



SZENT ISTVÁN EGYETEM

A konvekciós geotermikus energiatermelés
fenntarthatósága és a felhasználás hatékonysága

Tézisfüzet

Nagygál János

Gödöllő

2017

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Dr. Tóth László
egyetemi tanár DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar
Folyamatmérnöki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	5
1.1. A téma időszerűsége, jelentősége	5
1.2. Célkitűzések	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	7
2.1. Egyedi kútvizsgálatok	7
2.2. Kutak szerkezeti ellenőrzése	8
2.3. Az árapály hatása	9
2.4. A kertészeti lehetséges fűtési rendszerek és a geotermikus fűtés összehasonlítása	9
2.5. Növényházi fejlesztés a fenntarthatóság érdekében	10
2.6. Puffer tároló mérési eredmények	11
3. EREDMÉNYEK	12
3.1. A vizsgált terület földtani, vízföldtani viszonyai, adottságok, rétegek jellemzői	12
3.2. A rétegek közötti vízcseré összefüggéseinek meghatározása	13
3.3. Az árapály hatása a termálkutak mérésére	15
3.4. A kertészeti lehetséges fűtési rendszerek és a geotermikus fűtés összehasonlítása	17
3.5. Növényházi fejlesztés a fenntarthatóság érdekében	17
3.6. Puffer tároló mérési eredmények	19
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	21
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	23
6. ÖSSZEFOGLALÁS	24
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	25

Jelölések:

T_t	a tározó hőfoka	$^{\circ}\text{C}$
T_r	a visszatáplált víz hőfoka	$^{\circ}\text{C}$
T_0	a felszíni hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
\dot{m}	fűtővíz tömegárama	kg/h
q_0	a felvett hőtéljesítmény	J
w	a bevitt kompresszor munka (energia)	kWh
COP	fajlagos hűtőtéljesítmény (Coefficient Of Performance)	-
ε	fajlagos hűtőtéljesítmény	-
e	fajlagos exergia	kWh/kg
a	fajlagos aenergia	kWh/kg
\acute{E}	exergia	J
$t_b - t_k = \Delta t$	a külső és a belső hőmérséklet különbsége	$^{\circ}\text{C}$
$F_{\ddot{u}}$	a növényház határoló felületének nagysága	m^2
Q_{FC}	hasznos hőenergia	J
E_o	a rendszer működtetéséhez felhasznált energia	J
Q_{FC}	hasznos hőenergia	J,
E_o	a rendszer működtetéséhez felhasznált energia	J.
η_E	P/Q_{fig} a felhasznált villamos energia előállításának hatásfoka	-
$Q_{\text{össz}}$	fluidum összes energiája	J
Q_{VSZ}	a visszasajtolt fluidum energiája	J
P_{VE}	a hőszivattyú hajtására felhasznált energia (villamos)	kWh
Q_{EXE}	a hasznosult hőenergia (exergia)	J
k_o	a növényház burkolatának hőátbocsátási tényezője	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
t_i	a növényház belső légtér-hőmérséklete	$^{\circ}\text{C}$
t_e	a növényház külső környezetének légtér-hőmérséklete	$^{\circ}\text{C}$
k	permeabilitás	μm^2
$G_{\text{rad T}}$	Hőmérséklet gradiens	$^{\circ}\text{C}/\text{km}$
L_t	Talpmélység	m
SPF	Seasonal Performance Factor	-

Rövidítések

TL	Hőmérsékletmérés	-
FLOW	Áramlásmérés	-
REF	Visszatöltődés	-
P_{rise}	Nyomásemelkedés	-
P_{grad}	Nyomásgradiens	-
H	Vízszint	-

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége, jelentősége

Magyarországon a geotermikus gradiens jelentősen meghaladja a világtátlagot, s emiatt jelentős potenciál rejtőzik a geotermikus hő felhasználásában. Ami Magyarországon bizonyos területeken (pl. kertészetek, lakóépületek, termálfürdők) már jelenleg is elterjedt fűtési módozat. A geotermikus energia hasznosításában a kútlétesítés és visszasajtolás közvetlen költségén kívül, a hő elosztási rendszer kiépítésének ráfordításai miatt a legjelentősebb korlátozó tényezőt a létesítések költségei jelentik.

A termálvíz minden átalakítás nélkül alkalmas a hőenergia szállítására, átadására akár közvetlen, akár közvetett módon. A termálkút üzemeltetési költségei a kinyerhető hőenergiához viszonyítva alacsonyak, ezért a termálvízre alapozott fűtés minden mással szemben versenyképes. Előnyös, hogy az ország kertészkedéssel foglalkozó – elsősorban síkvidéki – területein jelentős mennyiségben elérhető. Helyben kinyerhető a hőenergia, s nincs szükség szállításra, nem importfüggő, évszaktól, napszaktól, időjárástól független.

Alapvető feladat e nemzeti kincs környezetkímélő és fenntartható felhasználása.

1.2. Célkitűzések

Értekezésemben a megújuló energia hasznosításon belül a geotermikus energia hasznosítás egyik speciális esetét vizsgálom, a termálvíz kitermeléssel járó hőhasznosítást.

A dolgozat célja, hogy rávilágítson olyan összefüggésekre, amelyek vizsgálata nélkül a jelenleg alkalmazott kitermelési és hasznosítási technológiák nem tarthatóak fenn hosszú távon.

1. A termálkutak termelési paramétereinek ellenőrzése Szentes térségében. 20 db homokkő bázison termelő termálkút részletes vizsgálata, valamint az in situ mérések eredményei alapján a talajszinthez számított nyugalmi vízszint ellenőrzése. Az ellenőrzés feltételeinek kutatása.
2. A visszasajtolás eddigi hazai tapasztalatainak áttekintése. Megállapítani, hogy a kutak pihentetése során az egyes vízáadó rétegek között átfertődéssel „fluidum rétegcseré” kialakul-e? Meg kell állapítani, hogy a visszasajtolás tervezésére csak az adott rétegre megnyitott és beszűrőzött, a vízáadó és nyelő réteg megfelelő állapotát bizonyító monitoring kút alkalmas. Az árapály jelenség befolyásolja-e a mérési eredményeket?
3. Növényházi fűtés gazdaságosságának ellenőrzése geotermikus fluidumból nyert energiával, összehasonlítva a használatos összes energiahordozóval, a jelenlegi piaci árak mellett.
4. A csökkent entalpiájú fluidum visszasajtolás előtti hőszivattyúzása és annak megállapítása, hogy a hőszivattyú létesítésének költségét a nyert többlet

energia és az új kútpár létesítésének- és fenntartásának költségét kompenzálja-e. A környezetvédelemre a jelenlegi villamos energia előállítás CO₂ kibocsátása alapján a földgáztüzeléshez mekkora COP érték esetén van kedvező hatása.

5. A kertészeti üvegházak fűtési rendszerébe épített puffer-tároló elősegíti-e a termelést?

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

E fejezetben a kútvizsgálatokkal kapcsolatos mérések eszközeit és módszereit ismertetem. Bemutatom a kutak jellemzőit és azok összefüggéseit a vizsgált területtel. A későbbi részekenél a módszerek és azok egyes elemei az eredmények fejezetben szerepelnek az adott témakörrel való szoros kapcsolódás miatt.

2.1. Egyedi kútvizsgálatok

A kút adatainak megismeréséhez kútvizsgálat elvégzése szükséges. A kutak mérése statikus és dinamikus vizsgálatok elvégzésével történik. A statikus mérés a kút termelés nélküli állapotában történik, úgy hogy a kút üzemszerű működéséhez szükséges berendezések a kúttestből kiépítésre kerülnek. A dinamikus mérés során a kutat az üzemi paramétereinek megfelelő módon kompresszor vagy búvárszivattyú segítségével termeltetjük (1. ábra). A mintavételek a kút üzemi hőmérsékletének elérése után történnek. A mérések során használt műszerek:

- Kútszerkezet ellenőrzés, statikus vizsgálatok
- Dinamikus vizsgálatok
- Mintavételek, laborvizsgálatok



A mérés során igénybevett eszközök



Az adatrögzítő és kiértékelő egységek



Indukciós vízóra

1. ábra Felszíni mérések (saját felvétel)

A mélységi jellemzők méréséhez referenciapontként az állandónak tekinthető terepszintet szolgált.

A mért tényezők:

1. vízszint-, illetve kútfejnyomás
2. légnyomás
3. kifolyó víz hőmérséklete
4. gáztartalom (mintavétellel)
5. vízhozam

Vízszint és kútfejnyomás

Az egyedi kútvizsgálatokhoz a nyugalmi és az üzemi vízszint folyamatos mérésére az önálló, hosszú távú memóriával rendelkező Levelogger típusú nyomás- és hőmérsékletmérő szonda szolgált. Az egymásra hatás-vizsgálatnál több kút egyidejű megfigyeléséhez hasonló működési elvű és mérési tartományú MicroDiverek kerültek beépítésre. Levelogger és MicroDiver vízszintmérők nem a vízszintet, hanem a nyomást mérik és ezt számolják át vízoszlopmagasságra. Az analóg manométerek mindig az aktuális légnyomáshoz képest mérik a víznyomást. A nyomássonadák által mért értékek két értéket figyeltek: a szonda feletti vízoszlop nyomását és a légnyomást. A kettő együtt az abszolút nyomást adja:

$$p = p_{\text{víz}} + p_{\text{légkör}} \quad (1)$$

A vízoszlop nyomásának kiszámításához a légnyomást le kell vonni a mért abszolút nyomásból.

Légnyomás mérése

A légnyomással való korrekcióhoz a Barologger szolgáltatott adatokat.

Gázszeparálás, gázhozam mérés

A kútvizsgálati mérések során gázleválasztás szükséges, mivel a gázfázis meghamisítja a vízórák adatait, de ennek mérése is szükséges a gázhozam és az összetétel meghatározása érdekében.

A fluidum először a szeparátortartályba került, ahol a vízből a gáz kiválik. A tartály tetején távozó gázt hűteni kell, hogy a pára kicsapódjon. A száraz gáz már alkalmas membrános és turbinás gázórák általi hiteles mérésekhez.

Hozammérés

A szeparáló tartályokból a víz az adatgyűjtőhöz csatlakoztatott vízórán keresztül áramlott át. E magas sótartalmú fluidumot átemelő szivattyúk sajtolták vissza a hálózatba.

Kifolyó víz hőmérséklet mérése

A szeparátor tartály utáni csőtagba Pt100 típusú hőmérő került beépítésre, s az adatokat a LogBox adatgyűjtő regisztrálta.

2.2. Kutak szerkezeti ellenőrzése

Ez a méréstípus egy kombinált szondával húzott természetes gamma, átmérő és hőmérsékletszelvényezést jelentett a lezárt kútban.

Meghatározott adatok:

- járható talpmélység,
- csövezési átmérők,
- rakatváltások,
- tömszelencék helye és zárása,

- megnyitott szakaszok helye,
- valamint a gyűrűstér cementezés minősége.

A természetes gamma csatorna lehetőséget adott a harántolt rétegsor ellenőrzésére (permeábilis-impermeábilis szakaszok elkülönítése), így a megnyitott szakaszok vízáadásra alkalmasságának ellenőrzésére, továbbá az eltakart csősaruk (dupla, tripla csövek) helyének meghatározására.

Áramlási profil

E mérések az FTRmOP kombinált szondával folytak (áramlás-, hőmérséklet-, folyadékellenállás-, optikai átlátszóság- és nyomásmérő szonda). A mélységalapú esetben a szonda a kútban mozogva 10 cm-es mintavételezési közzel regisztrálja az adatokat, ezen a módon a nyomásgradiens- és a szűrők aktív szakaszait meghatározó áramlásmérések készülnek.

A felvett nyomásszelvényből kiszámolt gradiens arányos a közeg sűrűségével, feladata a buborékpont kimutatása. A mért adatok korrigálva lettek a hőmérsékleti értékekkel.

Mélységi időalapú nyomás- és hőmérsékletmérések

A mélységi nyomás mérésére - az egyedi kútvizsgálatoknál - a FTRMOP típusú karotázs szonda szolgált, amely kábelen át valós időben küldi fel a mérési adatokat.

A mérések szervezése

A vizsgálatoknál kialakult „menetrend”: szivattyú kiépítése, statikus vizsgálatok, kútszerkezet vizsgálata, kút átépítése a kompresszoros termeltetéshez, lubrikátor felépítése, vízmérőrendszer összeszerelése, szivattyús visszatápláló egység felépítése, kompresszor beépítés, előzetes termeltetés (24-48 óra), dinamikus vizsgálatok.

2.3. Az árapály hatása

A megfigyelésekhez a mérések során a nagy felbontóképességű műszerekkel mért adatokat elemeztem, időintervallumban figyelemmel az aktuális Hold periódusokra. Gyakorlatilag a megfigyelő kúton az aktív kút pulzáló termelésváltozásának hatását, s a létrejövő nyomásváltozásokat.

2.4. A kertészeti lehetséges fűtési rendszerek és a geotermikus fűtés összehasonlítása

Hazánkban a téli termesztés nem képzelhető el a növényházak fűtése nélkül. A gyakorlatban többféle energiaforrás is alkalmazható, azonban a jövedelmezőség miatt valójában csak néhány használható.

Hőelőállítás égetéssel:

- tűzifa, faapríték
- pellet
- szén

- földgáz v. tartályos gáz
- fűtőolaj.

Égetés nélkül:

- termálvízből hőelvonással.

Segédenergiával (villamos energia, földgáz, pirolízis gáz) a környezetből hő hasznosítása:

- hőszivattyú (levegő - levegő, talaj - levegő, vagy elhasznált víz-levegő).

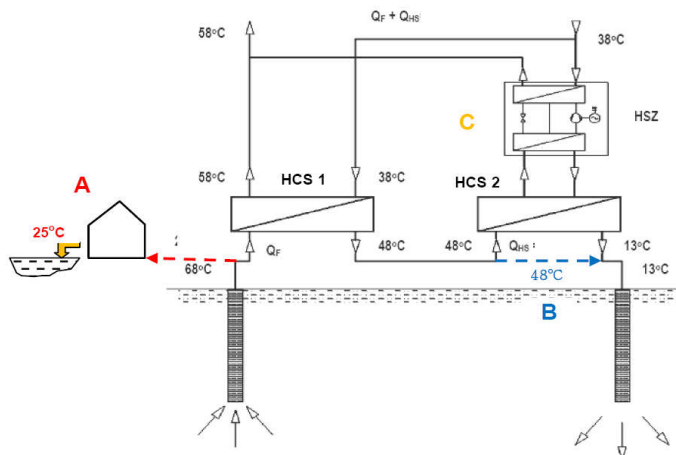
A gyakorlatban általánosan használt összefüggés a hőszükségletre:

$$Q = K' (t_b - t_k) F_{\text{ü}} \quad (2)$$

A tervezőktől és üzemeltetőktől kapott adatok, valamint az internetes weblapos ajánlatok alapján határoztam meg az egyes fűtési rendszerek költségeit 1600 kW hőteljesítmény igényt figyelembe véve. Hasonlóan jártam el a tüzelőanyagok árainál is.

2.5. Növényházi fejlesztés a fenntarthatóság érdekében

A termálvíz felszíni elhelyezése környezetvédelmi gond a magas sótartalma miatt, ezért van a környezetterhelési bírság. A vízadó rétegbe való visszasajtolás ivóvízbázis- védelme miatt körülményes, de megoldható, a fenntarthatósági okok miatt az alkalmazására szükség lesz. Minden esetben adott lehetőség a visszasajtolás, vagy felszíni elhelyezés előtt a még magas entalpiájú fluidumból a hőenergia kinyerése hőszivattyú alkalmazásával (2. ábra).



2. ábra A termálvíz felhasználásának lehetőségei

A=a kútból kijövő termálvízzel közvetlen fűtés, a lehűlt (pl. 25°C) víz pihentető tóba vezetése

B=a kútból kijövő termálvíz hőcserélőbe vezetése (HCS-1) és a kivett hő miatt csökkent hőmérsékletű víz (pl. 48°C) visszasajtolása

C=a kútból kijövő termálvíz hőcserélőbe vezetése (HCS-1) és a kivett hő miatt csökkent hőmérsékletű víz visszasajtolás előtt hőcserélőbe vezetése (HCS-2)

és hőszivattyúzása, majd alacsony hőfokú (pl. 13°C) visszasajtolása, s a nyert hő a fűtési rendszerbe vezetése. Ezzel a nyert összes hő:

$$Q_{FC} = \dot{m}c(T_{fo} - T_{fn}) \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - 1} \quad (3)$$

Ahol:

\overline{T}_{fo} = a fűtésre (kimenő) víz átlaghőmérséklete (K),

\overline{T}_{fn} = a hőszivattyúra felkerült folyadék átlagos hőmérséklete (K).

Jó exergetikai hatásfokú a fűtési rendszerünk abban az esetben, ha pontosan annyi exergiát használunk el, mint amennyi szükséges. A gyakorlatban ehhez kell megválasztani a hőszivattyút.

2.6. Puffer tároló mérési eredmények

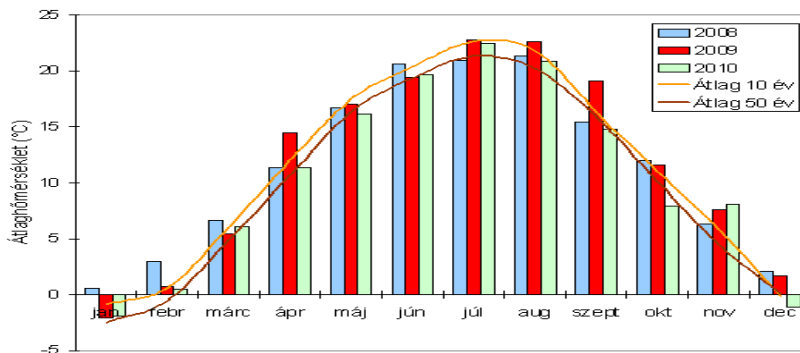
A növényházak fűtőrendszerének folyamatosan azt a hőt kell pótolnia, amely a burkolaton és a szellőző levegővel átadódott a környezetnek. Ha a házak határoló szerkezetét 90–95%-ban egyneműnek vesszük, és az ezen távozó (Q_o) hőt tekintjük alap hővesztésnek, akkor az egyes hőleadó felületek hővesztéséből számítható:

$$Q_o = A_h \cdot k_o (t_i - t_e), \quad [W m^{-2} K^{-1}] \quad (4)$$

ahol:

- A_h – a növényházburkolat felülete [m^2],
- k_o – a növényház burkolatának hőátbocsátási tényezője [$W m^{-2} K^{-1}$],
- t_i – a növényház belső légtér-hőmérséklete [$^{\circ}C$],
- t_e – a növényház külső környezetének légtér-hőmérséklete [$^{\circ}C$].

Három átmeneti időszakban mértem a tároló tartályba beáramló víz tömegáramát és hőmérsékletét, valamint a környezeti- és az üvegház belső átlagos hőfokát (3. ábra). Az adatok a tározó térfogatának meghatározása érdekében szükségesek.



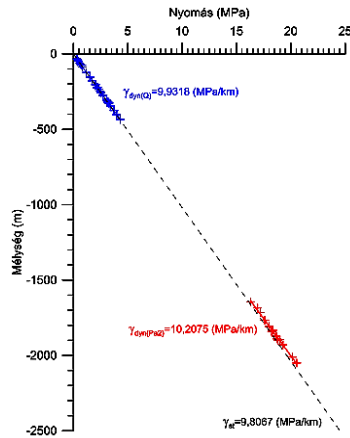
3. ábra Az évi havi középhőmérsékletek alakulása Szentes térségében

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben mutatom be a kutatás során elért új tudományos eredményeket és eljárásokat, amelyek a termálvíz hőjének ésszerű és okszerű felhasználásához, valamint a kitermelés fenntarthatóságához elengedhetetlenek.

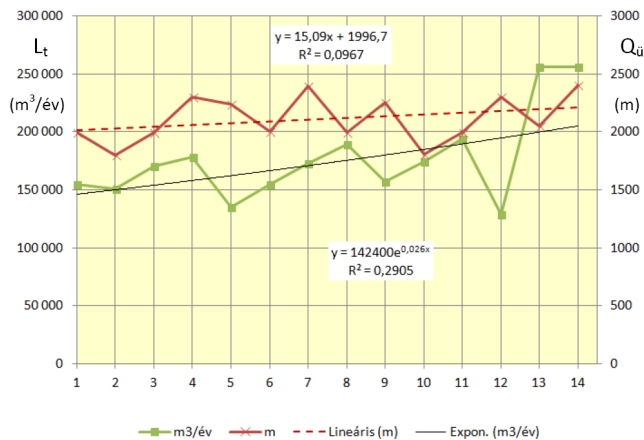
3.1. A vizsgált terület földtani, vízföldtani viszonyai, adottságok, rétegek jellemzői

A mélység növekedésével egyre nagyobb a nyomás. A felső pannon alján a hidrosztatikus nyomást hozzávetőleg 40 m-rel meghaladja a potenciometrikus szint (4. ábra).



4. ábra Nyomás és mélység adatok a szentesi kutaknál

A vizsgált kutak környezetének regionális hidrodinamikai jellemzőire az Árpád-VII kútcsoport 3 kútján végzett egymásra hatás, valamint kapacitás vizsgálat és visszatöltődés mérés volt alkalmas. Ennek lényege a termelőkút termeltetése közbeni észlelés a figyelő kutakban. A különböző (14 db), de egymással összefüggő kutak hozama a talpmélység növekedésével statisztikailag nő (5. ábra).



5. ábra A kutak mélysége (L_t) és hozama ($Q_{\bar{u}}$) közötti összefüggés

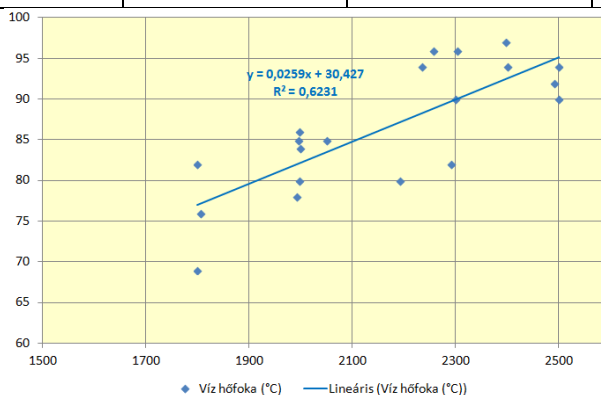
3.2. A rétegek közötti vízcserre összefüggéseinek meghatározása

A Szentes tágabb térségében jelenleg 34 db hévízkút található, ebből a tárgyi területre vonatkozóan 20 üzemelő kút lett vizsgálva és modellezve (1. táblázat).

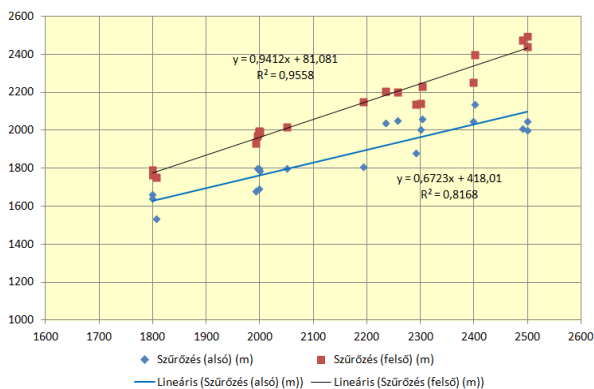
A talaj formáció összletét homokkő, aleurolit és agyagmárga rétegek alkotják, homokkő rétegek túlsúlyával. A mederkitöltő és torkolati zátony üledékek dominálnak, melyek jó tároló tulajdonsággal és korlátozott vízszintes kiterjedéssel bírnak, azonban a sokszoros folyóbeágódás és egymásra rétegzés miatt hidrodinamikai kapcsolatban állnak egymással. Ezért 5-25 m-es jól vezető homokos rétegek váltakoznak rosszul vezető agyagos-aleuritós képződményekkel, ahogy pl. a Szentes térségében készült karotázs szelvények is mutatják (6.-7. ábrák).

1. táblázat 20 szegvári ill. szentesi kút átlagos adatai

	Talp mélység	Szűrőzés (alsó)	Szűrőzés (felső)	Q max.	Víz hőfoka
	(m)	(m)	(m)	(l/perc)	(°C)
Átlag	2165,4	1873,75	2119,1	1488,45	86,5
Szórás	236,0	175,6	227,2	370,2	7,7



6. ábra A talpmélység (m) és a víz hőfoka közötti összefüggés

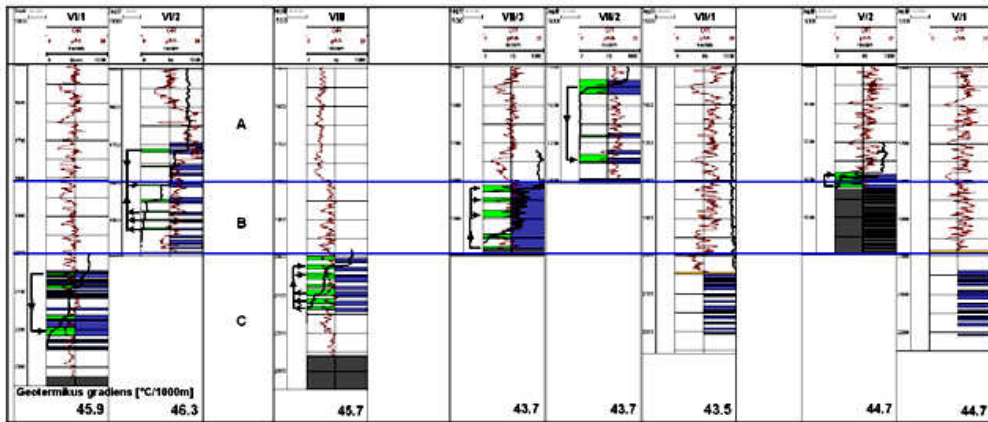


7. ábra A szűrőzés max. és min., valamint a talpmélység összefüggése (m)

3. Eredmények

A 8. ábra 8 egymáshoz közeli szentesi kút mérési adatainak rajzolt értékeit tartalmazza, az összefüggések keresése céljából. Az ábrák jelei:

- természetesgamma-szelvény (piros)
- áramlásmérés-görbe (fekete)
- szűrőzött szakaszok (lila csík)
- nem járható kútszakaszok (szürke csík)
- aktív szakaszok (zöld csík)
- átfejtődések iránya (fekete nyíl)
- járható szakasz alja (sárga)
- számított reciprok geotermikus gradiens (rajzmező alján)



8. ábra. Belső átfejtődések a szűrőzött rétegek között a szentesi kutakban (I. csoportnál)

A kutakban végzett mérések ábrázolása, részletesebb elemzése (csupán példán keresztül szemléltetem az egyes kutaknál tapasztalt jellemzőket):

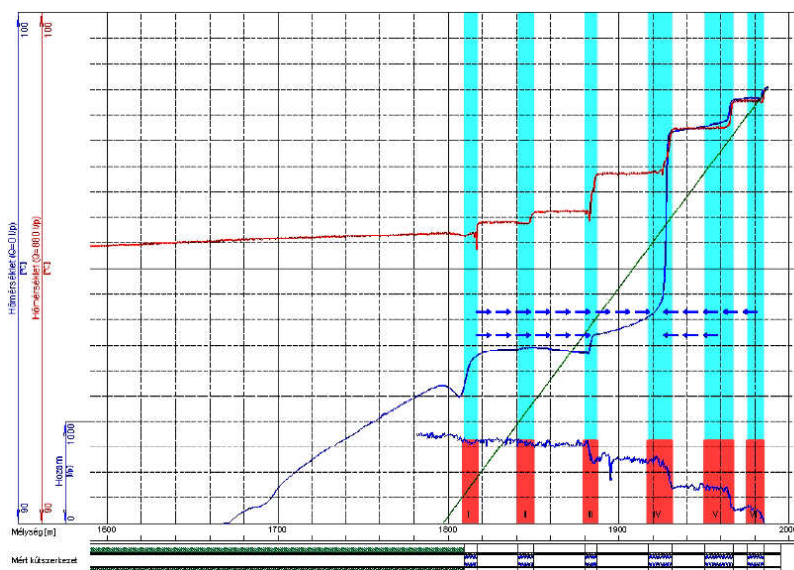
Az ábra jelei:

- kék görbe – a lezárt kútban mért hőmérsékletszelvény
- piros görbe – a termelés mellett mért hőmérsékletszelvény
- a felső ábrán kék görbe – az áramlásmérés szelvénye
- piros oszlopok – az aktív szűrők
- kék szaggatott nyilak – belső vízáramlás iránya lezárt kútnál
- ábrák felett: hőmérsékleti gradiens (zöld egyenes)

A 8. ábra szerinti példában minden szűrő termel a lezárt kútnál. Az I-es és II-es szakasz (a szakaszok felülről lefele) termelését kismértékben a III-as, de főleg a IV-es szakasz nyeli el. Figyelemre méltó, hogy a VI- és V-ös szűrő is termel lezárt helyzetben a IV szakasz felé és éppen annyit, mint termelés közben.

A kiértékelések szerint megállapítható, hogy:

- a hőmérséklet gradiensek az egymáshoz közeli kutaknál jól egyeznek
- a gradiensek között felismerhetők a területi változások,
- az átfejtődések iránya igen változatos, sok kútban a középső réteg felé van átfejtődés alulról és felülről is,
- az átfejtődések irányai használható információkat adnak az egyes termelőrétegek nyomásviszonyairól, ami a kutak termeltetésének tervezéséhez, esetleges új kút tervezésénél is figyelembe lehet venni.
- visszasajtoló kút tervezésénél lényeges az átfejtődés iránya és a nyelő, valamint termelő réteg helyzete, hőfoka.



9. ábra Szentés, Árpád-Agrár Zrt. I. sz. termálkút (2000m), számított geotermikus gradiens $44.9 [^{\circ}\text{C}/1000\text{m}]$ Kétirányú áramlás alakult ki.

A több szűrővel ellátott kutaknál az átfejtődés, egyes rétegek nyelése mindig megfigyelhető, tehát a visszasajtolás elméletileg valamilyen mértékben mindig kivitelezhető (9. ábra).

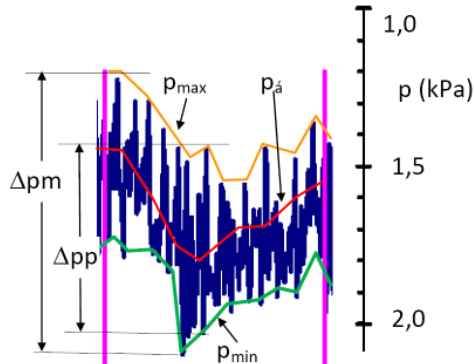
E vizsgálatok segítették a terület hidrogeológiai megismerését, a termelő kutak műszaki és hidrodinamikai paramétereinek konkrétabb jellemzőit.

3.3. Az árapály hatása a termálkutak mérésére

A mérések során a nagy felbontóképességű műszerek alkalmazása megmutatta, a megfigyelő kúton az aktív kút, pulzáló termelésváltozásának hatását.

A Hold legnagyobb vonzást a Nap együttállásával a vizsgált időszakban Újholdkor 2010. szeptember 8.-án és Holdtöltekor, 2010. szeptember 23.-án fejtette ki a Földre. A két dátum közül az Újhold a mérések során regisztrált időszakba belesik.

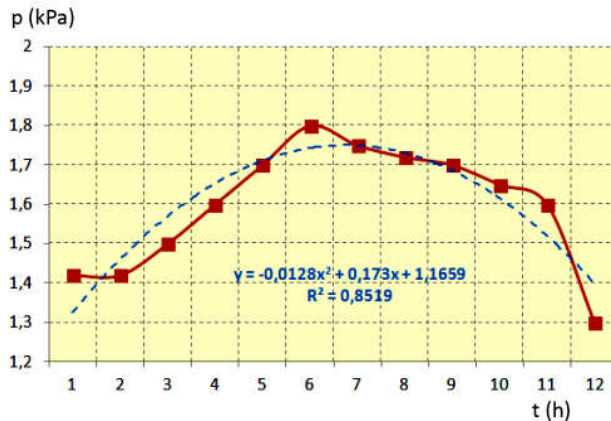
A periodikus változásokból egy 12 órás szakaszt kiemelve a 10. ábra szerinti jelleg adódik.



10. ábra A maximum, a minimum és az átlagos értékek változása 12 órás időszakba

- $\Delta p_m = 0,9$ kPa a maximális változás 12 óra alatt
- $\Delta p_p = 0,6$ kPa egy óras időszakban a méret változás
- $\Delta p_á = 0,35$ kPa az átlagérték legnagyobb változása a 12 órás időszakban

E 12 órás nyomásváltozás átlagos lefolyását a 11. ábra szemlélteti. A trend parabolikus összefüggést jelez ($R^2 = 0,8519$).



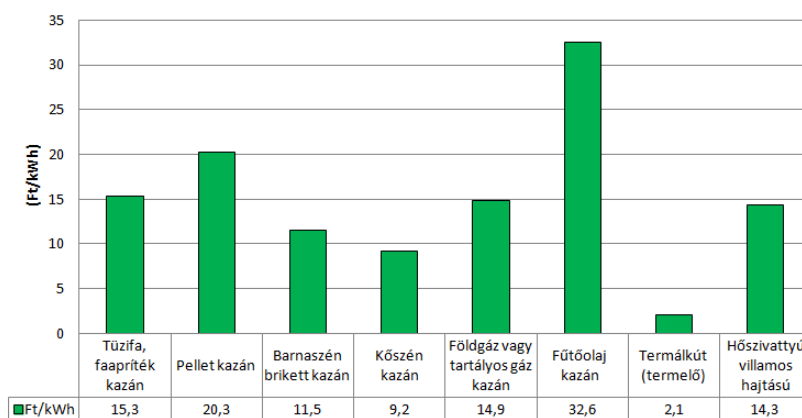
11. ábra 12 órás nyomáscsökkenés változás átlagos lefolyása

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a Nap és a Hold állása bizonyos feltételek teljesülése esetén befolyásolja a felszín alatti vizek – esetünkben a vizsgált kutak nyugalmi és üzemi vízszintjének értékét. A vizsgálatok során a vízszint változása az egyéb zavaró tényezők nélkül is havi ciklikusságban mintegy 70 cm-es, napi ciklikusságban ~15 cm-es változást mutat.

3.4. A kertészeti lehetséges fűtési rendszerek és a geotermikus fűtés összehasonlítása

Mivel a fűtési igény országosan tájegységenként különböző külső tényezők hatására változhat, ezért a táblázatokból vett értékek nem alkalmazhatóak általánosságban minden területre, inkább csak összehasonlítási célt szolgálnak.

Az energiahordozók ára meghatározásakor a magyarországi ipari felhasználókra vonatkozó árak átlagértékét vettem alapul. A berendezések árának meghatározásakor igyekeztem a jó minőségű, a jó ár/érték arányú berendezést kiválasztani.



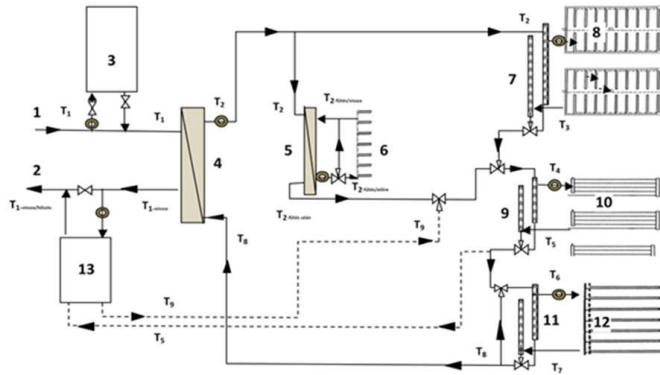
12. ábra 1,0 kWh hő teljes ára a rendszer 15 éves megtérülése esetén

A 12. ábra diagram adataiból is látszik, hogy a legelőnyösebb a termálkutas fűtési rendszer, majd ezt követik a kő- és barnaszén féleségek, a hőszivattyúzás 4. helyen van. A számítás helyes az adott szituációkra, de a hőszivattyús rendszereknek valójában a hulladéknak számító hő felhasználásánál van meghatározó jelentősége.

3.5. Növényházi fejlesztés a fenntarthatóság érdekében

Hőszivattyú használata, gazdaságossága, környezetvédelmi kérdések

A korszerű nagy légtérű házak a legfejlettebb építési technológiák és a legkifinomultabb műszaki megoldások segítségével nagyléptékű fejlődést valószínűsítenek az ágazatban. A korszerű kertészeti termesztő rendszerekben a geotermikus fluidumok energia tartalmát több lépcsőben hasznosítják, s a fenntarthatóságáról sem feledkeznek meg (13. ábra).



13. ábra Korszerű növényház elvi fűtési rendszere

Az ábra jelei: 1- termelő kút, 2- elnyelő kút, 3- puffertározó, 4- főkörök hőcserélője/hőközpont, 5- szociális épületek hőcserélője, 6- szociális épület fűtése, 7- vegetációs fűtés osztó-gyűjtői, 8- vegetációs fűtés, 9- hajtáscsúcs fűtés osztó-gyűjtői, 10- hajtáscsúcs fűtés, 11- talajfűtés osztó-gyűjtői, 12- talajfűtés, 13- hőszivattyú

A hőszivattyúval kinyerhető hőteljesítmények a tömegáram és a hőcserélőnél a ΔT (be- és kimenő fluidum hőfok különbségének) függvénye:

A - esetben

$$Q_{FA} = \dot{m}c(T_{68} - T_{25}) \quad (5)$$

B – esetben

$$Q_{FB} = \dot{m}c(T_{68} - T_{48}) \quad (6)$$

C – hőszivattyú révén

$$Q_{FC} = \dot{m}c(T_{48} - T_{13}) \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - 1} \quad (7)$$

B és C esetben együttesen:

$$Q_{F(C-B)} = Q_{FB} + Q_{FC} \quad (8)$$

A fentiekből kitűnik, hogy a visszasajtolás, vagy elfolytatás előtti hőszivattyú alkalmazással kinyerhető energia 60-80%-ban megközelítheti a közvetlen felhasználáskor nyert energiát. Helyes kalkulációnál ezt az energiát, és a hőszivattyú alkalmazás üzemeltetési költségét kell szembe állítani egy új kútpár beruházási költségével, ill. elfolytatás esetén a környezetterhelési adóval. A számítás még új kút furására is pozitív eredményt mutat. E rendszer különösen előnyös akkor, ha az ültetvényünket növeljük, s nő az energia igény, de új geotermikus beruházást nem kívánunk létesíteni.

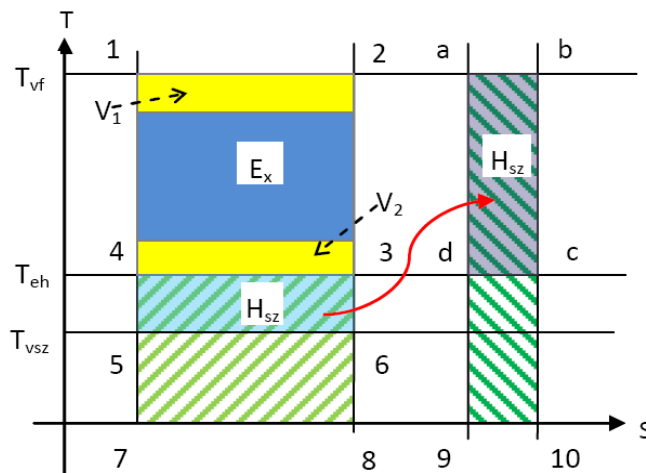
Összegezve: azokon a helyeken ahol a visszasajtolás problémamentesen megoldható, a rendszer versenyképes egy új kúppárral létesített közvetlen hőnyeréssel. A hőszivattyú a megújulókból származó villamos energiával táplálva a leginkább szolgálja a fenntarthatóságot.

A hőszivattyúval kiegészített fűtési rendszer vizsgálata exergia alapon (14. ábra)

T-s diagramban T_{vf} hőmérséklet biztosításához az 1-2-7-8 pontok által határolt terület jelzi a szükséges hőmennyiséget. A környezetben rendelkezésre áll a 3-4-7-8 terület által jelzett hőmennyiség. Exergetikailag ha a referencia hőmérséklet egyenlő a környezeti hőmérséklettel, akkor az 1-2-3-4 terület (a V_2 veszteségeket leszámítva kapjuk) a hasznos felhasznált energia (E_x). A vegetációs fűtés hőfokát (T_5) (hőmennyiséget) a hőszivattyú szekunder (kondenzációs) oldaláról segítjük, amit a környezetnek vissza nem adott hőből veszünk el.

Az ábrán a két terület a 3-4-7-8 és az a-b-9-10 egyenlő (veszteségekkel nyilvánvalóan nagyobb). Ennek az exergia-tartalma (a-b-c-d) megfelel a vegetációs fűtéshez megkívánt hőfokszintnek.

Jó exergetikai hatásfokú a fűtési rendszerünk abban az esetben, ha pontosan annyi exergiát használunk el, mint amennyi szükséges. A gyakorlatban ehhez kell megválasztani a hőszivattyút.



14. ábra A hőszivattyú alkalmazása révén a rendszer exergiája növekszik

Végül is a hőszivattyúzás révén a rendszer exergiája növekszik, a fűtővíz jelentősen különbözik jellemzőiben a környezetétől. Ez fennáll mind a belső, mind a külső környezetre is, de lényeges, hogy a kritikusabb téli időszakban magasabb exergia tartalommal rendelkeznek, mint egy forró nyári napon.

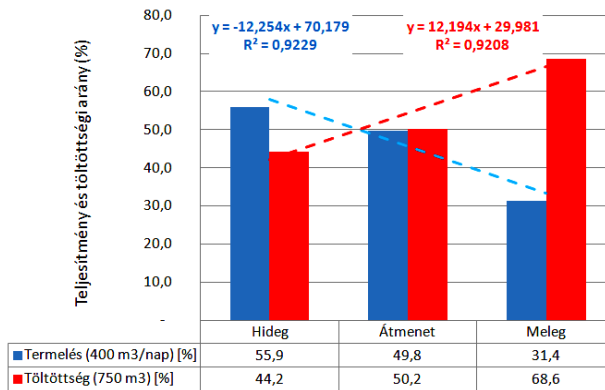
3.6. Puffer tároló mérési eredmények

A növényházak fűtőrendszerének folyamatosan azt a hőt kell pótolnia, amely a burkolaton és a szellőző levegővel átadódott a környezetnek. A januári óránkénti

3. Eredmények

átlaghőmérsékletben 4 nap alatt 24°C –os eltérés is kialakul, amelyet a fűtési teljesítménnyel követni kell, de ezt még fokozza, hogy az időjárás éppen napsütéses (nagy radiációval), vagy ködös-felhős, amikor a gyengébb szórt sugárzás érvényesül. E szélsőségek miatt a rendszer bivalens fűtést igényelhet, ha a kút (ak) hőteljesítménye nem elégséges (pl. gázkazán). A gyors változások tartalék hőtároló kapacitásokkal jól követhetőek, de kútoldali meghibásodások idejére is előnyösek lehetnek.

Kútfelesleg esetén a tartály töltése folyik, energia többlet esetén pedig a tároló szolgáltatja a kiegészítő fűtést. 3 jellemző időszakot vizsgáltam meg (15. ábra) és megállapítottam, hogy szélsőséges időjárások és havária jellegű hideg esetén is 6-8 órára a puffer biztonságos üzemet jelent.



15. ábra A tároló töltöttségének és a folyamatos vízpótlás (termelés) arányának alakulása a jellemzőbb környezeti hőmérsékleti időszakokban.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A termálkutakban a vízadó rétegek mozgásának jellemzői az üzemeltetés fázisaiban

A Szegvár és Szentés térségében lévő 20 db termálkút részletes vizsgálata, valamint az in situ mérések eredményei alapján megállapítottam, hogy a talajszinthez számított nyugalmi vízszint az elmúlt 40 évben 25-30 m-t csökkent. Bizonyítottam, hogy a kutak pihentetése során az egyes vízadó rétegek között átfejtődéssel „fluidum rétegcsere” alakul ki. Tehát a különböző vízadó rétegek közötti átfejtődés miatt, a nyugalomban lévő kutakban is van fluidum mozgás, ami azt is jelenti, hogy termelés közben vízadó rétegek, víznyelő rétegekként is képesek működni. Általában a nyugalmi időszakban, az időszak kezdetén a töltődés az addig vízadó réteg felé irányul, s ezáltal az áramlás a kúttesten keresztül vertikálisan fel és lefelé is irányulhat az egyes szűrőzött rétegek között.

2. A kutak mérési idejének befolyása

A mérési adatok elemzésével kimutattam, hogy a nyugalomban lévő Dél-Alföldi porózus bázisú termálkutak vízszintjét nem csak az átfejtődések, hanem napi illetve havi periodicitást mutatva a Hold ár-apály jelensége is befolyásolja.

Igazoltam, hogy a hiteles kútmérésre és összehasonlításra csak az azonos Hold-ciklusban elvégzett mérések alkalmasak.

3. A visszasajtolás szükségessége és lehetőségei homokkő vízadó rétegeknél

Bizonyítottam, hogy a Dél-Alföld térségében a karbantartott kutaknál – a vízszintcsökkenés valamint a ~40-45 éves folyamatos termelés ellenére számottevő hozamcsökkenés még nem mutatható ki. A Dél-Alföld területén lévő kutak vízadó rétegei között a különböző áramlási és hőmérsékleti, valamint mélységi gradiensek, s a nyelési rétegek között korreláció áll fenn, ami az egymásra hatásukat mutatja. Igazoltam, hogy a használt (csökkentett entalpiájú) víz visszasajtolása lehetséges, vagyis a szükséges alapfeltétel elméletileg adott. Sikeressége azonban nagymértékben függ a kőzetváz tulajdonságaitól (szemcseméret, pórusjáratok mérete, migráló anyag tartalom stb.). Bizonyítottam, hogy a visszasajtolás tervezésére csak az adott rétegre megnyitott és beszűrőzött, a vízadó és nyelő réteg megfelelő állapotát bizonyító monitoring kút alkalmas.

4. Növényházi fűtés gazdaságossága geotermikus fluidumból nyert energiával

Kimutattam, hogy a növényházak fűtésére az összes energiahordozó közül (a jelenlegi piaci árak mellett) a konvekcióval kinyert geotermikus energia a leggazdaságosabb. Leginkább eredményes a három hőfokszintes fűtés, valamint az időjárás okozta eltérő igények miatt puffertároló és a visszasajtolás előtt a fluidumban maradt „hulladék hő” exergiájának megnövelése és az így nyert hőtartalom visszakeringtetése a rendszer vegetációs fűtési fázisába. Még azon

esetben is, ha hőszivattyú alkalmazása után az exergiájától megfosztott víz visszasajtolásra kerül, s az új visszasajtoló kút költségeivel is terheljük a felhasznált fajlagos energia költséget.

5. A csökkent entalpiájú fluidum visszasajtolás előtti hőszivattyú alkalmazásának gazdaságossága, környezeti hatása

Kimutattam, hogy a hőszivattyús rendszer létesítésének költségét a nyert többlet energia (a kedvező COP, ill. SPF hatására) és az új kútpár létesítésének- és fenntartásának költségét (2015. évi árakon) 2,5-3,0 év alatt kompenzálja. A „használtvíz” entalpiájának hasznosítása gazdasági előnye ellenére, a környezetvédelemre a jelenlegi villamos energia előállítás (energia mix) CO₂ kibocsátása alapján a földgáztüzeléshez (a közvetlen gázfűtéshez) viszonyítva, csak COP~6,0-os érték fölött van kedvező hatása. Bizonyítottam, hogy a hőszivattyú alkalmazás környezetvédelmi szempontból (légköri kibocsátása), csak a megújuló energiákból nyert villamos energia használatával lehet jobb, mint a földgáztüzelés. A legjobb megoldás, - ha elegendő metántartalom áll rendelkezésre - a leválasztott és szárított metán elégetésével nyert villamos- vagy mechanikai energiával hajtott hőszivattyú alkalmazása.

6. Puffertároló kihasználtsága, a környezeti hőmérséklet és a fűtési igény

Igazoltam, hogy a kertészeti üvegházak fűtési rendszerébe épített puffer-tároló elősegíti a termelés biztonságát (nagyarányú s gyors időjárás változás és rendszerhibák esetén), mérsékli a tartalékként szükséges (rendelkezésre álló kútkapacitást), ill. tartalék energiaforrás létesítésének beruházási és rendelkezésre állási költségét. A meleg és a hideg időjárástól függően a tárolók töltöttsége és a fluidum kitermelése fordított arányt mutat ($R^2 = 0,92$). Bizonyítottam, hogy a visszasajtolás és a hőszivattyú használata, valamint a puffer tárolók alkalmazása egyaránt előnyös a fenntarthatósági, a környezetvédelmi valamint a kertészeti felhasználás gazdaságossága tekintetében is.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kitermelés során elsődleges szempont kell legyen az energiatakarékosság, annyi vizet és hőt szabad kitermelni, amire valójában szükség van. Olyan szivattyús rendszereket kell használni, melyek pontosan és jól szabályozhatók, hatásfokuk magas, energiaigényük, karbantartási igényük alacsony. Fontos szempont a hő tárolása, a szabályozhatóság szempontjából előnyös a nagy hőtároló képességű puffer tartályok használata, melyekkel a felhasználási csúcsok és völgyek kisimíthatóak, a rendszer lengései csökkenthetőek.

A kitermelt hő legkomplexebb és legjobb hőhasznosítására kell törekedni. A felhasználás során előnyben kell részesíteni azokat a felhasználási módokat, ahol a leginkább megoldható a kitermelt hő maradéktalan hasznosítása. Pilot projekteket kell létrehozni, ahol az új technológiák transzparenssek, tanulhatóak, megismerhetőek valamint folyamatos mérésre és megfigyelésre alkalmasak. A felhasználási helyek energiahatékonysága a felhasználás egyik legfontosabb feladata. A korszerű anyaghasználat és technológia bevezetése jelentős javulást eredményez a veszteségek csökkentése érdekében. A hő továbbításakor korszerű, kis áramlási- és hőveszteségekkel rendelkező rendszereket szabad csak kiépíteni, a meglévőket korszerűsíteni. Ez az a pont, ahol a legkisebb befektetéssel a legnagyobb eredmény érhető el a legjobb megtérülési idő alatt.

A felső-pannon homokkövekben fenntartható módon megvalósítható geotermikus energiatermelés érdekében javaslom a hazai költségviszonyoknak megfelelő visszasajtoló kútkiképzési technológia kifejlesztését: kavicságyaszűrős és ún. „Frac&Pack” hidraulikus rétegrepesztési kútkiképzési technológiával. Fontos az így kiképzett visszasajtoló kutak működésének és a kialakuló besajtolási mechanizmusok hosszú idejű vizsgálata, értékelése és validálása. Lényeges a felső-pannon homokkövekben vízvisszasajtolás hatására bekövetkező réteggárosodások laboratóriumi vizsgálata és a réteggárosodásokat megszüntető rétegkezelési technológia kidolgozása.

A felszíni elhelyezés sok esetben az egyetlen mód az elhűlt termálvizek kezelésére. A betározás illetve pihentetés a nagy felületű, azonban sekély mélységű tározótavakban a legkedvezőbb. A tárolás során a víz hőmérséklete a környezeti hőmérsékletre hűl. A tározás időtartama alatt a víz csapadékvízzel hígul, valamint biológiai folyamatok indulnak el benne. Az így létrehozott tó vagy tórendszer mesterséges, azonban segítségével a mára drasztikusan lecsökkent és a folyó szabályozás előtti Kárpát-medence szikes-vizes élővilágát idéző vizes élőhelyek jönnek létre, segítve ezzel is biodiverzitást. A nádasok gyökérszomszomszágában ásványi anyag megkötő szerepe ökológiai, évközben a gazdag madárvilág számára pihenő-, fészkelő- és élőhely biztosítása ornitológiai, valamint a rendszeres vágása gazdasági szempontból sem elhanyagolható.

A tározótó intenzív és extenzív halászati területként egyaránt felhasználható, partján üdülést, pihenést, rekreációt biztosít.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A hazai geotermikus energia felhasználás több évtizedes múltja tekint vissza, elsősorban a közvetlen hasznosítás területén. Az elmúlt 10 évben a szakma és a közvélemény a hátrányos jogszabályi változásoknak köszönhetően ismerte meg jobban ezt a technológiát. A hazai energetikai felhasználók nagy része a kertészetek közül kerül ki. Az energia kinyerése és hasznosítása, a különböző technológiák, valamint a víz elhelyezése mind-mind külön szakterületet képviselnek. A mintegy 16 éves üzemeltetési gyakorlatom során nagyon kevés olyan szakemberrel találkoztam, akik a teljes folyamatot részleteiben, szakszerűen teljes komplexitásában átlátták. Az egész rendszer sikere sok szakterület és tudomány interdiszciplináris kapcsolatán alapul. Az egy-egy szakterület jeles képviselői, professzorok, épületgépészek, építészek, geológusok, geofizikusok, fűtőmérnökök összehangolt munkája jelentheti az ágazat fejlődését és a felmerült problémák hatékony megoldását.

Értekezésemben 20 db ma is üzemelő termálkút kútvizsgálatán keresztül kerestem a választ a fenntartható hévízkitermelés leghatékonyabb módjaira, nem feledkezve meg a kinyert hő hasznosításáról és a végső vízelhelyezésről. Munkám során fontos szerepet kapott a hévíz-földtani összefüggések megismerése, a geológiai viszonyok feltérképezése, a kút kialakítás kérdései. Mindezek együttesen teszik lehetővé egy olyan előre tervezhető fűrési, kiképzési, kitermelési és hasznosítási rendszer kiépítését, amely megnyugtató módon kezeli mind az ökológiai, mind az ökonómiai kérdéseket. A kitermelt geotermális fluidum elhelyezése sokáig hitkérdés volt. Ehhez hozzájárult, hogy a próbálkozások során a szakma soha nem tudott leülni és valódi tényekkel és érvekkel alátámasztva vitázni a felmerült kérdésekről. Mivel a felhasználóktól nem várható el hogy visszasajtolási technológiát fejlesszenek, ezért ennek felelőssége, a tervezhető, garantált kis fűrési és üzemeltetési kockázatot rejtő kútkiképzés kidolgozása és paraméterezése a szakma feladata.

Dolgozatomban a megújuló energia hasznosításon belül a geotermikus energia hasznosítás egyik speciális esetét vizsgáltam, a termálvíz kitermeléssel járó hőhasznosítást.

Új tudományos eredményeket fogalmaztam meg. Téziseimben rávilágítottam olyan összefüggésekre, amelyek vizsgálata nélkül a jelenleg alkalmazott kitermelési és hasznosítási technológiák nem tarthatóak fenn hosszú távon.

Javaslataim kategorizáltam, amelyek minden érintett résztvevő számára hasznosítható információt szolgáltatnak.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk idegen nyelven

1. **Nagygál, J.** - Tóth, L.- Horváth, B.- Fogarassy, Cs. (2017): Thermal water utilization in the hungarian greenhouse practice. THERMAL SCIENCE Year International Scientific Journal, 2017 vol. OnLine-First (00) , ISSUE 4, DOI:10.2298/TSC1160831011N, (IF 0,98), <http://doiserbia.nb.rs/issue.aspx?issueid=2824>
2. **Nagygál, J.** - Tóth, L.- Beke, J. – Szabó, I. (2015): Comparison Of Possible Greenhouse Energy Sources. Published online: <http://hae-journals.org/>. HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676, pp. 47-53.
3. **Nagygál, J.** - Tóth, L. - Horváth, B. - Bártfai, Z. – Szabó, I. (2015): Enhancing The Efectivenes Of Thermal Water Consumption Via Heat Pumping Applied Studies in Agribusiness and Commerce Official Periodical of the International MBA, Network in Agribusiness and Commerce AGRIMBA, Vol. 11. Number 4. pp. 53-99. HU-ISSN 1789-221X – Electronic Version: ISSN 1789-7874 Home Page: <http://www.apstract.net>
4. **Nagygál, J.** – Tóth, L. (2016): Used thermal water reinjection. Hungarian Agricultural Engineering N° 30/2016, Published online: <http://hae-journals.org/> HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676 pp. 41-47.

Lektorált cikk magyar nyelven

1. **Nagygál, J.** – Tóth, L.(2011): Termesztő berendezések energia- és klímajellemzői, Agrárium 20. évf. 2011/10. október 38-40. o.
2. **Nagygál, J.** – Tóth, L. (2014): Növényházaknál használható energia-hordozók összehasonlító elemzése Mezőgazdasági Technika, 12. sz. 2-5. o. http://technika.gmgi.hu/uploads/termek_652/novenyhazaknal_hasznalható_energiahordozok_osszehasonlító_emezése_14_12.pdf
3. **Nagygál, J.** - Tóth, L. – Schrempf, N. (2016): Energiaellátás, jelen és jövő Mezőgazdasági Technika Gödöllő, 2. sz., 2-6. o. Index: 25 569, HU ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
4. **Nagygál, J.** – Schrempf, N. – Tóth, L. (2016): A geotermikus energia felhasználása kertészetekben Mezőgazdasági Technika Gödöllő, 5. sz. , 2-6. o. Index: 25 569, HU ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu

5. **Nagygál, J.** (2007): A geotermikus energia hasznosítása a mezőgazdaságban. Agrárunió szaklap, VIII. évfolyam 4. szám, 28-29. o. ISSN: 1589-6846
6. **Nagygál, J.** – Vas, A. (2002): Hibrid hajtás mezőgazdasági erőgépeken. Mezőgazdasági Technika. 2002. 43. 5. 2-4. o.
7. **Nagygál, J.** (2010): Nemzetgazdasági Minisztérium Új Széchenyi Terv, Termál Egészségipar fejezet, 49, 56-59. o.
http://www.polgariszemle.hu/app/data/szechenyiterv_vitairat.pdf