

**JOBBIK ANITA<sup>1</sup>—SÓREG VIKTOR<sup>2</sup>**

## **A FÖLDKÉREG HŐTARTALMÁNAK HASZNOSÍTÁSA MÉLYSÉGI HŐCSERÉLŐFELÜLET KIALAKÍTÁSÁVAL<sup>3</sup>**

*Tudományos kutatómunkánk során a természetes vízbázist nem érintő, víztermelés nélküli, Hot Dry Rock technológia, felszín alatti elemeinek, tanulmányozásával foglalkoztunk. A matematikai modellezés során, a mesterségesen kialakított földalatti hőcserélő-felületben lejátszódó termikus és hidraulikus folyamatok valóság-hű modelljének elkészítésére fókuszálva. Összeállítottuk a Hot Dry Rock technológián alapuló geotermikus energiatermelő rendszer matematikai modelljét. A fogalmi és a matematikai modell megalkotása során arra törekedtünk, hogy a méreteiben és megismerhetőségében is nebezen kezelhető rendszert leíró modell alapjai „egyenszilárdságúak” legyenek. A bemutatott szimulációs modell alkalmas, egy potenciális helyszíntre tervezett, HDR rendszer viselkedésének analízisére. Egy geotermikus projekt megvalósíthatósági tanulmányának készítése során az általam definiált rezervoárjellemzők, döntés előkészítő, támogató szerepet kaphatnak.*

### **1. ELŐSZÓ**

A világ minden országának és gazdasági szervezetének működésében az energia meghatározó és kulcsfontosságú szerepet tölt be. Általánosan elmondható, hogy az energiaforrások és felhasználási helyeik térben és időben nem azonosak.

A világ fejlődésének egyik nagy kihívása a jövőben, hogy az iparilag legfejlettebb országok (néhány speciális kivételtől eltekintve) akkut energiahíánnyal szembesülnek majd, ezzel párhuzamosan a nagy ütemben fejlődő országok (Kína és India) energiaigényei jelentősen növekedni fognak. A primer energiaforrások beszerezhetősége számos országot komoly függőségi viszonyba kényszerít. Mindezek ösztönzőleg hatnak a nemzeti- és közösségi energiapolitika alakítóra, hogy a forrásfelhasználás legoptimálisabb és legbiztonságosabb lehetőségeit felkutassák.

A klímaváltozás, az energiaellátás biztonsága, a fenntartható fejlődés, a CO<sub>2</sub> kvóta fogalma és kereskedelme, csak a legfontosabbak azon tényezők közül, melyek a megújuló energiaforrások szélesebb körű hasznosítására készítetik az emberiséget.

---

<sup>1</sup> MOL Nyrt. ajobbik@mol.hu

<sup>2</sup> MOL Nyrt. vsoreg@mol.hu.

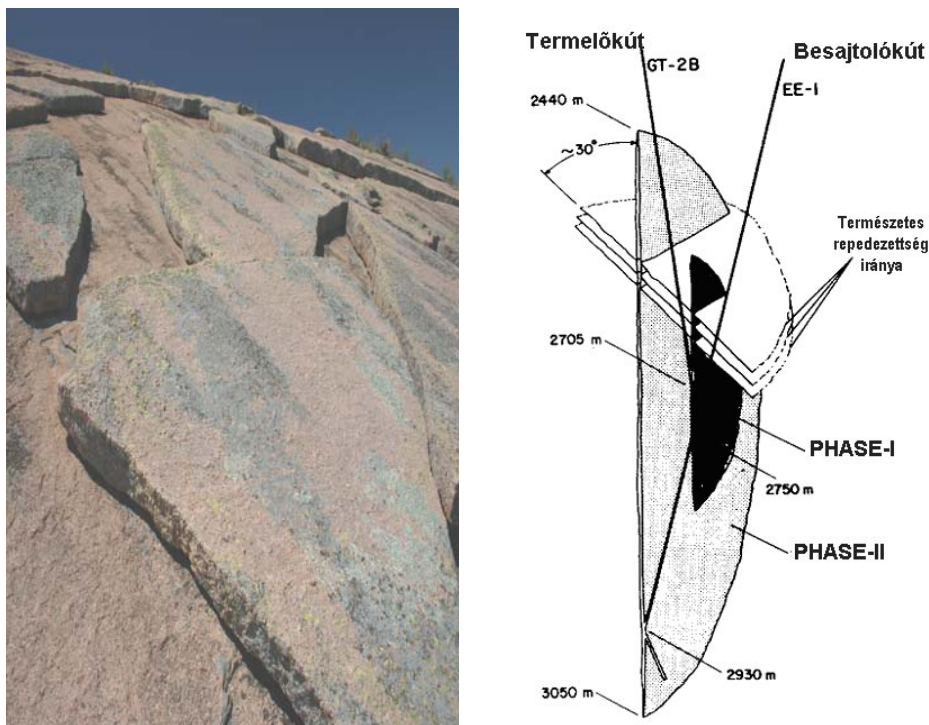
<sup>3</sup> Szaklektorált cikk. Leadva: 2009. szeptember 15. Elfogadva: 2009. december 10.

## 2. HOT DRY ROCK KONCEPCIÓ

A geotermikus energiahasznosítás lehetőségei között, fokozott érdeklődés övezi az úgynevezett EGS (Enhanced, or Engineered Geothermal System) rendszereket. Az EGS rendszerek körébe tartozó, a természetes vízbázist nem érintő HDR (Hot Dry Rock) elvi megfogalmazására az első olajválság idején az 1970-es években került sor. Az elvet az Egyesült Államokbeli Los Alamos Scientific Laboratory (New Mexico) atomfizikusai fektették le [1]. Az elgondolás alapja a kimeríthetetlen belső energiátartalommal bíró, de elérhető mélységben lévő forró kristályos kőzetek hőtartalmának kinyerése és hasznosítása elektromos energia termelésére. A forró száraz kőzetek energiátartalmának kinyerése a kőzetben lévő, vagy létrehozott (mesterséges) hőcserélő-felület és a benne áramló munkaközeg segítségével történhet (1. ábra).

A HDR rendszer zárt ciklusú, melyben a besajtoló kúton keresztül lejutatott hideg víz a föld alatt létrehozott rezervoárban felmelegszik, a termelő kúton keresztül a felszínre jut, majd a felszíni erőművi technológián keresztül haladva leadja belsőenergia-tartalmának egy részét és végül a lehűlt fluidum, visszasajtolásra kerül.

Az első megvalósított mesterséges geotermikus energiatermelő rendszer ROBINSON (1971) javaslatára épült New Mexico-ban. Az USA geológiai szolgálata által gyűjtött és feldolgozott földtani, hidrológiai és hőáram adatai alapján egy a közelmúltban még aktív, vulkanikus területet választottak ki. A Los Alamos Scientific Laboratory ekkor kezdte el HDR-kísérlet sorozatát. A Fenton Hill-i kísérleti telepen 1973-74-ben hidraulikus rétegrepesztéssel hozták létre az első mesterséges, egyetlen hatalmas repedés alkotta hőcserélő-felületet. A közel 3000 m-es mélységben kialakított repedést egy besajtoló és egy termelő kút metszette. A mélyebben elhelyezkedő lyuktalpon a hőmérséklet 195°C volt.



1. ábra. Természetesen repedezett gránit és a Fenton Hill-i kísérleti HDR rendszer.

A tesztek során méréseket és megfigyeléseket végeztek a hőcserélő felületének meghatározása érdekében. Vizsgálták a rendszer hőmérsékletének és hidraulikai ellenállásának változását, a vízvesztéséget, illetve azt, hogy hogyan befolyásolja a víz cirkulációja a rendszer állapotát; vagyis milyen módon oldja a víz az ásványokat, és miképpen módosítja a repedésrendszert.

Az első tapasztalatok várakozáson felüliek voltak; meglehetősen kis mértékű volt az észlelt vízvesztés és alacsony volt a rendszer hidraulikai ellenállása, továbbá nem volt szükség kítámasztó anyagokra sem a rés nyitva tartásához, mivel a létrehozott repedés két felületének egyenetlenségei és a repesztést követően kis mértékű elmozdulása megakadályozta a visszazáródást. A Phase-I termikus teljesítmény 3 MW volt, a mérések alapján a hőcserélő felület nagysága csak 8000 m<sup>2</sup> körüli volt, ami jóval kisebb volt, mint a létrehozott repedés felülete.

1983-ban kezdődött egy másik, ez elsónél jóval nagyobb és mélyebben elhelyezkedő HDR tároló kialakítása szintén a Fenton Hill kísérleti telepen. A mesterséges rezervoárt két 4500 méter mélységű kútpár metszette, melyek az utolsó 1000 m-en 30°-os szögben voltak elferdítve. A lyuktalpon a hőmérséklet 327°C volt, amely a számos problémát okozott a fúrési műveletek és a hidraulikai mérések során is. A rezervoárt egy nagy mélységben létrehozott hőcserélő-felület alkotta, melynek létrehozása volt az addigi legnagyobb hidraulikus rétegrepesztési művelet az Egyesült Államokban. Speciális szeizmikus- és besajtolási mérések után a repedés méretére a következőket kapták: a függőlegessel 30°-os szöget bezárva 800 m és 150 m. A cirkulációs tesztek megmutatták, hogy a rendszer nagyon kedvező hidraulikai tulajdonságokkal rendelkezik és a termikus kapacitása 10 MW fölötti volt. 2001-ben az Egyesült Államok Energia Ügynöksége lezárta a Fenton Hill-i Hot Dry Rock kísérleti projektet, miszerint a technológia megfelelően kidolgozott és megérett az ipari alkalmazásra.

### 3. JELENTŐSEBB EGS POJEKTEK

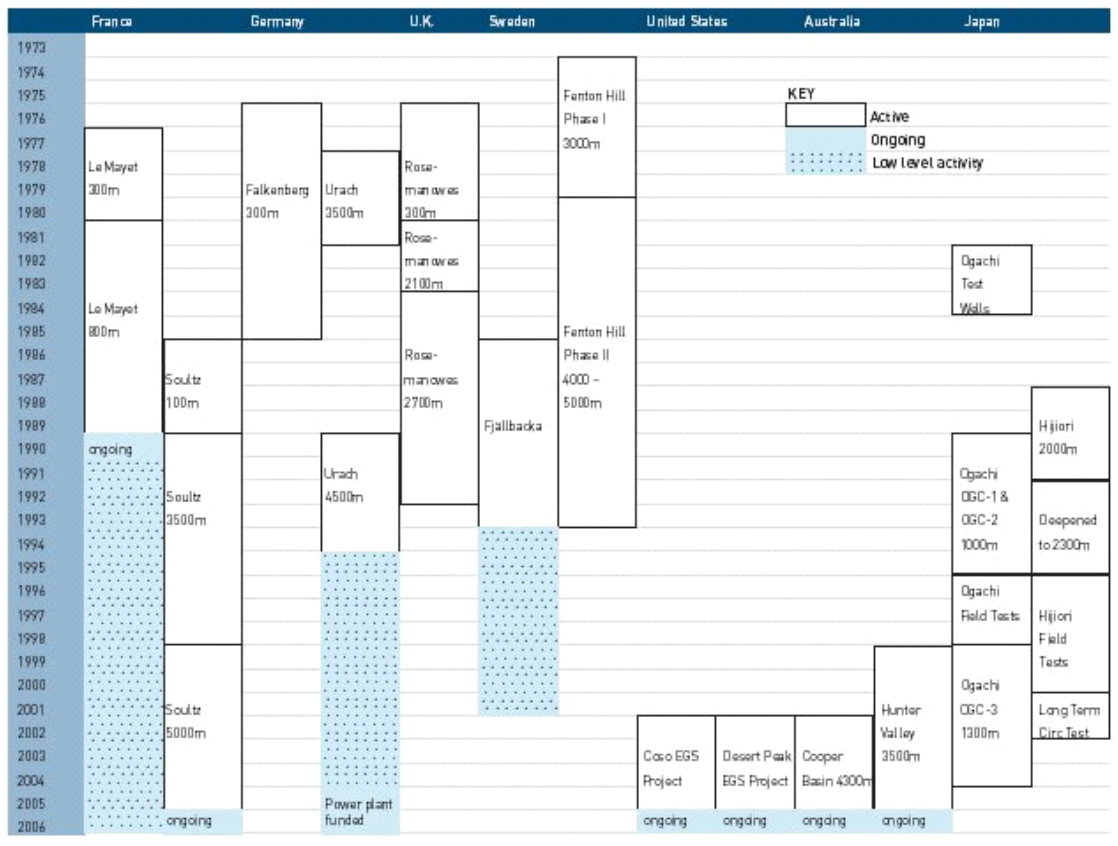
Az elmúlt évtizedek során csak néhány kiemelt jelentőségű EGS\HDR projekt indult a világon (2. ábra). A HDR alapkoncepciójának megfelelő energiatermelő rendszert azonban (leginkább a megvalósítás óriási költségei miatt) nem helyeztek üzembe. Legfrissebb hírek szerint a Fenton Hill-i kísérleti rendszer újraélesztését tűzte ki céljául a *HDR Energy LLC*.

A világ számos helyszínén és Magyarországon is komoly érdeklődés övezi a földkéreg hőtartalmának, elektromos energia termelését célzó hasznosítását.

E technológiák megvalósíthatóságának mind jogi, mind gazdasági lehetőségei, ha lassan is de folyamatosan javulnak Magyarországon is, a műszaki megvalósítás technikai-technológiai háttere rendelkezésre áll.

A geotermikus rezervoárok a természet geológiai változatosságából adódóan mind-mind egyedi rendszerek, működésük a felszíni technológiákkal ellentétben minden helyszínen más és más. A világon eddig megvalósult rendszerek tapasztalatai a sikeres, jól működő rendszerektől az „elszerencsétlenedett” felhagyott projektekig, mutatják, hogy még nagyon alapos megelőző

kutatások ellenére is óriási kockázatot vállal a befektető egy geotermikus energiatermelő rendszer létrehozása során.



2. ábra. Az elmúlt évtizedek legfontosabb EGS projektjei

Mind ezek tovább növelik a kutatások jelentőségét, illetve kimagasló, magas színvonalú kutató-fejlesztő tapasztalatokkal rendelkező intézményekben történő kutatómunka igényét e projektek során.

## 4. CÉLKITŰZÉSEK

Napjaink energiapolitikájában jelentős szerepet kap a megújuló energiaforrások hasznosításának kérdése. Tanulmányok készültek és készülnek a megújulóknak az egész bolygóra kiterjedő, uniós, országos és regionális szintű felmérése céljából. A geotermikus energiahasznosítás, hazai lehetőségei között az EGS és ezen belül a HDR potenciál felmérése, és a kitermelhető készlet meghatározása jelen írás megjelenéséig nem történt meg.

A HDR mesterséges rezervoárban valamint a hozzá kapcsolódó besajtoló- és termelőkútban kialakuló áramlások leírásával foglalkozó szakirodalom tanulmányozása után, célszerűnek tűnt egy a HDR rendszert, és működését hűen tükröző, egyszerű és minden elemében „egyensúlyban” lévő modell elkészítése.

Továbbá e terület alap kutatás szintű leírása és megbízható elméleti alapokra épülő, speciális jellemzők meghatározása, melyek segítségével a mesterséges geotermikus energiatermelő rendszer megbízhatóbban jellemezhető.

A modellfejlesztés célja, egy olyan matematikai modell kidolgozása volt, mellyel egy megvalósíthatósági tanulmány során, egy HDR rendszer, az elsődlegesen rendelkezésre álló adatok alapján modellezhető, gazdasági és befektetői szempontok szerint megítélhető legyen.

Fontosnak tartottuk a potenciál és lehetőségek (HDR rendszerek) valós kezeléséhez a geotermikus készletbecslés és kihozatali tényező pontosabb meghatározását.

További cél volt, a kőzetekben végbemenő hővezetési folyamatok vizsgálata, hiszen a föld belső „melegének” kinyerhető hányadát alapvetően a hőcserébe ténylegesen bevonható kőzet-térfogat és az abból felszínre hozható belsőenergia tartalom határozza meg.

## 5. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A geotermikus energiatermelő rendszerek, akár porózus rezervoárból termelő, zárt ciklusú, visszasajtolásos termelésről akár a forró száraz kőzetekből történő termelésről van szó, mind fizikai mind műszaki vonatkozásokban sok közös tulajdonsággal bírnak. Mindezek mellett azonban hidraulikus és termikus viselkedése szempontjából a HDR mesterséges geotermikus rendszer hőcserélő-felülete, alapvetően eltérő megközelítést kíván.

A kútban áramló fluidum kvázistacionárius hőmérséklet-eloszlásának meghatározásával kapcsolatos eljárások kidolgozása a múlt század közepéig nyúlik vissza. Az első publikáció, amely már pontosabban veszi figyelembe a fluidum áramlási viszonyaitól, fizikai és kémiai tulajdonságaitól, továbbá a kútszerkezettől függő hőátadási tényezőt és a kútkiképzés miatti termikus szkinzóna szerepét RAMEY [2] nevéhez fűződik. A szerző a hőáramlást a szkinzónán belül stacionáriusnak, míg a kőzetben kvázi-stacionáriusnak az egyfázisú fluidumot ideális viselkedésűnek tekinti. Bár csak megjegyzés marad publikációjában, mégis ő veti fel először, hogy a tranziens kúthőmérséklet számításának általános megoldása a szuperpozíció elvét követelné meg. RAMEY munkája a későbbiekben számos kidolgozott eljárás alapjául szolgált. A Miskolci Egyetem Kőolaj és Földgáz Intézetében a kúthőmérsékletek meghatározására RAMEY megközelítését alkalmazták, és pontosították BOBOK [3], HAZIM [4], TÓTH [5] és JOBBIK [6] munkái.

Az EGS geotermikus energiatermelő rendszerek alapvetően hőcserélő-felületet alkotó repedés illetve repedés-rendszer struktúrájában különböznek egymástól. A repedezett, töredezett kőzetek járataiban kialakuló vízmozgás az összefüggő hasadékrendszer különböző elemeiben egyszerre lehet: mikroszivárgás, lamináris-, átmeneti- és turbulens szivárgás, illetve áramlás egyaránt. A szivárgási-áramlási tartományok egymás mellett és egymással igen bonyolult kapcsolatban fordulhatnak elő.

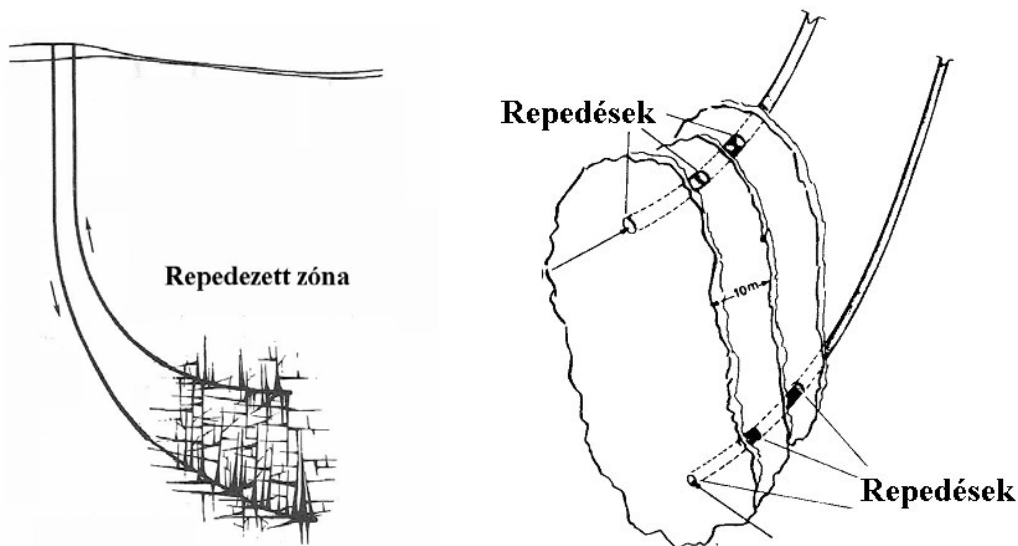
A természetes porózus hévíztárolókban kialakuló szivárgási modellek nem alkalmazhatóak az EGS rendszerek repedezett, töredezett illetve masszív hidraulikus rétegrepszttéssel kialakított hőcserélő felületeiben kialakuló hidraulikus és termikus folyamatok leírására. Véleményünk szerint a geotermikus energiatermelő rendszerek kapcsán az egyik legnehezebb feladat, az EGS geotermikus rendszerek repedezett és repszttésekkel tovább stimulált rezervoárjában kialakuló áramlások leírása, ill. a hőcserélő-felület nagyságának meghatározása.



A hőcserélő-felület kialakítása miatt teljesen eltérő megközelítést kíván az EGS és a HDR rendszerek (3. ábra) hőcserélő felületében kialakuló transzportfolyamatok leírása.

A HDR rendszer repedésében (repedéseiben) lejátszódó hőtranszport folyamatok leírásáról korábban közölt publikációk közös jellemzője, hogy a résben áramló fluidum hőmérséklete adott „metszetben” megegyezik a kőzet felszínének hőmérsékletével.

OGINO [7] és társai felülvizsgálták, hogy a HDR rendszerek repedésében kialakuló kényszerkonvekciós hővezetési feladat megoldásánál mely feltételezések engedhetőek meg és melyek csak fenntartásokkal. A hő- és anyagtranszport folyamatokat leíró törvényszerűségek analógiáját felhasználva empirikus módszerekkel meghatározott összefüggések alapján, számítási módszert javasolnak a kitámasztó-közeg nélküli, valamint az üveggyönggyel, mint kitámasztó-anyaggal véletlenszerű-eloszlásban kitámasztott résben a hőátadási tényező értékeinek meghatározására.



3. ábra EGS és HDR rendszerek

JOBBIK [8] a HDR rendszerek matematikai modellezésénél OGINO javaslata alapján számítja a hőátadási tényezők értékeit, továbbá az alkalmazott modellben, a résben áramló folyadék hőmérséklete nem egyezik meg a kőzet hőmérsékletével (adott „metszetben”).

A nagy felületű és egyetlen összefüggő repedés alkotta HDR rezervoárban kialakuló áramlás leírására BOBOK [9] és JOBBIK [10] kvázi-potenciális síkáramlást (Hele-Shaw áramlást) komplex függvénytanai módszerekkel vizsgálta.

Empirikus összefüggéseket adoptál a kitámasztó-anyaggal kitöltött repedésben kialakuló áramlás hidraulikai leírására OGINO [11], majd a későbbiekben analitikus és numerikus eljárást is publikál. Megoldását alkalmazza, továbbfejlesztet matematikai modelljében JOBBIK [12], a HDR rezervoár hidraulikai veszteségének meghatározásához.

## 6. HDR RENDSZER MODELLEZÉSE

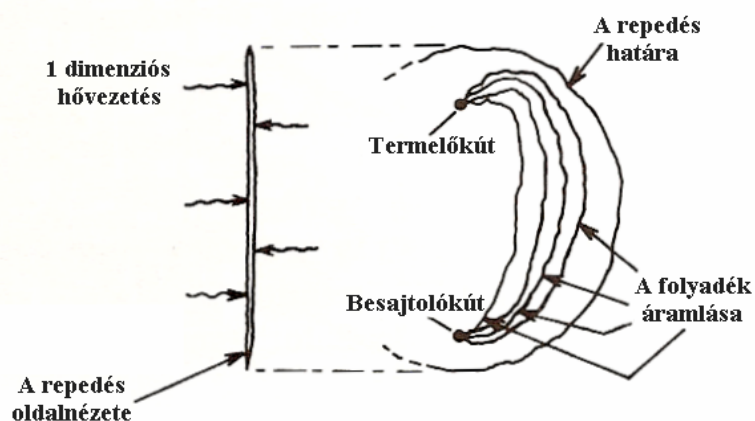
A földkéreg általunk tetszőlegesen, de célszerűen lehatárolt tartománya, amelyben a geotermikus folyamatokat vizsgáljuk a geotermikus rendszer. A rendszer és környezete egymással kölcsönhatásban állnak, ez a természet végtelen gazdagságának megfelelően a legkülönbébb folyamatok, kialakulására vezet. Céljainknak megfelelően a rendszer termikus- és mechanikai állapotát, illetve ezen állapotnak a környezet hatására történő megváltozását vizsgáljuk. Így a konkrét valóságot egy annak csupán néhány tulajdonságát, viselkedésének csupán a számunkra fontos vonásait visszaadó modell helyettesíti.

Amikor a geotermikus energiatermelő rendszer viselkedésének leírásáról beszélünk, célszerű az egyes részrendszereket és részfolyamatokat egymástól különválasztani. Ha a részrendszereket alkalmasan leválasztva (de nem kölcsönhatásaikból kiszakítva) modellezzük: az egyszerűbb összefüggésekre, könnyebben kezelhető algoritmusra, gyorsabban elvégezhető szimulációra vezet.

Modellünk legfontosabb eleme a geotermikus tároló, amelynek belső energia tartalma valamilyen munkaközeg segítségével felszínre hozható. A tároló tehát egy gyakorlati megfontolások által lehatárolt részrendszer. A mesterséges geotermikus rezervoár valamely forró, száraz impermeabilis kőzetben létrehozott repedésrendszer. Ez legcélszerűbben masszív hidraulikus rétegrepesztéssel alakítható ki, a nagy hőátadó-felületben a felszínről folyadékot keringetve, mint hőcserélő működik. A létrehozott repedés, lehet kitámasztó-anyag nélküli repedés, vagy kitámasztó-közeggel véletlenszerűen kitöltött repedés. A résen átáramló folyadék felmelegszik, belső energiataralma jelentősen megnő. A repedés hőátadó felületéhez a kőzetben vezetéssel adódik át a hőtánpótlás (4. ábra).

A mesterséges rezervoár modellje egy állandó részélességű kör alakú repedés, mely véletlenszerűen elhelyezett kitöltéssel gömb alakú kitámasztó-anyagot tartalmaz. Szélső esetben előfordulhat, hogy a repedés egyáltalán nem tartalmaz kitámasztást. A masszív hidraulikus rétegrepesztés során a kristályos kőzetben a visszazáródó felületek a repedés síkjában egymáshoz képest némileg elmozdulhatnak, s így a rendkívül kicsiny felületi egyenetlenségek megakadályozzák a repedés visszazáródását.

A repedést két kút metszi egy termelő- és egy besajtoló kút. A valóságban a repedés térbeli irányultságát mindig a kőzet feszültségviszonyai határozzák meg. Modellünkben a repedés vízszintes vagy függőleges elhelyezkedésű, és kutak egy-egy kis átmérőjű szelvényben metszik.



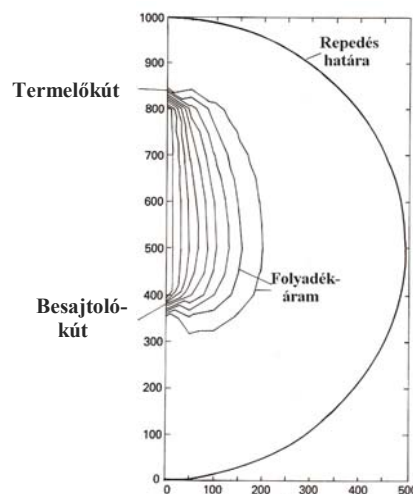
4. ábra A repedés modellje

Könnyen belátható, hogy egy HDR-rendszer működésének „jelleggörbéjében” szereplő ismeretlen paraméterek egyedi meghatározása a rendszer méretéből, a működési körülményeiből (nagy nyomás és hőmérséklet viszonyok), a tehetetlenségéből és a mérhetőségi problémáiból adódóan szinte lehetetlen feladat. Előnye hogy, egy bizonyos paramétercsoport hatásának, egy változóban történő kezelésével a rendszer működésének numerikus vizsgálata azonban egyszerűbbé válik.

A HDR geotermikus rezervoárban két különböző természetű hőátviteli folyamat történik, a folyadékfázis mozgására a kényszerkonvekció jellemző, míg a repedés kőzetkörnyezetében tiszta hővezetési folyamat alakul ki. A hővezetési folyamatok közelítő analitikus tárgyalása érdekében új jellemzők bevezetése történt meg [13].

A HDR rezervoárokban végbemenő anyagtranszport folyamatokat vizsgálva megállapítható, hogy

- a HDR rezervoár hőcserélő repedése a benne kialakuló áramlási sebesség-eloszlás (5. ábra) alapján két tartományra bontható, a keringetett folyadékáram által érintett tartományra és az úgynevezett pangó (vagy lefűződött) tartományra, amely nem vesz részt az áramlásban. a *rezervoár áramlási-profil tényező* bevezetésével a HDR rezervoárban kialakuló folyamatok egyszerűbben kezelhetők. a rezervoár áramlási-profil tényező értéke függ a kutak számától, elhelyezkedésétől és a cirkuláltatott folyadékáramtól.



5. ábra. McFarland és Murphy szimulációs eredményei

- a repedésre merőleges irányú, termikus megzavarás behatolási mélységének meghatározására bevezetésre került a *termikus-övezet tényező*.
- a HDR rezervoár működése során, időben változó *termikusan megzavart térfogat*, az *intenzív termikus megzavarás távolsága* és az *intenzív hőcserében résztvevő térfogat* számítása a geotermikus készletbecsléshez szükséges.
- a fentebbi paraméterek segítségével lehetőség nyílik a HDR rezervoár *termálenergia tartalmának* és *kibozgatali hatásfokának* pontosabb meghatározására. a teljes termálenergia tartalom természetesen nem termelhető ki. a *hozzáférhető termálenergia tartalom*



meghatározásánál figyelembe kell vennünk az intenzív hőcserébe bevonható térfogatot, illetve a rezervoár *felhagyási hőmérsékletét* melyet a felszíni technológia határoz meg.

A bevezetett rezervoár jellemzők segítségével a HDR geotermikus rendszer matematikai modellezéséhez szükséges összefüggések rendelkezésünkre állnak.

## 7. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

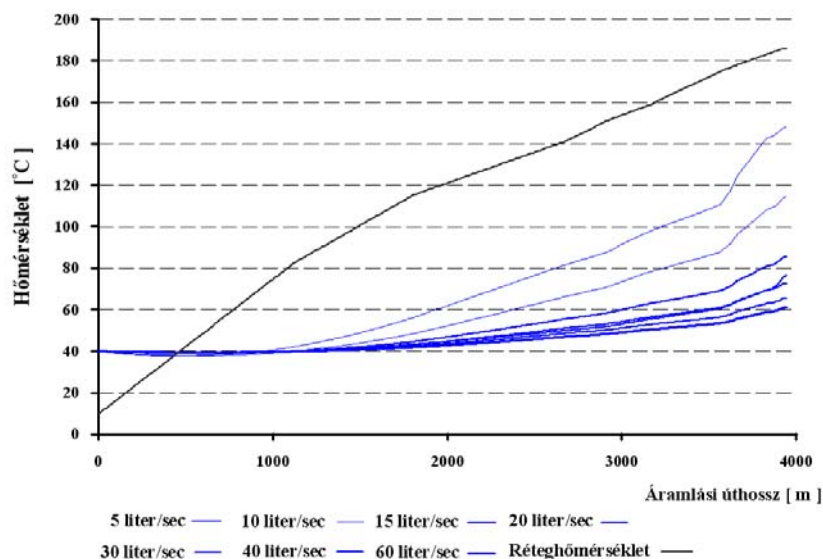
A munka során összeállított modell kétkutas, egy (Single) vagy több párhuzamos (Multi) repedés alkotta HDR rendszer szimulációjára alkalmas. Teljes rendszer-szimuláció során a számítási eljárás figyelembe veszi a kútszerkezet pontos kialakítását: ferde esetleg vízszintes fúrás esetén is. Követi a kőzetkörnyezet hővezető-képességének változását, porozitás és hőmérséklet függését is figyelembe véve. A szimuláció során termikus- és hidraulikus jellemzők számítása történik, melyek segítségével ellenőrizhető a rendszer működésének realitása, számítható a rendszer hőteljesítménye valamint a kilépő folyadék hőmérséklete és nyomásvesztése.

A szimuláció lehetővé teszi, hogy gyakorlatilag „kútfejtől-kútfejig”, vagyis a HDR-rendszer felszín alatti elemein végigkísérjük, a keringetett folyadékáram útját. Az későbbiekben bemutatásra kerülő ábrák kiválasztása a következők figyelembevételével történt:

- a szimuláció során használt adatok a repedés méretére vonatkozólag teljes mértékben becsült adatok, nyilvánvaló hogy, egy fiktív rendszer (még ha mérési adatokkal jellemzett földtani környezetben van is elhelyezve) szimulációja, számos önkényesen választott szempont alapján valósulhat meg, továbbá
- szándékunk volt, hogy a rendszer működését szemléletesen mutassuk be, ennek érdekében a szimulációk során (nem feltétlenül reális tartományok figyelembevételével) érzékenységi vizsgálatok is modellezésre kerültek.

A repedésben kialakuló termikus folyamatok kuktól független, speciális vizsgálatára az úgynevezett rezervoár-szimulációk során nyílik lehetőség.

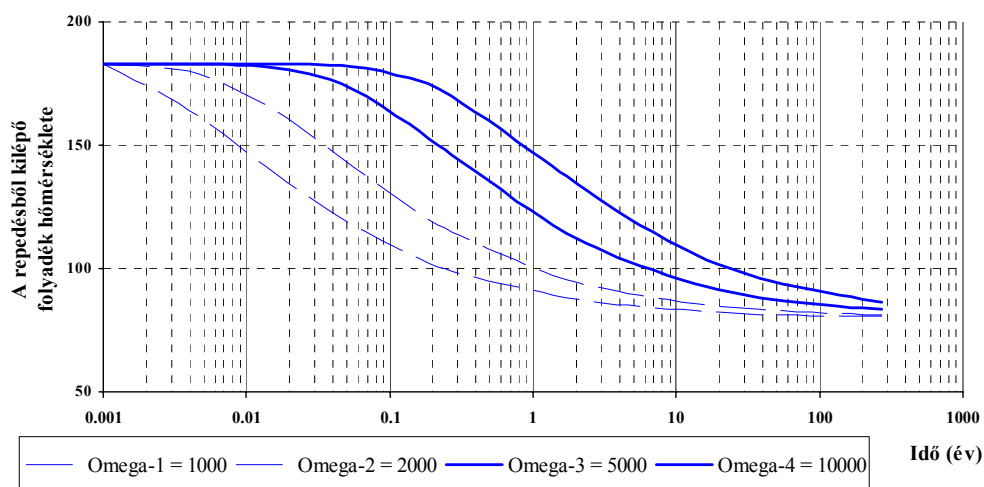
A numerikus vizsgálatok helyszínéként választott hazai mélyfúrás kőzetkörnyezetének kőzetfizikai és kútszerkezetének adataival végzett besajtolás szimulációját mutatja a 6. ábra.



6. ábra. A besajtolt folyadék hőmérsékletének változása a felszíntől a lyuktalpig, eltérő hozamok esetén

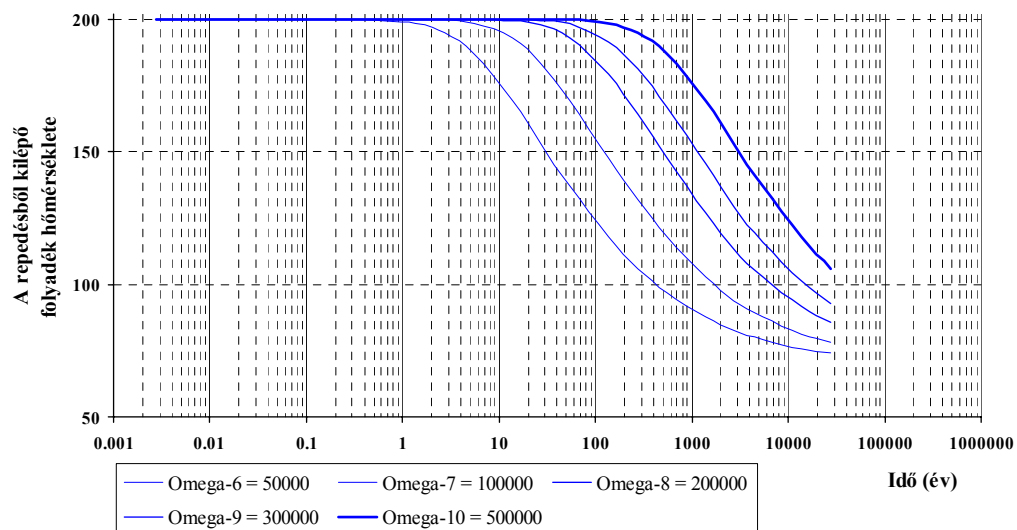
A kőzetkörnyezeténél hidegebb folyadék besajtolása a kútba természetesen tranzienis hővezetési folyamatot indukál. A besajtoló kút hideg folyadékárama folyamatosan hűti a környezetét, míg hosszú idő elteltével (folyamatos üzemmódnál) a kőzetkörnyezet termikus állapota kvázi állandósul. Ennek megfelelően a kúttalpra érkező folyadék hőmérséklete is változik, majd állandósul. A résbe érkező folyadék hőmérséklete határozza meg a HDR rezervoár „hűtésének” intenzitását, így a repedésbe érkező folyadék hőmérséklete a rendszer élettartamára, a termelési ütemre, valamint a kihozatali tényezőre is alapvető hatással van.

Az alábbiakban a repedésre vonatkozó speciális szimulációk eredményeinek bemutatása következik. Néhány kivételtől eltekintve a mesterséges HDR rezervoár hőmérséklete  $200^{\circ}\text{C}$ , mely valójában az elektromos energia gazdaságos előállítására alkalmas hőmérséklet-tartomány alsó határa, a rezervoárba érkező fluidum hőmérséklete minden esetben  $80^{\circ}\text{C}$  volt.



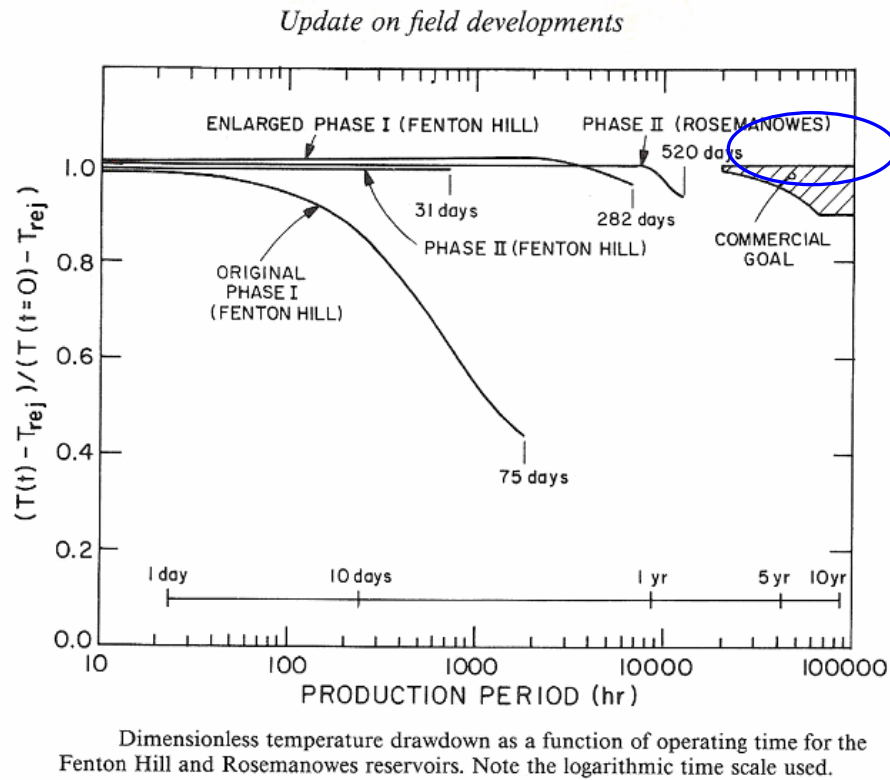
7. ábra. Extrém kis értékű áramlási profil-tényező értékekhez tartozó lehűlések

Rendkívül kis és elegendően nagy áramlási-profil tényező értékkel rendelkező repedések „életútját” mutatják a 7. és 8. ábrák, ez utóbbi görbeseregei már a reális méretű HDR rezervoárok tartományában helyezkedik el.

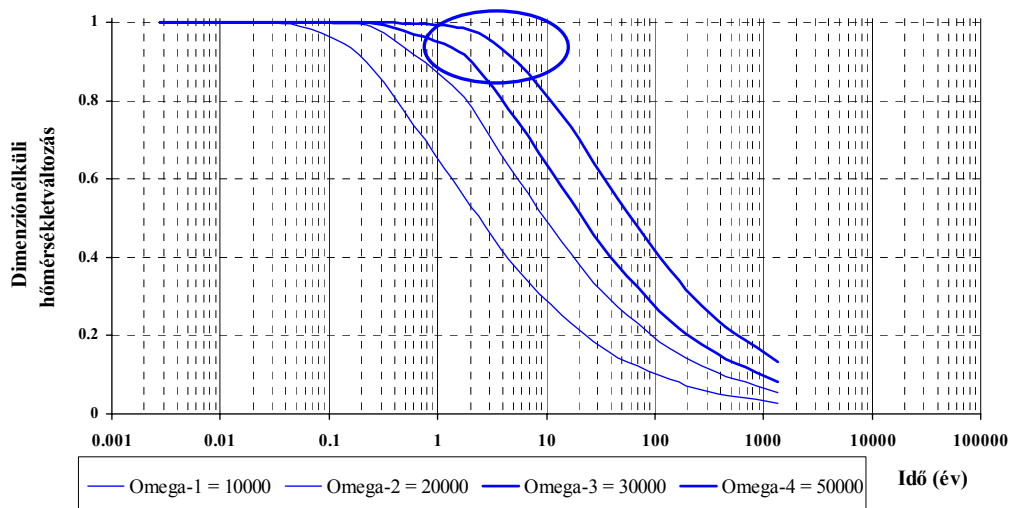


8. ábra. A repedést elhagyó folyadék hőmérséklete nagy áramlási profil-tényező értékeknél.

A 9. és 10. ábrák alapján megállapítható, hogy csak megfelelően nagy felületű HDR rezervoárok biztosítják az erőművi felhasználás néhány évtizedes élettartamához szükséges, állandó nagy hőmérsékletű fluidumot. Megállapítható továbbá, hogy a HDR rendszer hőcserélő-felületét alkotó repedés termikus viselkedéséről (szerencsés esetben, vagyis amennyiben a hosszú idejű működéshez szükséges méretet elértük) rövid idejű tesztek segítségével nem tudunk információt szerezni.



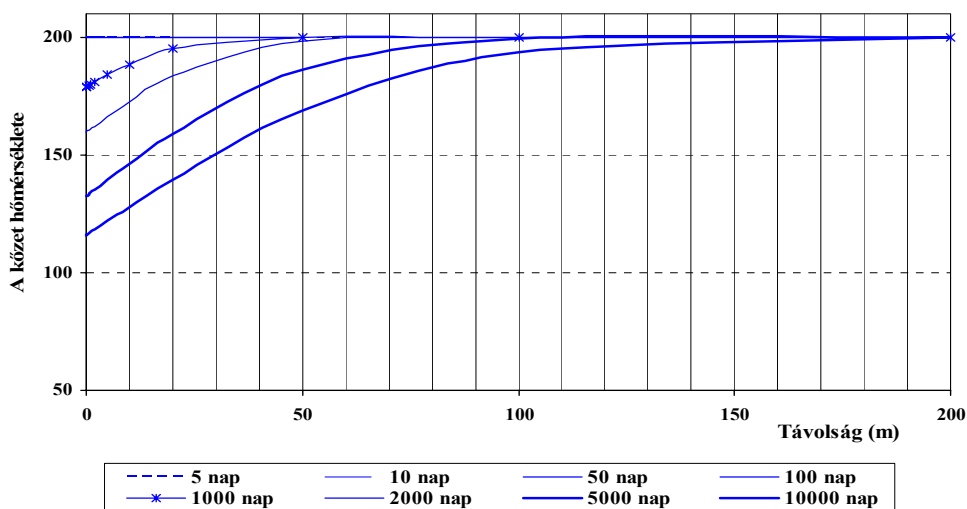
9. ábra. Dimenzió nélküli hőmérsékletváltozás két megvalósult projekt tesztadatai alapján



10. ábra. Dimenzió nélküli hőmérsékletváltozás közepes méretű hőcserélők esetén

A 11. ábrán jól megfigyelhető a kőzet hőmérsékletének csökkenése illetve a hőmérséklet-megzavarás „távolságának” változása az idővel. Gyakorlati számításoknál az úgynevezett felhagyási hőmérséklet értékét a felszíni technológia határozza meg. Szimulációk segítségével megtervezhetjük a számunkra optimális termelési ütemet, a cirkuláltatott folyadékáram, a felhagyási hőmérséklet a hozzáférhető készlet maximális kitermelésének érdekében.

Könnyű belátni, hogy intenzív megcsapolással (nagy keringetett tömegáramok és/vagy kis repedések esetén) nagy teljesítményt érhetünk ugyan el, de rendszerünk gyorsan fog lehűlni és így a kihozatali tényező értéke is alacsony lesz. A legnagyobb kihozatalt hatalmas hőcserélő-felületekkel, nagy kúttávolsággal és így a repedésben kis Reynolds-számmal jellemezhető áramlásokkal érhetjük el.



11. ábra. A kőzetkörnyezet hőmérséklet-eloszlása a termelési szelvényben a repedésre merőleges irányban

Jelen írásnak nem célja gazdaságossági kérdések tárgyalása. Egy HDR rendszer kivitelezése igen nagy beruházási költségekkel illetve jelentős kockázattal jár. Egy Multi-HDR rendszer beruházási költségei, pedig valóban óriásiak lennének. Egy bokorfúrásból több irányban létrehozott Multi-HDR rezervoár, váltakozó rendszerben történő üzemeltetése során lehetőség nyílna az egymással hidraulikai kapcsolatban nem lévő rendszerek termikus regenerálására. A Multi-HDR rendszerhez kapcsolódó felszíni technológia stabilan és időben szinte „korlátlan” ideig működtethető lenne.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ARMSTEAD, C. H., TESTER, J. N.: Heat Mining. EPN. Spon, London, 1987.
- [2] RAMEY, H. J.: Wellbore heat transmission. Journal of Petroleum Technology, 1962.
- [3] BOBOK, E.: Geotermikus energiatermelés. Tankönyvkiadó, 1987.
- [4] HAZIM, N. D.: Simulation of heat transfer in boreholes. Ph.D. Thesis, 1995.
- [5] TÓTH, A.: Geotermikus energiatermelő rendszerek hőmérsékletviszonyai. Ph.D. Értekezés, 2004.
- [6] JOBBIK, A.: Numerical Simulation of Thermal Behavior of an Artificial Geothermal System, 8th International Conference on heat engines and environmental protection, Balatonfüred 2007. május 28-30. pp. 159-163

- [7] OGINO, F. – YAMAMURA, M.: Mass transfer from hot dry rock to water flowing through a circular fracture. *Geothermics* 31, 2002.
- [8] JOBBIK, A.: Thermal interaction between hot rock and flowing water in a hydraulic fractured geothermal reservoir. *microCAD2008 International Computer Science Conference*, Miskolc, Miskolci Egyetem, 2008. március, pp. 101-106
- [9] BOBOK, E.: *Geotermikus energiatermelés. Kézirat.* 1995.
- [10] JOBBIK, A., BOBOK, E., TAKÁCS, G., TURZO, Z.: Feasibility Study of a Hot Dry Rock Project in Hungary, Intellectual Service for Oil and Gas Industry: Analysis, Solution, Perspectives, Ufa, 2000. pp. 185-193
- [11] OGINO, F. et al.: Pressure drop of water flow through crack. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan* 13, 1991.
- [12] JOBBIK, A.: Pressure drop of water flow in a Hot Dry Rock Geothermal reservoir. *microCAD2008 International Computer Science Conference*, Miskolc, Miskolci Egyetem, 2008. március, pp. 95-100
- [13] JOBBIK, A.: *Mesterséges geotermikus energiatermelő rendszerek matematikai modellezése. Ph.D. Értekezés*, 2008.

## ***HEAT EXTRACTION FROM THE CRUSTAL ROCK BY CREATING AN ARTIFICIAL HEAT EXCHANGER***

In our scientific work we investigated the Hot Dry Rock technology without water production, and also its subsurface elements, not relating natural water bases. During the mathematic modeling we focused for elaborating a real model of thermal and hydraulic processes in the artificially established subsurface heater-model. We worked out the mathematic model of geothermal energy producing system based on the Hot Dry Rock technology. During the conceptual and mathematic modeling our aim was to create an adequate and descriptive basis of the difficult handling by its size and recognizing model. The model development has been resulted a complex mathematic model in which we tend to find as analytical solutions as the conditions of model creating allowed it. The simulation model can be applied for a detailed analyzing of the HDR system planned in a potential location. During the elaboration of any feasibility study of a geothermal project the characterization of reservoirs defined by my thesis can play a supportive and decision-preparation role as well.