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ változik (pl. Kappelmeyer és Haenel, 1974).

Egy földtani képződmény – annak léptékétől függően, hogy szemcseméret vagy medenceléptékben vizsgálják – hővezető-képességét számos módszerrel határozhatják meg. Három fő kategóriát különböztetünk meg (Shakirov et al., 2021). A módszerek első csoportjában, laboratóriumi körülmények között, magmintákon való méréssel határozzák meg az említett paramétert. Ezek lehetnek osztott rudas (1. ábra), optikai szkenneléses, és féltérbeli vonal-, vagy lapforrásos mérések (Jessop, 1990).

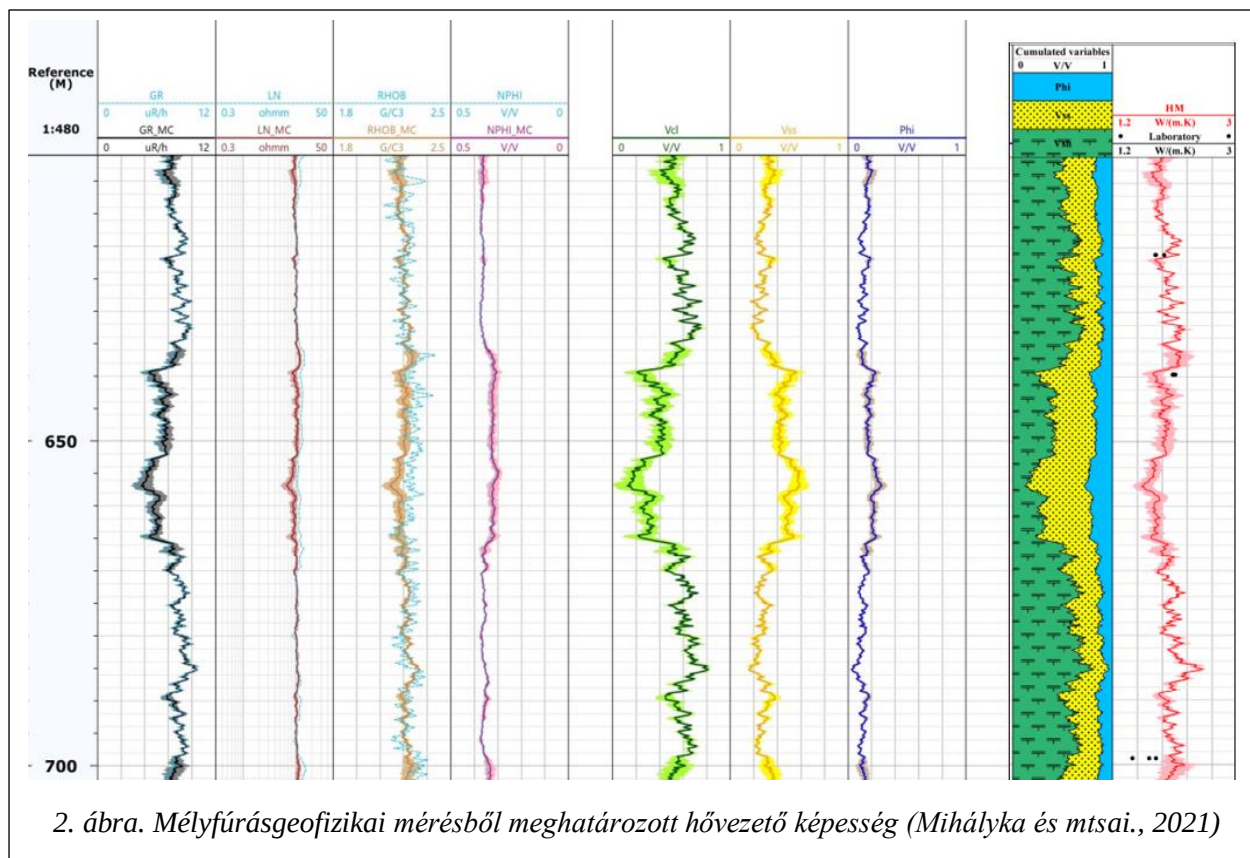


1. ábra. Osztott rudas hővezető-képesség mérés laboratóriumban (Jessop, 1970)

Az osztott rudas mérésnél két ismert hővezető-képességű fémhenger (többnyire rézhenger) közé tesznek egy ugyanolyan átmérőjű közethengert. A felső és alsó rézhenger külső felszínét állandó hőmérsékleten tartva megvárják, amíg beáll a stacionárius állapot. Ekkor az (1) egyenlet szerint a rézhengereken és a közetmintán átáramló hőfluxus megegyezik, mely hőmérsékletmérésekből, valamint a fémhengerek ismert hővezető-képességnek ismeretében meghatározható. Ezután a minta ismeretlen hővezető-képessége kiszámítható. A módszer hibája 5% (Erki, 1984).

Vonal-, vagy lapforrásokkal hőimpulzust keltenek és a forrástól adott távolságban megmérlik a hőmérséklet időbeli változását. Ebből a minta hővezető-képessége számítható. A módszer hibája 10% körül van. A magyarországi hővezető-képesség mérések a fenti két módszerrel az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszékén történtek (Erki, 1984, Dövényi és Horváth, 1988). Az optikai szkennelésnél egy hosszabb magmintát a külsején befestenek fekete festékkel és egy lézersugárral végig szkennelik. A minta a sugárzás hatására felmelegszik és ezt a hőmérsékletváltozást infrakamera segítségével határozzák meg. A felmelegedés mértékéből lehet a hővezető-képességet számítani (Popov és mtsai., 2016). Ilyen mérést ezidáig még nem végeztek Magyarországon.

λ meghatározására a fúrólyukakban kivitelezett geofizikai mérések is alkalmasak lehetnek. A 2. ábrán egy mélyfúrásgeofizikai mérés részlete látható 600 és 700 m mélység közötti tartományban. A mért adatokból litológiai modell határozható meg különböző agyag-, homoktartalommal, illetve pórustérrel, melyet víz tölt ki Ennek segítségével az adott mélységben lévő közet hővezető-képessége számítható (Mihályka és mtsai., 2021) (2. ábra).



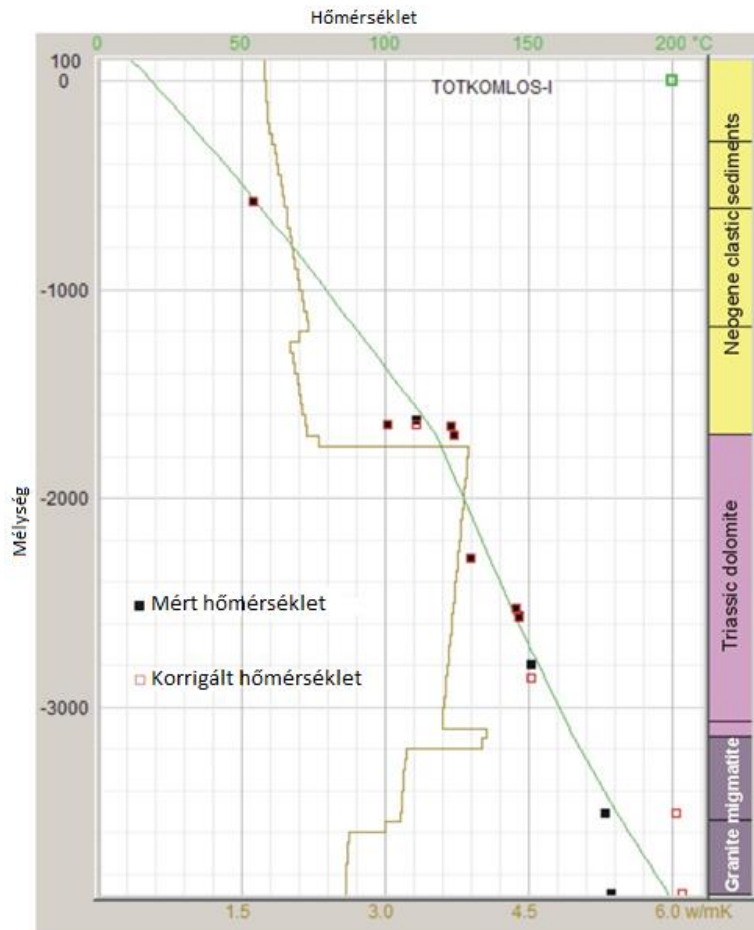
Végül a harmadik opcióként érdemes megemlíteni egy közelítő módszert, amely a környezetben található más fúrólyukakból vett adatsorokból számol vagy korreláltat az aktuális fúrásra nézvést hővezető-képességet a meghatározott mélységre (Shakirov et al., 2021).

Ugyanakkor elmondható, hogy a hővezető-képesség egy viszonylag nehezen mérhető anyagi paraméter. Például problémát okoz, hogy a litológiai rétegsor különösen üledékes kőzetek esetén inhomogén a geológiailag egységesnek értelmezett tartományon (pl. 2 ábra). Ennek értelmében nehéz megmondani, hogy meddig terjeszthetjük ki a laboratóriumban mért értékeket a rétegsor egy-egy szakaszára.

További probléma a laboratóriumi mérések esetén, hogy egy minimális levegőréteg mindig jelentkezik a minta és a mérőműszer, vagy a minta és a fémhenger között, ami a levegő szigetelő hatása miatt befolyásolja a mért értékeket. Ennek kiküszöbölésére, illetve figyelembe vételére különböző eljárások vannak, de a mérés hibáját nehéz 5% alá vinni (Erki, 1984). Továbbá a magmintákon is végbe mehetnek különböző deformációk fúrás közben, vagy a laborban szaturáció közben, és ezek is jelentősen megnehezítik a valós lambda érték meghatározását.

Az említett problémák áthidalására talán a Fourier-egyenlet adhat megoldást. Abban az esetben, ha a hőterjedés konduktív módon történik, és a hőtermelés elhanyagolható, valamint a hőmérséklet stacionárius, a hőfluxus állandó és az (1) összefüggés alkalmazásával

leszármaztatható a hővezető-képesség a hőmérséklet gradienséből, amennyiben a hőfluxus ismert. A felsorolt feltételek a legtöbb mélyfúrásban teljesülnek, illetve felszín alatti vízáramlás esetén a hőmérsékletből látható, hogy nem teljesül a kizárólagos kondukcióra vonatkozó feltétel. A geotermikus gradiens és a hővezető-képesség közti kapcsolatot a 3. és a 4. ábra szemlélteti.

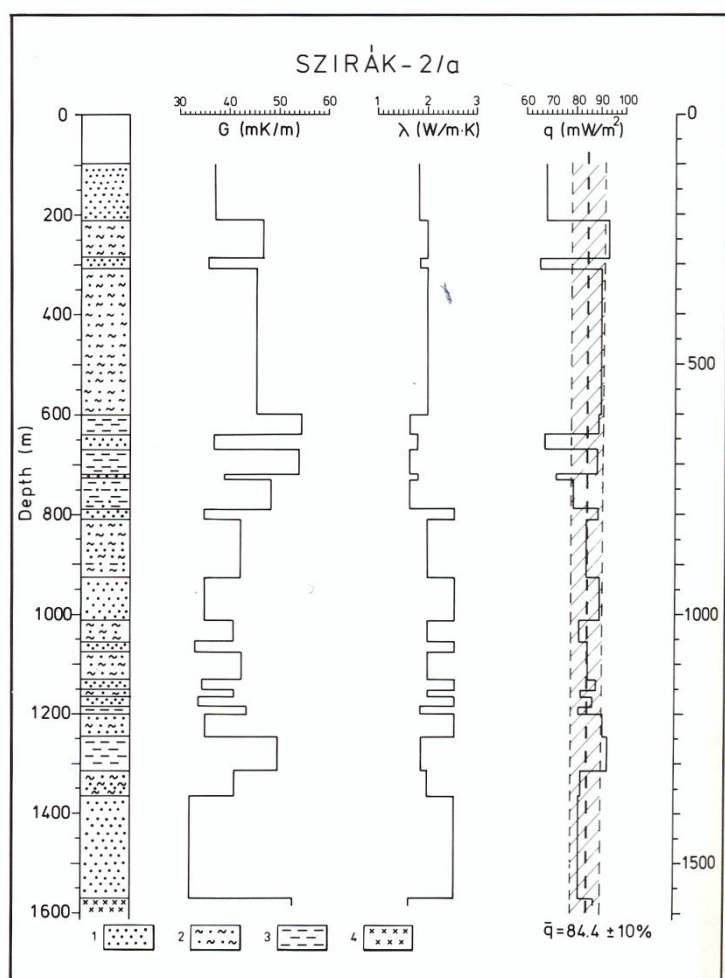


3. ábra. Számított hőmérséklet-mélység profil (zöld görbe) a Tótkomlós-I fúrásban, amely konstans hőfluxus feltételezésével lett számolva. A számításnál a hővezető-képesség (barna görbe) bemeneti paraméter volt. Jól látható, hogy a triász dolomit nagy hővezető-képessége miatt a geotermikus gradiens a dolomitban, Fourier-törvénye következtében kisebb, mint a neogén üledékekben. Adatok: Lenkey L., személyes közlés (2022).

A Szirák-2 fúrásból 50 m-ként vettek magmintát, melyeken hővezető-képességet határoztak meg, és a fúrásban hőmérséklet szelvényt is mértek (Dövényi és Horváth, 1988). A hőmérséklet szelvényből kiszámították a fúrás leírása alapján a homogénnek feltételezett rétegekre a geotermikus gradienst. A 4. ábrán a $\text{grad } T$ és λ antikorrelációja jól követhető. Természetesen a 4. ábrán látható olyan szakasz is, amikor a kapcsolat nem jó. Ennek hátterében általában a

kevés hővezető-képesség mérés áll, ami nem teszi lehetővé a pontszerű laboratóriumi mérések helyes kiterjesztését a rétegsorra

A fenti példák alapján lehetőség van a hővezető-képesség számítására a hőmérsékleti gradiens felhasználásával. A hőmérsékletméréseket kizárólag kiépített kutakban lehet elvégezni, melyek termikusan egyensúlyban vannak. Azonban jogosan merülhet fel a kétely, hogy a kutak szerkezetéből, a béléscsővezésből, a cementezésből, és a kutat kitöltő vízből adódó eltérő hővezető-képesség mennyire befolyásolja a kútban mérhető hőmérsékletet, az abból számított geotermikus gradienst és így a gradiensből leszámaztatott hővezető-képességet és végül a hőfluxust. Azért, hogy megvizsgáljam a fűrőlyukfalba kiépített cement, acél béléscsővezés és a fűrőlyukat kitöltő víz együttes hatását a fűrőlyukban mért hőmérséklet értékekre, numerikus modellezést végeztem. A cél az volt, hogy kiszámoljam mennyit változik a hőmérséklet a zavartalan földtani közegre jellemző hőmérséklethez képest.



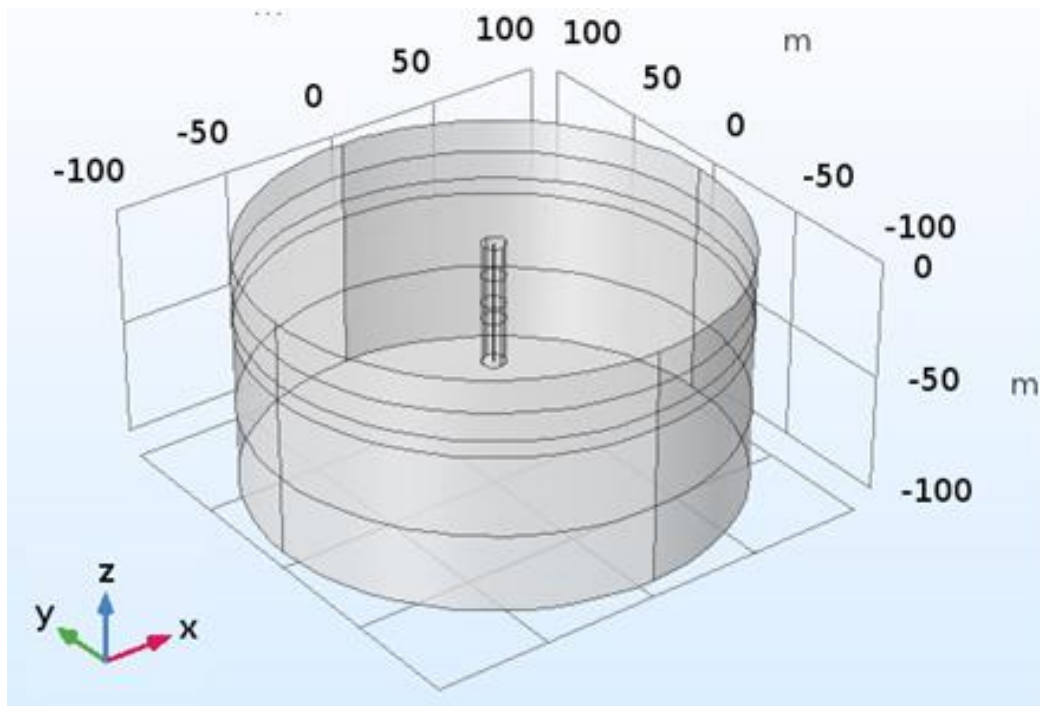
4. ábra. Hőmérsékleti gradiens (G) és hővezető-képesség (λ) profilok antikorrelációja a Szirák-2 fúrásban (Dövényi és Horváth 1988)

Numerikus modell

A modellgeometria bemutatása

A számításokhoz egy hengerszimmetrikus, háromdimenziós modellteret használtam (5. ábra), amely egy 100 m sugarú és magasságú hengerből állt. A henger szimmetriatengelyébe egy 10 cm sugarú és 50 m magasságú kisebb hengert illesztettem, amely esetemben a fúrólyukat jelenti. A 20 cm-es lyukátmérő nagyinak számít, többnyire a fúrások felső néhány száz méterében szoktak ekkora átmérővel fúrni. A nagyobb lyukátmérő nagyobb zavart okoz, így a számításokkal a hatást felülbecsülöm a kisebb átmérőjű kutakhoz képest. A fúrólyukat egy 14,5 cm sugarú hengerrel vettem körbe, amelynek a 10 cm-t meghaladó része az acélt és cementet együttesen volt hivatott manifesztni. A valóságban ebben a hengerben a cement vastagsága 3,8 cm, míg az acélé 0,7 cm. Azonban a 0,7 cm falvastagságú acélhenger figyelembevételéhez a rácshálót mm felbontásúra kellett volna venni, ami mind a lefoglalt memóriát, mind a számítási időt lényegesen megnövelte volna. A 14,5 cm sugarú hengeren kívüli részen vízszintesen települt rétegsort (1. Táblázat, illetve „valós modellt”) definiáltam, melyek egyenként homogén és izotróp közegként viselkedtek. Ezek a rétegek agyag, homok és homokos agyagként települnek egymás után. Ezt a felbontást azért végeztem el, hogy megvizsgáljam a különböző hővezető-képességű rétegek hatását.

Továbbá, érdemes megemlíteni, hogy a rácsháló felbontás stabilabb és egyenletesebb átmenete miatt egy 5 m sugarú hengert is beépítettem a modellbe, aminek természetesen fizikai alapja nincs. A végeselemes modell megépítéséhez (Kiss és Szijártó 2017) korábbi munkáit használtam fel, és fejlesztettem tovább. A modellt 2D-os hengerkoordináta-rendszerben is felépíthettem volna, azonban a 3D-os modellnek az az előnye, hogy a későbbiekben 3D-os folyamatokat, pl. nem horizontális, hanem tetszőleges irányban dőlt rétegződés hatását is modellezni lehet.



5. ábra. A modellgeometria, oldalán megfigyelhetők a rétegsorok, középen a fúróluk ($r_{bh}=10$ cm), valamint a „segédhenger” ($R=5$ m)

Határfeltételek

A modelltartomány szélén, a 100 m sugarú hengerpalást oldalán hőszigetelést definiáltam ($q=0$ W/m²).

Továbbá, szükséges volt meghatározni egy mélységgel lineárisan változó hőmérsékletteret, amit úgy írtam elő, hogy a modell felső és alsó határát izotermikusnak tekintettem, az előbbi $T_s=12$ °C, az utóbbit $T_b=16$ °C hőmérsékleten. Ez a profil 40 °C/km értékű geotermikus gradiensnek feleltethető meg, ami a Pannon-medencére jellemző karakterisztikus érték. (Lenkey és mtsai., 2021).

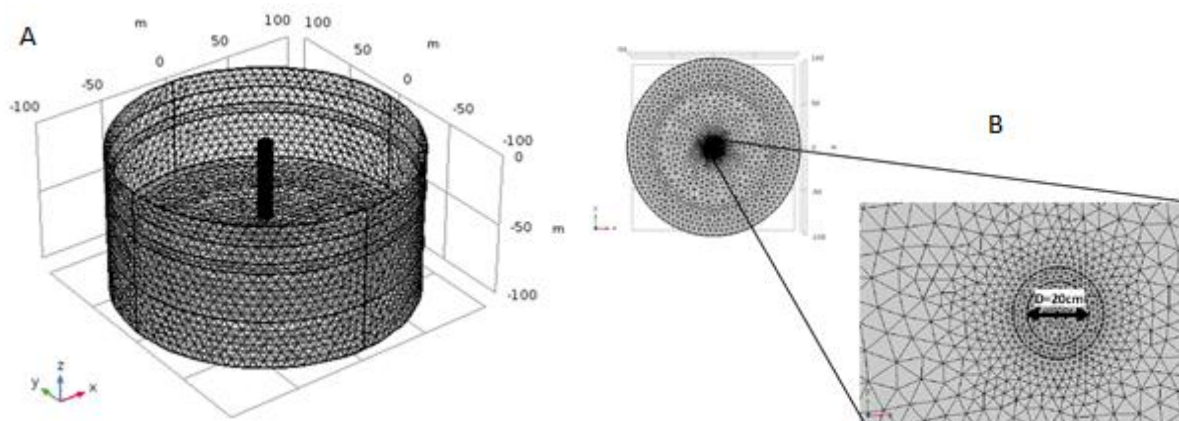
Végeselem rácsháló

A numerikus modellezésemkor a *COMSOL Multiphysics* ® nevű szoftvert vettem igénybe (Zimmermann, 2006).

A számítások elvégzésekor a szoftver az elemek ún. csomópontjaiban, azaz az elemek találkozási pontjaiban számítja ki a hőmérsékletet, majd a köztük lévő térben másodfokú Legendre-polinommal interpolálja a számított hőmérsékletet (He, 2012). A végeselemes módszer egyik előnye, hogy az elemek mérete a geometria összetettségétől, így az elérni kívánt térbeli pontosság mértékétől függően könnyen változtatható. Belátható, hogy az elemszám

növelésével a számítás pontossága (általában) javítható, azonban ez egyidejűleg a számítási idő jelentős növekedését is okozhatja.

A rácshálót (*mesh-t*) (6. ábra) azon elv mentén generáltam le, hogy a fúrólyukban és annak környezetében lehető legjobb felbontást kapjam, hiszen a hőmérsékleteloszlás a fúrólyukban, illetve annak környezetében az eltérő hővezető-képesség miatt erősen változhat. Ezért ezt a térrészt a rácshálóval elég részletesen kellett leképeznem. A fúrólyukban és annak „kiterjesztett” (acél+cement) béléscsővezetésében 2 cm-es maximális elemméretet definiáltam. A béléscső határától egészen az 5 m sugarú „segédhenger” határáig 2 cm-től radiálisan lineáris növekedést írtam elő max. 10 cm-es elemig. Ennek palástjától a modell oldalsó határa felé pedig 1,2-es növekedési hatványkitevővel növekedhetett az elemméret. Itt a maximális elemméret a 3,5 m-t érte el. A modelltér egészét tetraéderez véges elemekkel hoztam létre. Összességében minden modell esetében 90'801'497 db végelelemet generáltam le.



6. ábra. A rácsháló a) az egész modelltartományon, b) a fúrólyuk, és a béléscső környezetében

A fúrólyuk hővezető-képességei

A fúrólyuk belsejét minden modellfutás esetében víz töltötte ki, aminek $0,6 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right]$ hővezető képesség értéket definiáltam (pl. Kappelmeyer és Haenel, 1974).

A fúrólyukat körülvevő 4,5 cm vastag „kiterjesztett” béléscső anyagát homogénnek tekintettem és vízzel, acéllal vagy cementtel helyettesítettem azért, hogy lássam, hogy a különböző hővezető-képességű anyagoknak milyen hatása van a kútban mért hőmérsékletre. Nyilvánvaló, hogy egy valójában 0,7 cm vastag acél béléscső kevésbé vezeti a hőt, mint egy 4,5 cm vastag acél hengergyűrű, így a hatást jelentősen túlbecsültem volna. Ezért az acél (és a cement) hővezető-képességét csökkentettem, hogy ugyanazt a hatást érjem el, mint a valódi vastagságok esetén. A módosított hővezető-képességet effektív hővezető-képességnek neveztem el.

A bélésű henger effektív hővezető-képességét (λ_{eff}) a következő összefüggéssel definiáltam:

$$\lambda_{eff} = \frac{d}{D} \lambda_t, \quad (4)$$

Ahol D a bélésű henger vastagsága a modellben, amely minden esetben a 4,5 cm-s értéket vette fel, d az acél vagy a cement igazi vastagsága. λ_t a bélésű komponens szabvány szerinti hővezető-képessége, amelyet ISO 8301-es szabvány szerint határoztak meg, amely az acél esetében $46 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ és a cement esetében a $0,3 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ érték volt. Az effektív hővezető-képesség változóként szerepelt a modellfutások során.

A λ_{eff} effektív hővezető-képesség értéket három esetre számítottam ki, amikor a bélésű övezést csak víz, csak acél és csak cement tölti ki. A mértékegység minden esetben $[W/(m \cdot K)]$. Tehát:

$$\lambda_{eff} = \begin{cases} \lambda_{víz} = 0,6 \\ \lambda_{acél} = 7,15 \\ \lambda_{cement} = 0,253 \end{cases}$$

A fúrólyukon kívül a rétegekben lévő hővezető-képesség értékek a litológiától függően változnak. Az eredmények könnyebb értelmezése kedvéért a szimulációt először egy olyan elvi rétegsorban végeztem el, ahol három litológialag különböző réteget különítettem el, eltérő hővezető-képesség értékekkel (lásd: 1. táblázat).

A számítás válaszparamétere(i)

A hőmérséklet térbeli változását a Fourier-törvény alapján elméleti gradiens értékkel ($\mathbf{grad}T_{elm}$) lehet jellemezni, mely az elméleti hőfluxus (q_{elm}) és az elméleti hővezető-képesség (λ_{elm}) hányadosaként írható le:

$$\mathbf{grad}T_{elm} = \frac{q_{elm}}{\lambda_{elm}} \quad (5)$$

Az elméleti hővezető-képesség egy adott rétegre vonatkozó érték, míg az elméleti hőfluxust a következő összefüggés segítségével határoztam meg:

$$q_{elm} = \frac{T_b - T_{sf}}{\sum_i \frac{\Delta z_i}{\lambda_i}}, \quad (6)$$

ahol $\frac{\Delta z_i}{\lambda_i}$ az adott réteghez tartozó hőellenállás-érték, ahol λ_i az adott réteghez tartozó elméleti hővezető-képesség, Δz_i pedig a réteg vastagsága. A numerikus gradiens-t a programban a hőmérséklet profilból számítottam, de a probléma vertikális irányultsága miatt a gradiens

vektor z komponensével közelítettem azt. Majd, ezen két gradiens (elméleti és számított) eredménye közti különbséget vizsgáltam a későbbiekben.

A gradiens értékeket minden esetben 2 cm-es felbontásban mentettem ki a végeselemes modellből, ami megfelelt a fúrólyukban létrehozott rácsháló felbontásnak. Ezáltal elegendően pontos eredményt kaptam a réteghatárokon történő gradiens értékek változásairól. A modellből kinyert gradiensekből hővezető-képességet határoztam meg, amit számított hővezető-képességnek ($\lambda_{\text{szám}}$) neveztem el.

A számított hővezető-képességeket a (7)-es összefüggés alapján számoltam.

$$\lambda_{\text{szám}} = \frac{q_{\text{elm}}}{\text{grad}T_{\text{szám}}} \quad (7)$$

Eredmények

Két számítás-sorozatot végeztem: a) egy szintetikus (elvi) rétegsor és b) egy mélyfúrásgeofizikai szelvényekből meghatározott rétegtani modell, melyet „valós modellnek” neveztem el, esetében számítottam ki a geotermikus gradienst a fúrólyuk közepében. Mindkét esetben vizsgáltam a különböző anyagú béléscsővezetés hatását.

Szintetikus rétegsor

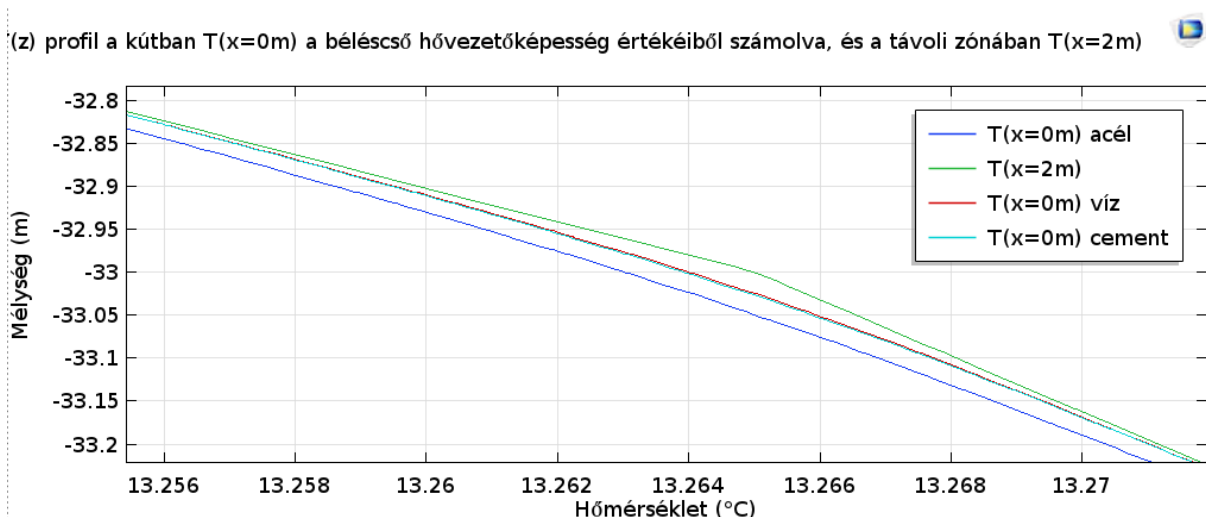
Az elvi rétegsor egy vízszintes réteghatárokból álló szintetikus rétegsor, melyeknek előre meghatározott fizikai paraméterei vannak, melyet az 1. táblázat foglal össze. A szintetikus modellemben a rétegeket, homogénnek, izotrópnak feltételeztem, így a hővezető-képesség rétegenként állandónak és skalármennyiségűnek adódott.

Réteg neve	Mélységintervallum [m]	Hővezető-képesség [W/(m·K)]
Agyagos homok	0–14	2
Homok	14–26	2,5
Agyag	26–33	1,5
Homok	33–67	2,5
Agyag	67–100	1,5

1. táblázat. Szintetikus rétegsor és hővezető-képességeik

Szintetikus modell

Az elvi rétegsorban kivitelezett három különböző eset szimulációját követően az eredmények értelmezését hőmérséklet – mélység profilokon ($T(z)$) (7. ábra), valamint az ezekből számolt hőmérsékleti gradiens – mélység profilokon ($\text{grad}T(z)$) (8. ábra) végeztem el.



7. ábra. Hőmérséklet - mélység profilok a kútban és a távoli zónában ránagyítva az egyik réteghatárra. A távoli zónában meghatározott hőmérséklet megfelel az elméleti hőmérsékletnek.

Az elméleti gradiens ($\text{grad}T_{elm}$) azt mutatja meg, hogy mennyi lenne a gradiens a távoli, azaz a fúrólukkal nem megzavart érintetlen zónában, ahol vízszintesen rétegzett a közeg. Az eredmények alapján elmondható, hogy az elméleti gradiens lépcsőfüggvény alakjához képest, a számított gradiensek a fúrólukban fokozatosan változnak a réteghatároknál; kicsit simítottabb a lefutásuk (8. ábra)

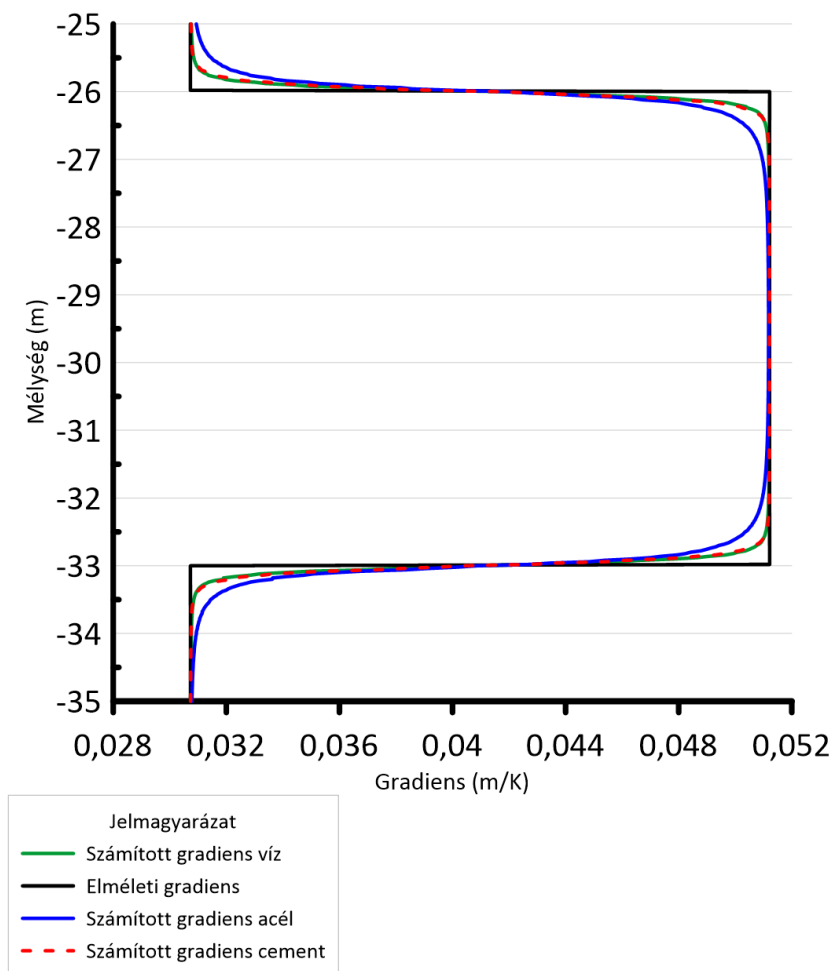
A víz és a cement béléscső hővezető-képességével modellezett gradiens profilja szinte teljesen együtt fut. Ezzel szemben, acél béléscsövet feltételezve látható, hogy a határoknál ezen esetben legnagyobb az eltérés az elméleti gradiens profilhoz képest. (8. ábra) Ez azért alakul ki, mert a rétegzett közegben elhelyezett vertikális inhomogenitás (fúróluk), is vezeti a hőt, és mivel az acél esetében a legnagyobb a fúrólukfal hővezető-képessége, ezért ott lesz ez a vezetés a legnagyobb, és így a hőmérsékletváltozás is a legsimább a réteghatáron.

A 8. ábrán látható, hogyha egy meredekebb lineáris hőmérséklet profil, azaz egy nagyobb értékű gradiens profilból váltunk át egy kisebbre, akkor a réteghatárnál erőteljesebb az acél hatása (a víz és a cement hatásához képest).

Ez a hatás úgy jelentkezik, hogy a réteghatárhoz közel, a nagyobb hővezető-képességű rétegben nő a gradiens értéke, míg a felső, kisebb hővezető-képességű rétegben (9. ábra) csökken az elméletihez képest. Abban az esetben, ha a rétegváltás fordított, a gradiens változások is megfordulnak. Tehát fordított esetben egy csökkenő/növekvő gradiens változtató profil-párost fogunk tapasztalni.

Ennek a hatása a hőmérséklet profilon úgy értelmezhető, hogy a vizsgált tartományon a hőmérsékletváltozást az acél jó hővezető-képessége lecsökkenti, és a réteghatáron jelentkező ugrásszerű átmenetet mind inkább egy folyamatos átmenetté simítja (7. és 8. ábra).

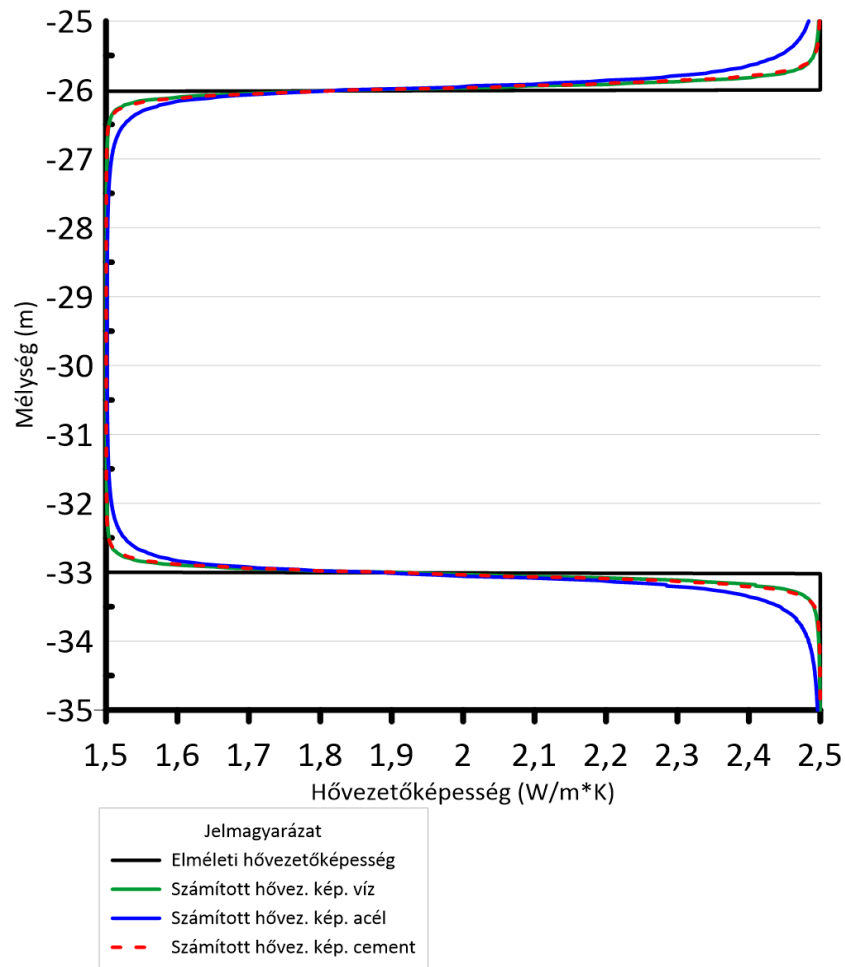
Hőmérsékletgradiens mélység profilok a szintetikus modellben a fűrőlyukban



8. ábra. Egy kinagyított szakasz a gradiens görbékből, az első réteghatár átmenetet közelebbről megvizsgálva.

A 8. és 9. ábra összevetésével megvizsgálható, hogy a hővezető-képesség és a hőmérsékleti gradiens értékek antikorrelálnak-e ahogy az a Fourier-törvény alapján elvárható lenne. Valóban antikorrelálnak.

Hővezetőképesség mélység profilok a szintetikus modellben a fúrólukban



9. ábra Hővezető-képesség profilok kinagyítva két réteghatáron

Különböző réteghatárokon történő gradiens értékek változása

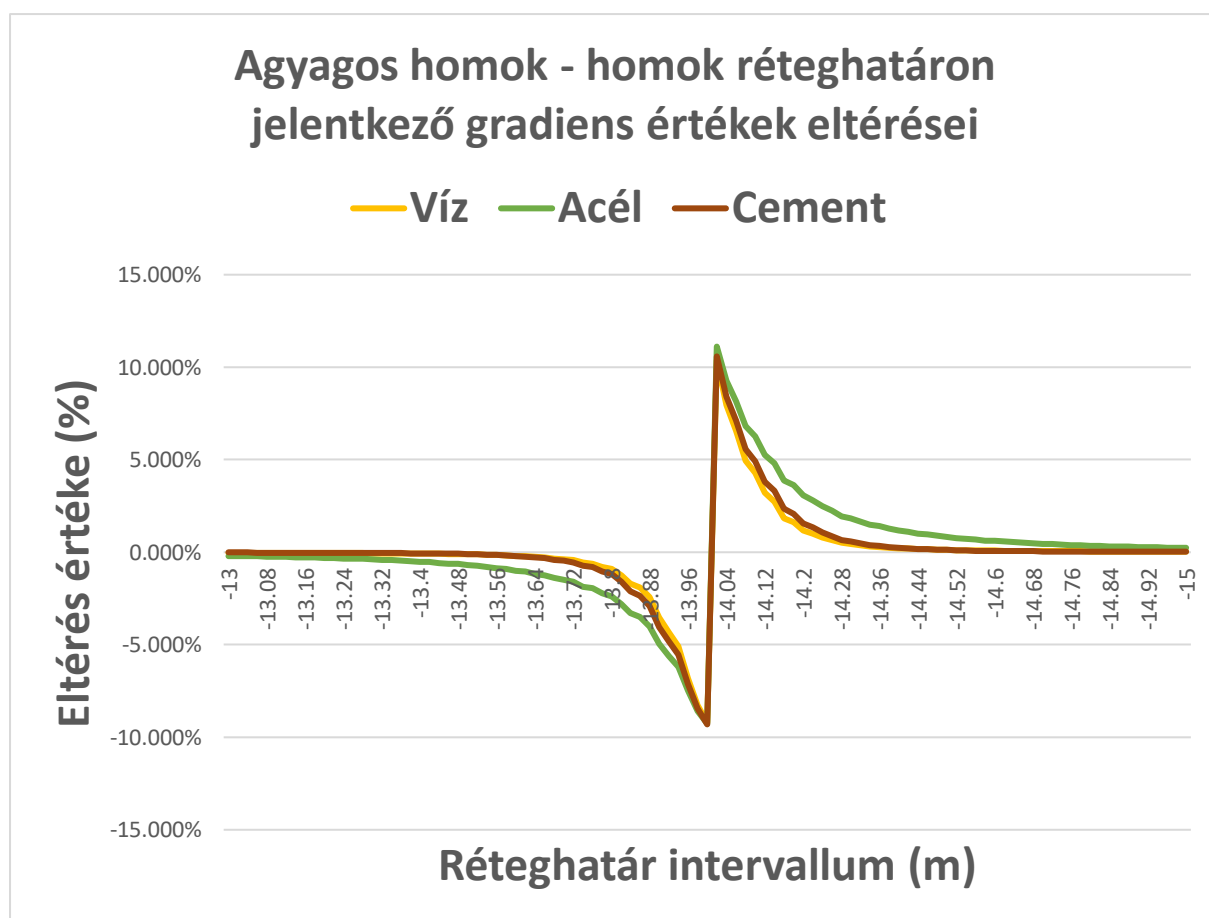
A szintetikus modellben két réteghatáron elvégeztem a számított gradiens értékek relatív torzulásait az elméleti gradienshez képest. Ezt a (8) egyenlet segítségével határoztam meg:

$$D = - \frac{(\text{grad}T_{elm} - \text{grad}T_{szám})}{\text{grad}T_{elm}} \cdot 100 \quad (8)$$

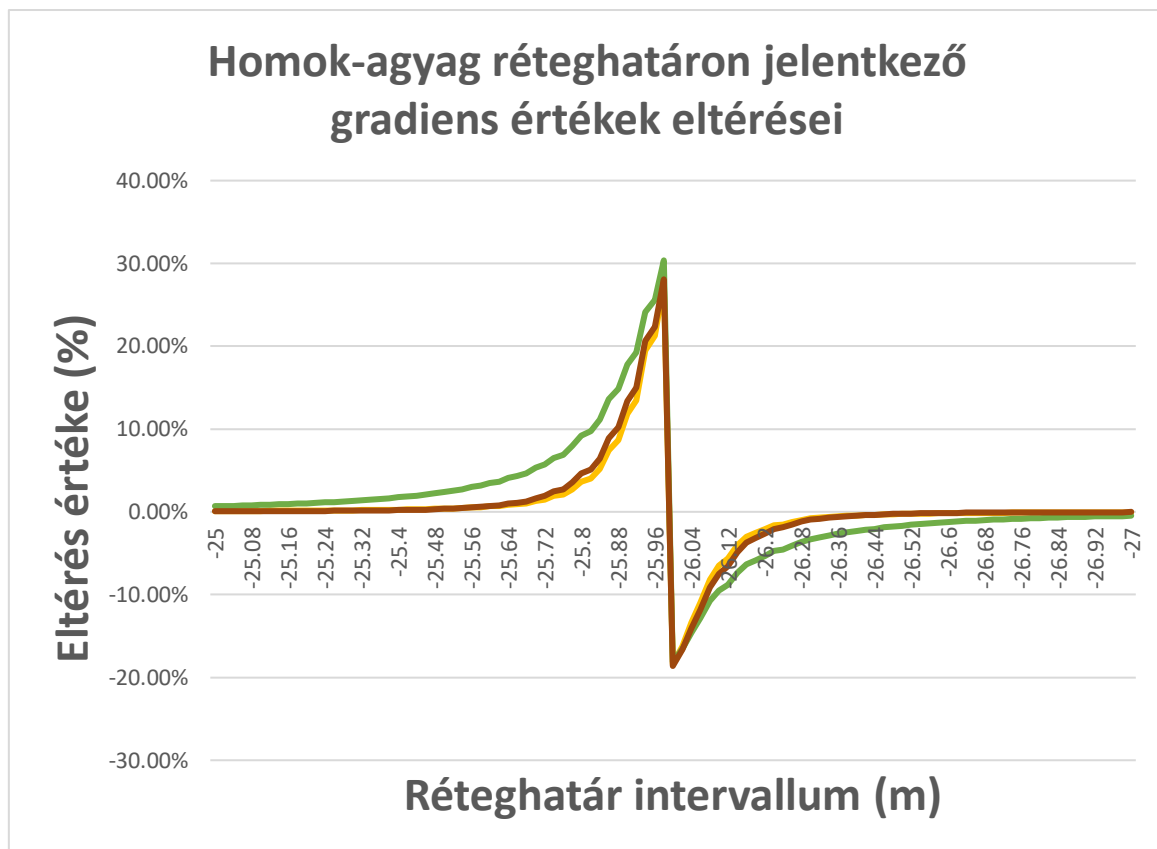
Ahol D az eltérés értéke százalékban kifejezve. A negatív előjel azért szükséges, mert a gradiens vektor képzésekor az mindig a növekedéssel ellentétes irányba mutat.

Ezeket mind a három fajta bélészsövezés esetéből számított gradiens profilokon elvégeztem. A gradiens értékek változását a réteghatártól számított ± 1 m-es intervallumban vizsgáltam meg, hiszen attól távolabb nem érzékelhető a változás. Amint azt korábban említettem, ezeket a 2 cm-es felbontással kinyert adatsorokon végeztem el.

Az egyszerűség és a rövideg kedvéért az eltérés görbéket csak a bélészsövet kitöltő anyag neve után neveztem el.



10. ábra. A 14 m mélységben lévő agyagos homok – homok réteghatáron megvizsgált különböző bélészsövezésből számított gradiens profilok eltérései az elméletihez képest.



11. ábra. A 26 m mélységben lévő homok – agyag réteghatáron megvizsgált különböző béléscsovezésből számított gradiens profilok eltérései az elméletihez képest.

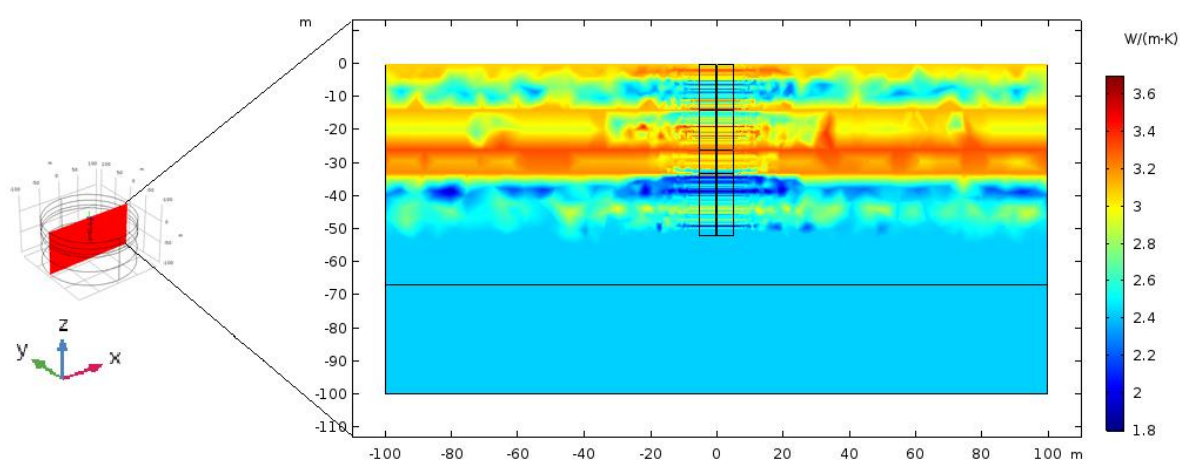
Ezen görbékkel leolvasható, hogy a réteghatártól vertikális irányban távolodva az eltérés mértéke a nullához konvergál. Ezen eltérések mértéke a réteghatártól 20 cm – re kvázi elhanyagolható.

A szintetikus modellben leírt jelenségek is megfigyelhetők ezen ábrákon. A 11. ábrán egy csökkenő/növekvő párost figyelhetünk meg, hiszen ezen rétegek hővezető-képesség kontrasztja ”növekvő” a z (mélység) tengely negatív értékei felé haladva. A 12. ábrán pedig egy ”csökkenő” hővezető-képesség kontrasztú réteghatáron figyelhetők meg a fentebb részletezett jelenségek.

Továbbá megállapítható az is, hogy minél nagyobb a rétegek hővezető-képességének kontrasztja a gradiens értékek eltérése is nagyobb mértékben jelentkezik. Jelen esetben ez azt jelenti, hogy az agyagos homok (2 [W/(m K)]) – homok ($2,5 \text{ [W/(m K)]}$) réteghatáron az eltérés maximális értéke ($\sim 11\%$) kisebb, mint a homok ($2,5 \text{ [W/(m K)]}$) – agyag ($1,5 \text{ [W/(m K)]}$) határon, ahol ez az érték ($\sim 30\%$).

Valós modell

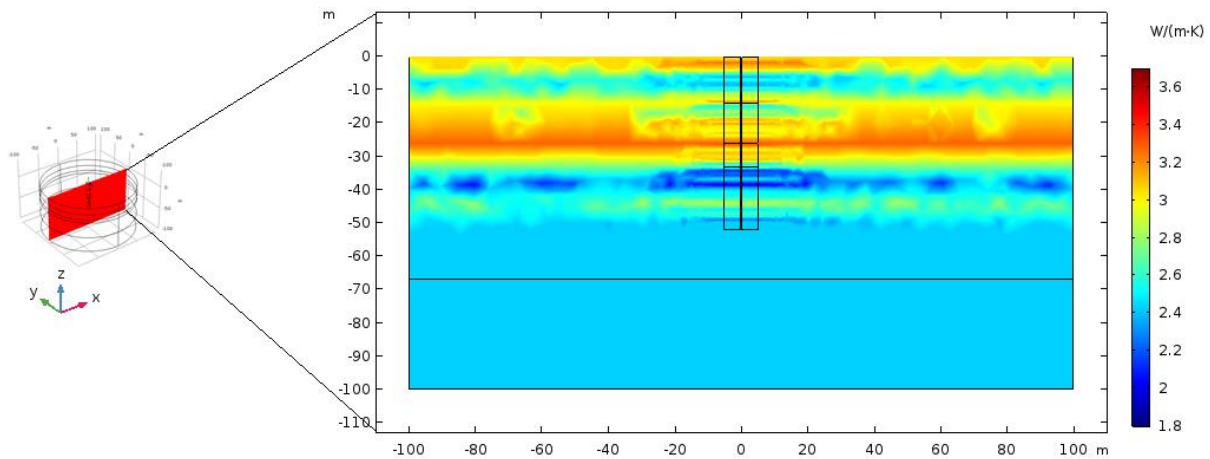
Az elvi rétegsor vizsgálata után egy, a valóságot jobban megközelítő példán keresztül is szerettem volna alkalmazni a módszert, ezért a Mikepércs-1 mélyfúrási adataiból számított hővezetőképesség-mélység profilt (Mihályka és mtsai., 2022) is betápláltam a felállított modellembe, úgy hogy az a fúrólukon kívüli térrészben legyen érvényes. Az adatsorban 10 cm-es mélységközönként vannak értékek 500 m és 560 m között. Ezeket a mélységeket nullára normáltam, hogy a modellbe be tudjam illeszteni, valamint az alsó 10 m-t is levágtam belőle hiszen a kút alja a numerikus modellben 50 m-ben véget ér. Valamint az 50 m-ben levő értéket extrapoláltam ki a modell aljáig (10. ábra).



12. ábra. Az eredeti adatsorból számolt rétegsor hővezető-képességek formájában (Mihályka és mtsai. 2022)

Mivel az adatsor "csak" 10 cm-es felbontású ezért várható volt, hogy a véges-elemes szoftver a nem csomópontokra eső értékeket interpolálja a fúrástól távol. A rácsháló felbontásának köszönhetően a fúróluk környezetében jól kivehetőek a finomabb, vékony rétegek is, míg attól távolodva a hővezetőképesség-eloszlás egyre inkább összemosódott, az eredeti adatsorral már össze sem vethető rétegsor látható.

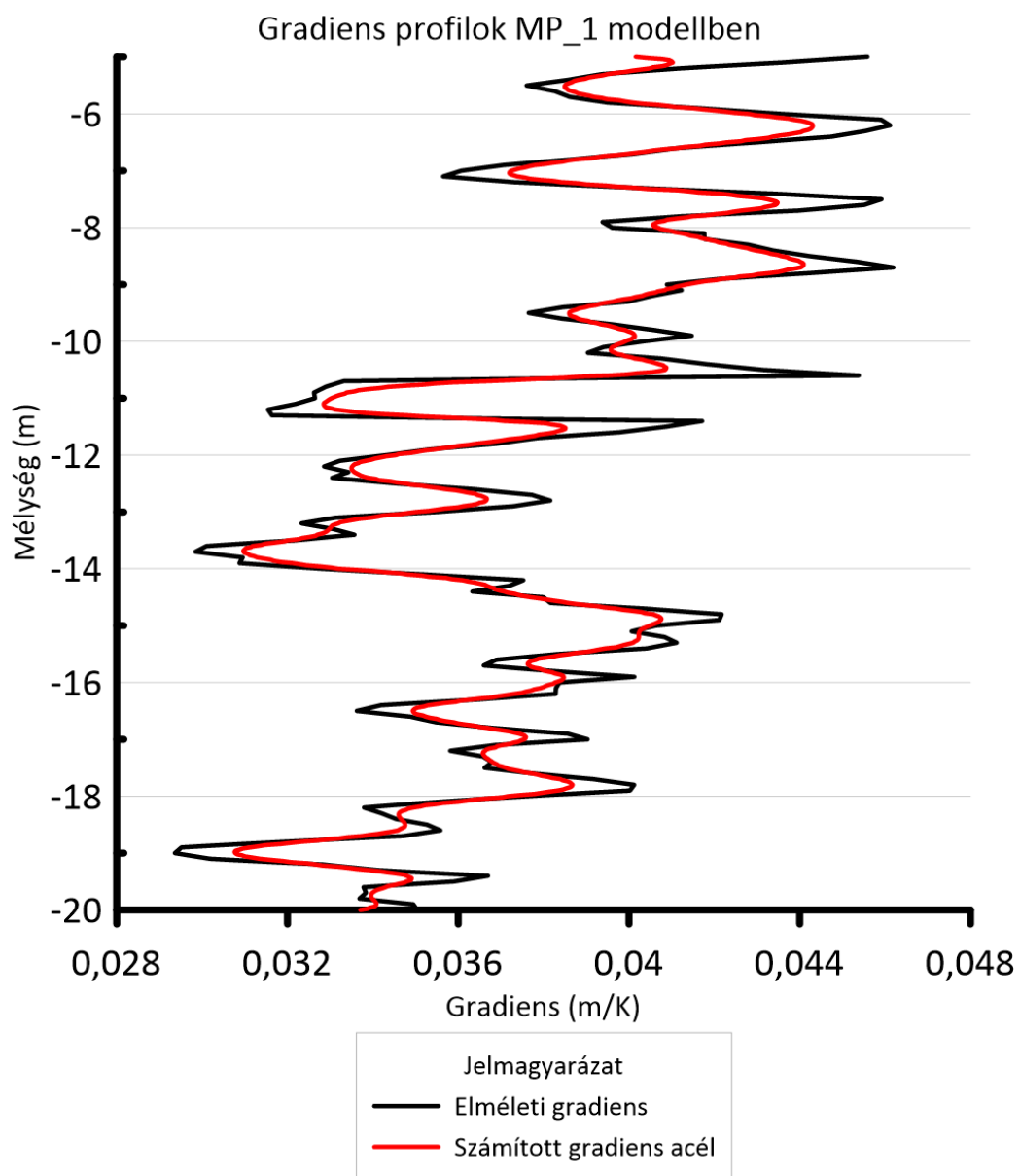
A szintetikus rétegsorral ellátott modellben végzett paramétervizsgálatokat itt is elvégeztem, de ez esetben 2 fajta adatsoron. Az eredeti adatsoron (13. ábra), amit a fúrési log-ból kaptam, majd ezt az adatsort 11 tagos futóátlagolással megkapott értékein (14. ábra) ismételten elvégeztem ezeket.



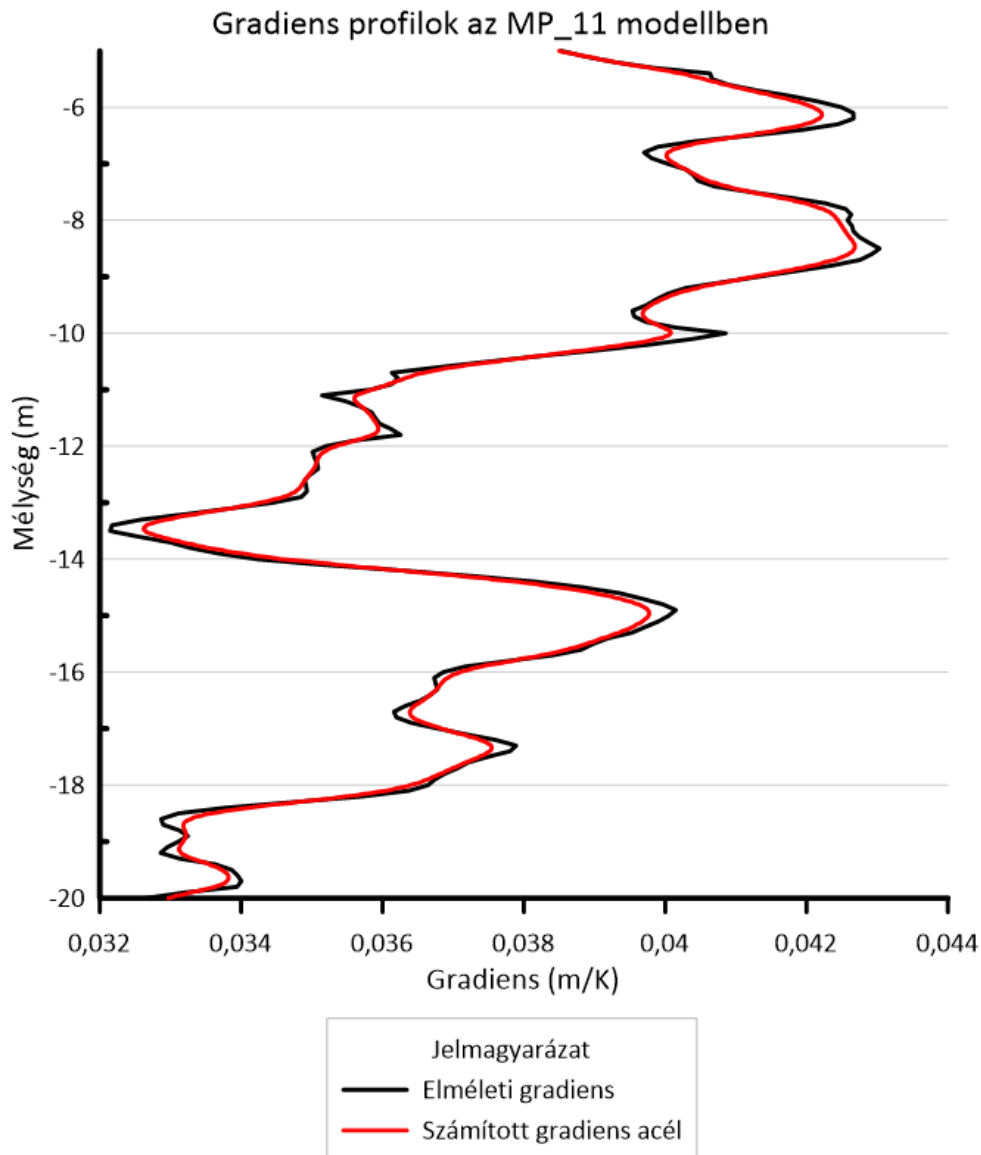
13. ábra. A 11 tagos futóátlagolással megkapott adatsorból számolt rétegsor hővezető-képességek formájában. (Mihályka és mtsai. 2022)

A szintetikus rétegsorral számolt modellben levont következtetések itt is fenn állnak. A log adatokból származtatott hővezető-képességek abszolút értékben nagyon változékonyak ($\cong 30\%/m$) emiatt a gradiens értékek ($\cong 30\%/m$) is azok lesznek. Ezért ezen ábrákon csak egy kinagyított intervallumon (5 m - 20 m mélységig) ábrázoltam a vizsgált görbéket.

Valamint abból a megfontolásból ki indulva, hogy a legnagyobb változást a hőmérsékletben és annak gradiensében az acél béléscsővezés okozza, ezért ezekben az esetekben csak annak a hatását ábrázoltam az ábráimon.



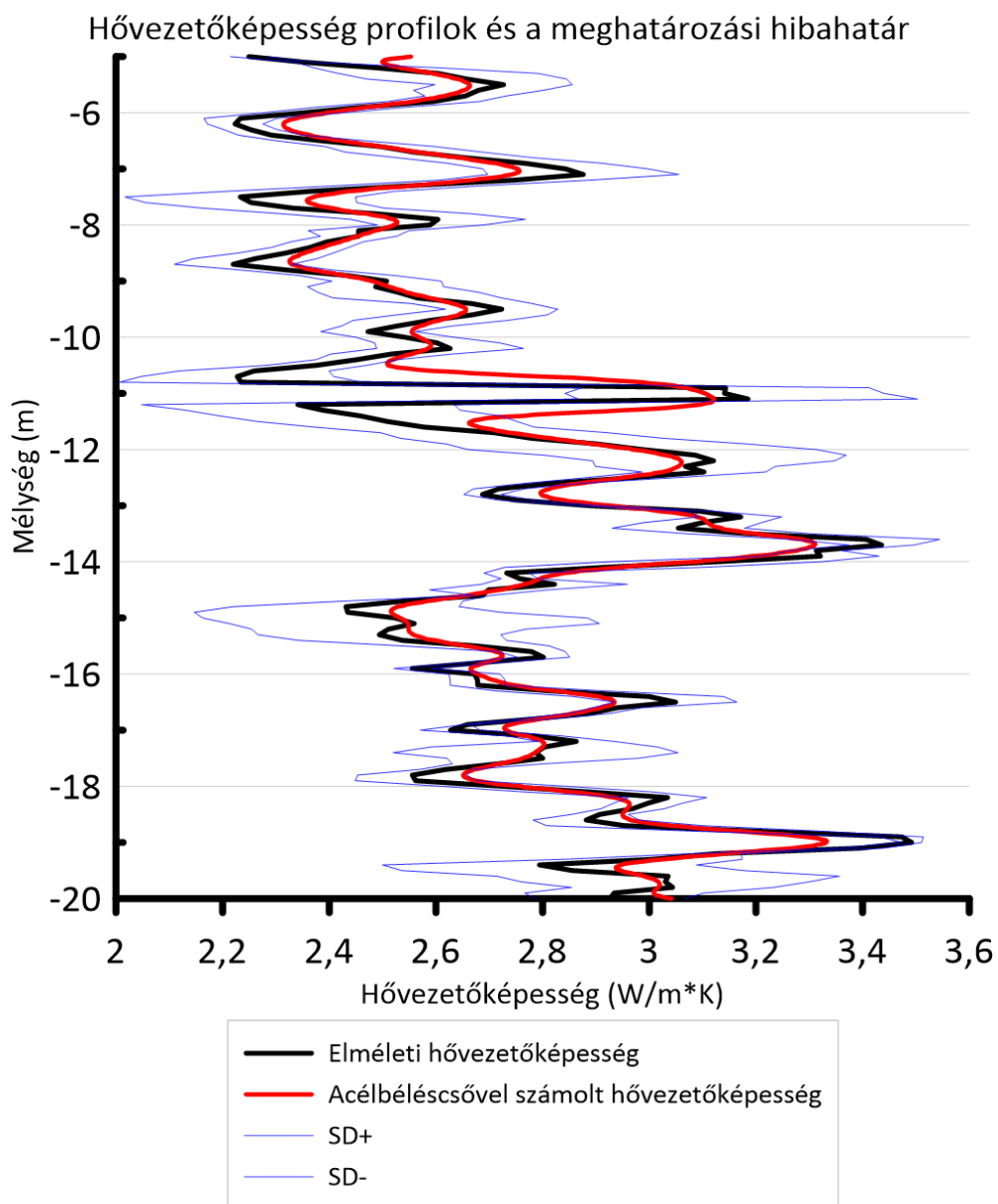
14. ábra. Mikepércs-1 fúrési adatsorból nyert elméleti és modellezés eredményéből kiolvasott gradiensprofil



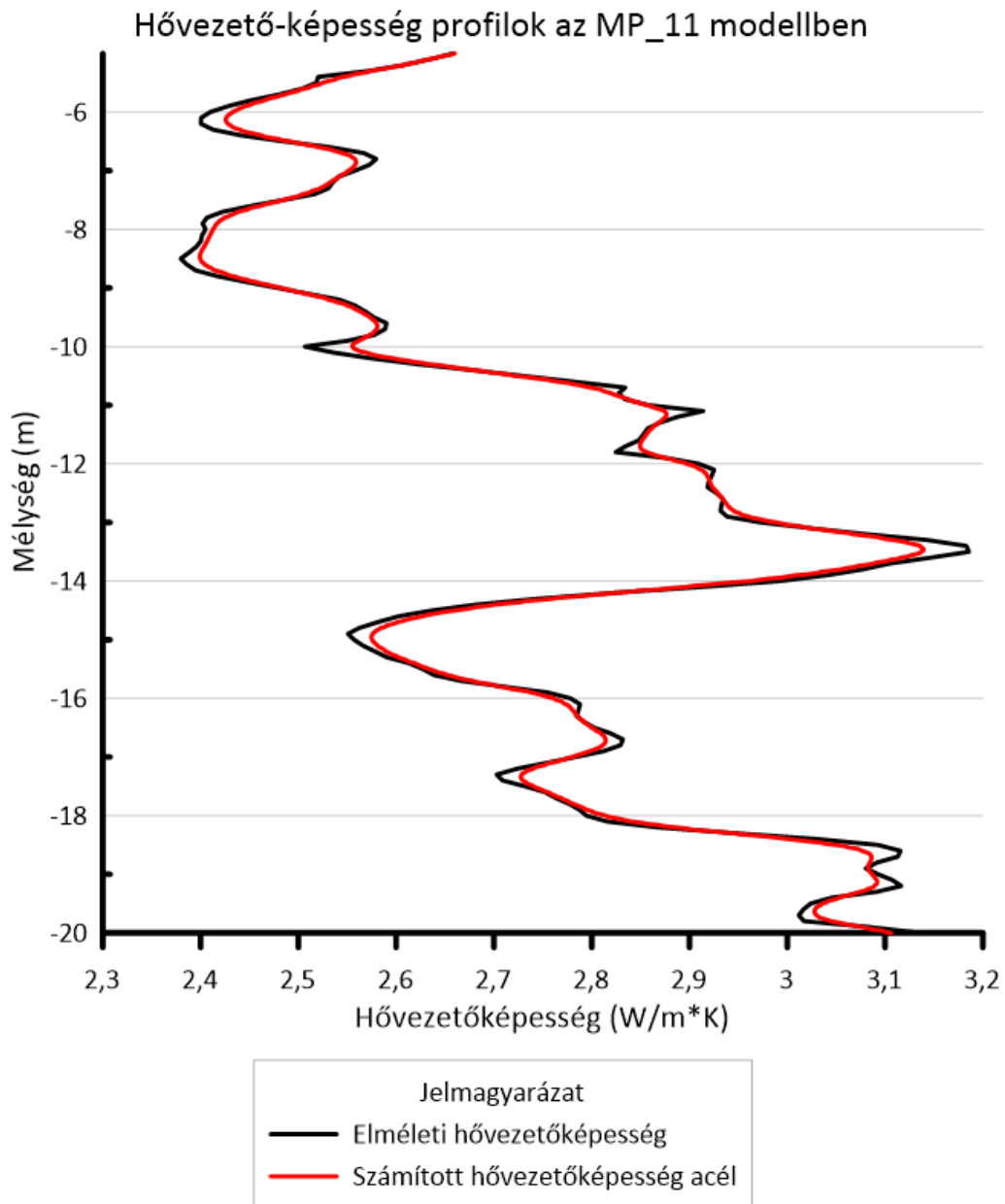
15. ábra. Mikepércs-11 tagú futóátlagolt adatsorból nyert elméleti és modellezésből kiolvasott gradiensprofil

Amíg az eredeti adatsorban a vékonyabb rétegek következtében erőteljesebb a gradiens eltérés az elméletihez képest, addig a 11 taggal futóátlagolt, (kisimított) adatsorból számolt gradiens profil már jobban követi az ezen modell 'elméleti' értékeit. A kérdés az, hogy mennyire jelentős az eltérés.

Az egész profilra vett átlagos eltérés az elméleti és az acélcsőből számolt gradiensek között az eredeti adatsorban 0,13%, míg a futóátlagolt adatsorban -0,02%-ra adódott. Ez a vékonyabb rétegek eltűnése és ezáltal a hővezető-képesség profil egyenletesebb lefutásának tudható be.



16. ábra. Mikepércs eredeti adatsorból nyert elméleti és számolt hővezető-képesség profil.



17. ábra. Mikepércs11 tagú futóátlagolt adatsorból nyert elméleti és számolt hővezető-képesség profil.

Ezen modellekben a hővezető-képesség adott volt, ezért jelen esetben a megadott hővezető-képességek és az ebből számolt elméleti hőfluxusból lehetett elméleti gradiens profilt számolni az (5)-ös képlet alapján. Valamint, az eredeti adatsorral társult egy két oldalú meghatározási hibahatár (17. ábra), amely megmutatja milyen pontossággal becsülték meg a hővezető-képességeket (Mihályka és mtsai., 2021). Ennek a hibának az átlagos értéke 5,5%. Ezen az ábrán az is látszik, hogy az elméletileg legnagyobb gradiens eltérést eredményező acél béléscsővezéssel számolt hővezető-képesség profil is jóval ezen a hibahatáron belül mozog.

A hővezető-képességek profilok esetében is megállapíthatóak azok a megfigyelések, amiket a gradiens profiloknál megtettünk. A 11 taggal futóátlagolt adatsorban jobban illeszkedik a számított hővezető-képesség az elméletihez mint az eredeti adatsorban. Természetesen itt is fennáll az antikorreláció a gradiensekkel minden esetben.

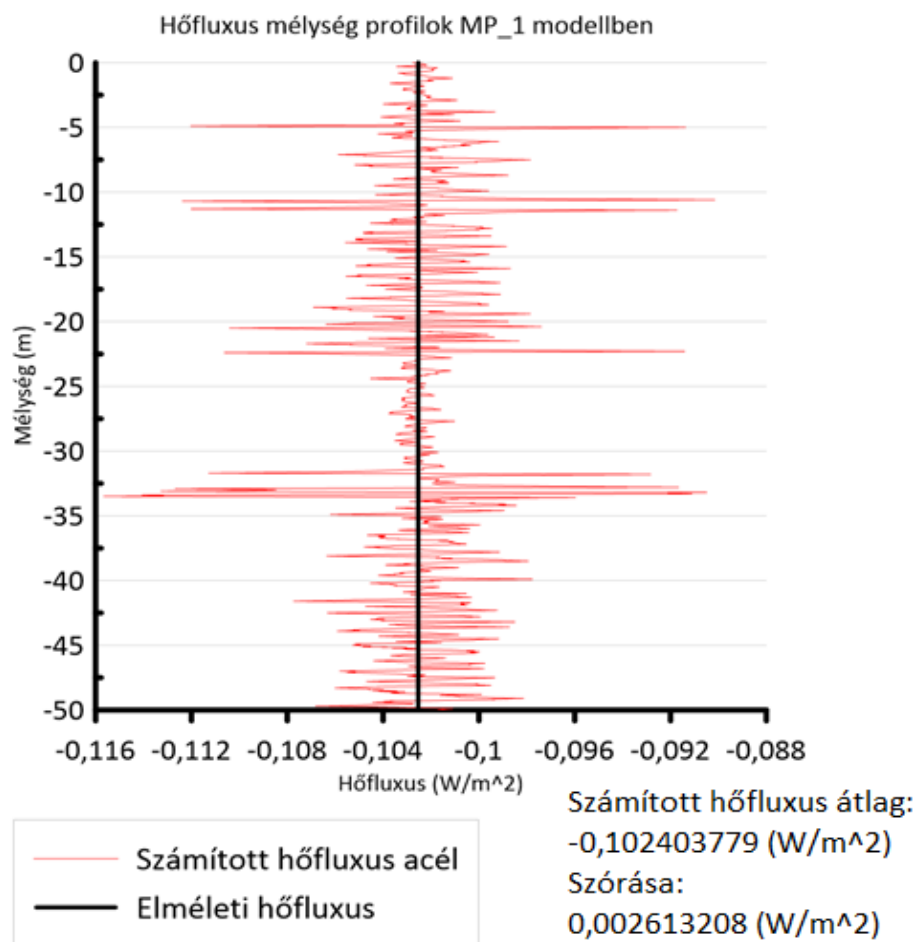
Hőfluxusok

Az alábbi táblázatban (2. táblázat) ismertetem az elméleti és a számolt hőfluxusokat a különböző modellekben.

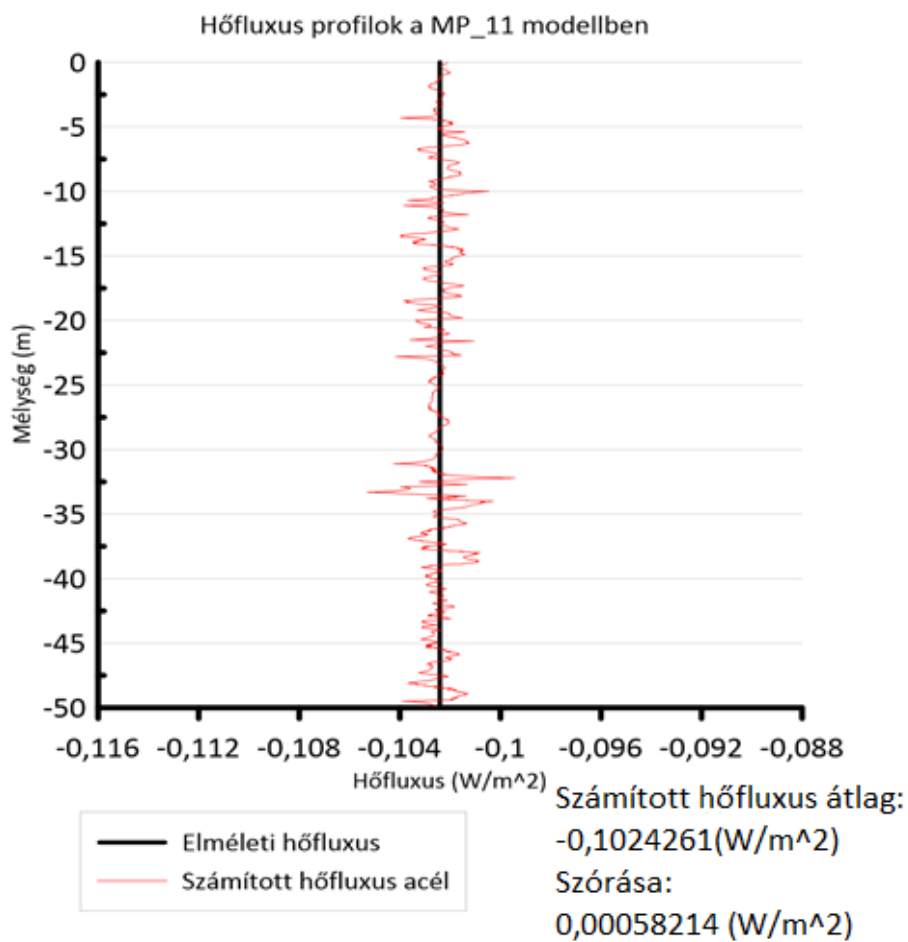
	Elméleti hőfluxus (mW/m ²)	Számított hőfluxus (mW/m ²)		
		Víz	Acél	Cement
Szintetikus modell	81,111	81,159	81,202	81,162
MP_eredeti	102,403	102,641	102,701	102,654
MP_11es_futóátlagolt	102,426	102,419	102,435	102,420

2. táblázat. Elméleti és számított átlag hőfluxusok a modellekben, a mértékegység mW/m².

A 19. és 20. ábrán látható az elméleti és a számított hőfluxusok mind az eredeti, mind a simított adatsoron. Megfigyelhető továbbá az is, hogy az eredeti adatsorban a vékonyabb rétegek okán változékonyabb a hőfluxus mélység profil, mint a simított adatsoron. Ez abban is megmutatkozik, hogy a szórása a számított hőfluxusoknak a simított adatsorban egy nagyságrenddel kisebb (0,6 [mW/m²]), mint az eredetiben, ahol ez az érték (2,6 [mW/m²]). Ez a simított adatsorban 0,5%-os, míg az eredeti adatsorban 2,5%-os meghatározási pontosságot jelent.



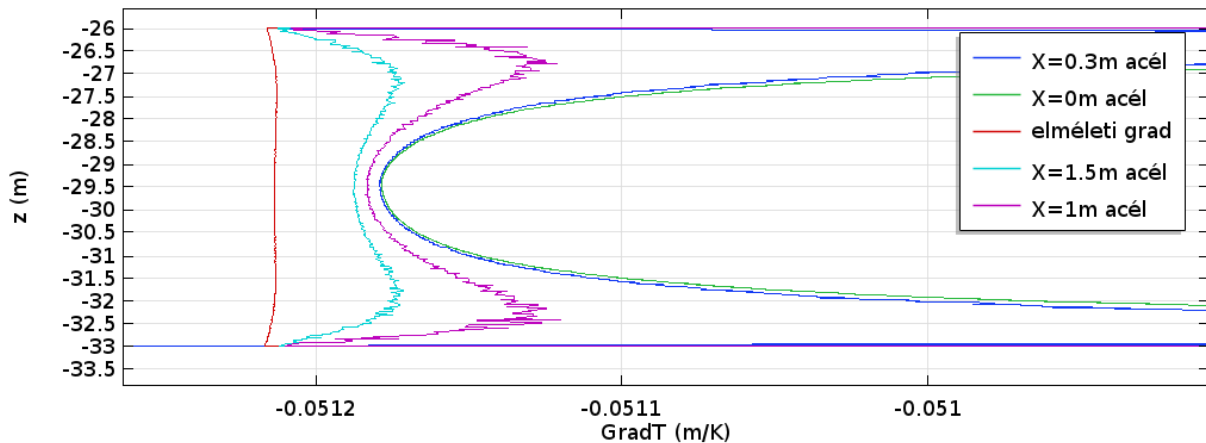
18. Ábra Elméleti és számított hőfluxus az eredeti adatsorból számított modellből



19. Ábra Elméleti és számított hőfluxus a simított adatsorból számított modellből

A fúrólyuk hatása a távoli zónában

Annak érdekében, hogy a fúrás hatását megvizsgáljam annak környezetében, a távoli zónából mintavételeztem 30 cm-től 1,5 m-ig, ahonnan is a kinyert hőmérséklet gradiens értékeket vettem össze egymással. Ugyanazon indokok miatt, mint az előző esetekben csak az acél béléscsővel számított gradiens értékeket vizsgáltam. Megfigyelhető, hogy a fúrólyuktól radiálisan 1 m távolságban is van hatása a fúrólyuknak a gradiens értékekre. Ez ugyanakkor már közel sem olyan szignifikáns, mint 30 cm távolságra, ahol szinte még kvázi ugyanazon értékeket veszi fel a gradiens görbe, mint a fúrólyuk belsejében.



20. ábra A fűrólyuk hatása a távoli zónában az acélcső hővezető-képességének értékéből számított gradiens alapján a 26-33 m-en elhelyezkedő agyag rétegben

Következtetések

Összességében elmondható, hogy a számított gradiensek különböznek az elméleti gradiensektől, következésképpen a számított hővezető-képességek is különböznek az "igazi" (elméleti) hővezető-képességektől. A bélésűcsövezések közül az acél hővezető-képességével számolt gradiensek tértek el a legjobban az elméleti gradiensektől, ezáltal az azokból számított hővezető-képességek is. A víz és a cement bélésűcsövezés között kvázi nincs különbség, viszont ezek is okoznak kisebbfajta eltéréseket.

Ha a hővezető-képességet hőáramszámításra használjuk, akkor a hőellenállások majdnem egyformák minden modellezett esetben, következésképpen a számított hőfluxusok maximum csak tizedekben térnek el, ha mW/m^2 -ben adjuk meg a fluxust. Vagyis kvázi ugyanazt a fluxust eredményezik (2. táblázat). Ez azért van, mert a hőellenállás számításakor kiátlagolódnak a hővezető-képességek, amik hol nagyobbak, hol kisebbek az elvi hővezető-képességnél. Tehát az elvi rétegsorral ellátott numerikus modellezés arra volt jó, hogy megállapítsuk a módszer pontosságát, és megvizsgáljuk a különböző bélésűcsövezéssel ellátott fűrólyukban számított geotermikus gradiens profil viszonyulását a valós gradiens profiljához képest.

Az a kérdés, hogy mire akarjuk használni a gradT -ből számított látszólagos hővezető-képességeket. Ha hőfluxus számításra, akkor tökéletes, hiszen ezen számítások pontossága 1-3% körüli. Ilyen esetekben a módszer meghaladja a mélyfúrás-geofizikai szelvényekből számolt (5%, Mihályka és mtsai., 2021) és a laboratóriumi körülmények között mért hővezető-képességek (10%, Dövényi és Horváth 1988) pontosságát. Ha a logból számított hővezető-képességgel való összevetésre, akkor nem feltétlenül, mert ekkor eltérhet a számított hővezető-

képesség a lyukban mért vagy ("igazi") hővezető-képességtől, ha 10 cm-es skálán vetjük össze őket. Ha kiátlagoljuk a hővezető-képességeket, akkor erre is alkalmas a gradT. Ezt mutatja a simított hővezető-képességgel történt számítás, amely esetében alig térnek el a látszólagos hővezető-képességek az elméleti hővezető-képességtől.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Dr. Lenkey Lászlót és Dr. Szijártó Márkot a témavezetésért, hasznos tanácsaikért, és segítőkészségükért. Valamint Mihályka Jánost is, aki a valós modellbe betáplált hővezető-képesség adatsort szolgáltatatta.

Irodalomjegyzék

- A. ARTAMONOV, REPINA. I., VICTOR S. 2021 Derivation of Heat Conductivity from Temperature and Heat Flux Measurements in Soil
- A. SHAKIROV, E. CHEKHONIN, Y. POPOV, E. POPOV 2021 Rock thermal properties from well-logging data accounting for thermal anisotropy
- DÖVÉNYI, P. AND HORVÁTH, F, 1988. A review of temperature, thermal conductivity, and heat flow data from the Pannonian Basin. In: L.H. Royden and F. Horváth (Editors), The Pannonian Basin, a Study in Basin Evolution. Amer. Assoc. Petr. Geol. Mem., 45: 195-233.
- ERKI, I., 1984. Vizsgálatok a kőzetek hővezetőképességének köréből. Egyetemi doktori dolgozat, ELTE, Budapest. (Study of the thermal conductivity of rocks. PhD thesis. Eötvös University, Budapest), pp. 1-192.
- HE, M. (2012): Numerical Modelling of Geothermal Boarehole Heat Exchanger Systems PhD Thesis, De Montfort University, Leicester, UK, pp. 183. Jessop, A.M. 1990. Thermal geophysics, Elsevier, Amsterdam, pp. 306.
- KAPPELMEYER, O. AND HAENEL, R., 1974. Geothermics with special reference to application. Geoexploration Monographs, Series 1 - No.4., Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, pp. 238.
- KISS ZS., SZIJÁRTÓ M. 2017. Egykutas hőcserélő szonda numerikus vizsgálata szintetikus és valós geológiai környezetben. OTDK pályamunka.
- MIHÁLYKA, J., PARÓCZI, P. ÉS LENKEY, L. 2020. Heat Flow density determinations in Hungary using well-logs, Geosciences and Engineering, 8, 45-69.
- LENKEY, L., MIHÁLYKA, J. AND PARÓCZI, P., 2021. Review of geothermal conditions of Hungary. Földtani Közlöny, 151/1, 65-78.
- POPOV, Y., BEARDSMORE, G., CLAUSER, C., ROY, S., 2016. ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. Rock Mech. Rock Eng. 49 (10) doi.org/4179–4207.367:012017.
- ZIMMERMANN W., B., J., 2006: Multiphysics modeling with finite element methods. World Scientific Publishing Company Singapore pp. 422, ISBN: 981-256-843-3

Absztrakt

A dolgozatomban azt vizsgáltam, hogy számolható-e a kutakban mért geotermikus gradiens a rétegek hővezető-képességének meghatározására. Véges elemes numerikus módszerrel modelleztem 3 esetet Comsolban. Először is egy szintetikus rétegsorral felruházott modellbe vizsgáltam meg a gradiens és hővezető-képesség profilok egymáshoz viszonyított változásait különböző hővezető-képességű béléscsővezetések esetén. Majd egy fúrás szelvényből betáplált adatsort interpoláltam ugyanezen rácshálós felosztott numerikus modellbe. Ebből két modellt is gyártottam, az eredeti adatsorral számított modellt, majd az eredeti adatsornak a 11 taggal futóátlagolt modelljét. Bemutattam miként viselkednek ezen modellekben számított gradiens és hővezető-képesség profilok. A szintetikus modellben továbbá még arra is kitértem, hogy különböző hővezető-képesség kontrasztú réteghatárok esetén a gradiens értékek mekkora mértékben térnek el (10-30%) az elméleti értékekhez képest. Ugyanakkor ezen eltérések csak a réteghatártól vertikálisan nézve ± 20 cm-ig érvényesek, attól távolabb a 0-hoz konvergálnak. Ezekből az eredményekből levontam azt a következtetést, hogy ha a hővezető-képességet hőáramszámításra használjuk, akkor a hőellenállások majdnem egyformák minden modellezett esetben, következésképpen a számított hőfluxusok is csak tizedekben térnek el ha mW/m^2 -ben adjuk meg a fluxust. Vagyis kvázi ugyanazt a fluxust eredményezik. Ezek után diszkutáltam, hogy ha a **gradT**-ből számított látszólagos hővezető-képességeket hőfluxus számításra szeretnénk használni, akkor az nagy pontossággal megtehető, mivel ezen számítások hibája 1-3% körüli. Ha a logból számított hővezető-képességgel való összevetésre, akkor nem feltétlenül, mert ekkor eltérhet a számított hővezető-képesség a lyukban mért vagy ("igazi") hővezető-képességtől, ha 10 cm-es skálán vetjük össze őket. Ha kiátlagoljuk a hővezető-képességeket, akkor erre is alkalmas a **gradT**. Ezt mutatja a simított hővezető-képességgel történt számítás, amely esetében alig térnek el a látszólagos hővezető-képességek az elméleti hővezető-képességtől. Valamint azt a következtetést is levontam a szintetikus modell eredményei alapján, hogy a fúrólyuk béléscsővezetésének a hatását, és ezáltal a számított gradiensek eltérésének az átlagát akkor lehet minimalizálni, ha minél jobb hőszigetelő bélést alkalmazunk.