

TDK

Geotermikus erőmű illesztése kimerült szénhidrogén kutakhoz

Konzulensek:

Dr. Ósz János

Groniewsky Axel

Szekszárdi Adrienn

Szerzők:

Mayer Martin János

Nyerges Viktor

Schróth Ádám

TARTALOM

ELŐSZÓ	V
Jelölések jegyzéke	VII
1. Bevezetés [1.]	1
1.1. Mi is az a geotermikus energia?	1
1.2. Magyarország geotermikus adottságai	1
1.3. A geotermikus energia hasznosítása	2
1.4. Geotermikus energia hasznosítása áramfejlesztésre	3
1.4.1. Szabad gőzkibocsátó technológia	4
1.4.2. Kondenzációs üzemek	4
1.4.3. Segédközeges üzemek	6
2. Feladat.....	9
3. A vizsgált megoldások bemutatása.....	13
3.1. Peremfeltételek	13
3.2. Számítási módszer	13
3.3. Kétkörös ORC körfolyamat.....	15
3.4. Egykörös ORC körfolyamat	18
3.4.1. Korlátok	22
3.4.2. Modell validálás.....	24
3.5. Az erőmű éves üzemvitelének értékelése természetes cirkulációjú, léghűtéses rendszer esetén.	25
4. Gazdasági számítások.....	29
4.1. Beruházási költség	29
4.2. Bevétel	29
4.3. NPV	30
4.4. IRR.....	31
5. Egyéb munkaközégek alkalmazhatóságának vizsgálata.....	33

5.1. Propán	34
5.2. R22	36
5.3. R32	37
5.4. R134a	37
5.5. R125	37
5.6. A munkaközégek összehasonlítása	41
6. Összefoglalás.....	43
7. Források	45
8. Ábrajegyzék	46
9. Diagramjegyzék	46
10. Táblázatjegyzék.....	47
11. Melléklet	49

ELŐSZÓ

TDK dolgozatunkban olyan energiaátalakítási lehetőségeket vizsgáltunk, melyekkel a kimerült szénhidrogén kutak kismértékű átalakításával a mélyükben rejlő geotermikus energia a villamosenergia-termelésre hasznosítható. A dolgozatunk alapvetően a Mining Support kft által meghirdetett tanulmányi versenyre készült, majd később érdemesnek találtuk további bővítésre, TDK dolgozatnak.

A kút, amelyre a villamosenergia-termelő körfolyamatot illesztettük egy fiktív, 2200 talpmélységű kimerült szénhidrogén kút. A kút belsejébe koaxiális elrendezésben egy termelőcső helyezkedik el. A béléscső alja lezárásra kerül. A munkaközeg a külső gyűrűben lefelé haladva felmelegszik majd visszafordulva a belső csőben halmazállapotot váltva a felszínre jön.

A tanulmányi verseny alatt a hőhordozó közeg, amelyre vizsgálatokat végeztünk szén-dioxid volt. A verseny lezárulta után további közegek is felmerültek alternatívaként, mint a propán, R22, R32, R125.

A geotermikus alapú villamosenergia-termelés két leggyakrabban előforduló típusát vizsgáltuk. Mindkét megoldás esetében problémás rész volt a szén-dioxid visszahűtése, ugyanis a kút, amelyre illesztettük a körfolyamatot vízhiányos környezetben helyezkedik el.

Első közelítésben a kétkörös típust, amikor a kútból feljövő szén-dioxid egy hőcserélőn keresztül adja át hőjét egy másodlagos munkaközegnek, majd ez a munkaközeget expandáltatjuk turbinán. A kétkörös energiatermelési módot el kellett vetnünk, mivel a szén-dioxid visszasajtolási hőmérséklete kötött volt, ami miatt a körfolyamat elérhető hatásfoka túlságosan alacsonynak adódott.

A másik típus, amely ígéretesebb megoldást nyújtott, egykörös rendszer volt, amelynél a kútból feljövő szén-dioxidot expandáltatjuk a turbinán.

Budapest, 2014.10.29.

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
v	fajtérfogat	m^3/kg
h	fajlagos entalpia	kJ/kg
p	nyomás	bar, Pa
s	fajlagos entrópia	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
w	fajlagos munka	kJ/kg
$\dot{m}$	tömegáram	kg/s
T	hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$, K
H	mélység	m
$\dot{Q}$	hőteljesítmény	W
R	specifikus gázállandó	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
η	hatásfok	1
Φ	Bošnjaković -féle hatásossági tényező	1

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
r	redukált
cr	kritikus
elg	elgőzölgési
ki	kilépő
th	termikus
hőhaszn	hőhasznosítás
össz	összes
id	ideális
turb	turbina
kútfej	kútból kilépő

1. BEVEZETÉS [1.]

1.1. *Mi is az a geotermikus energia?*

A geotermikus energia a Föld belsejének hőtartalékát jelenti, ami döntően a földkéregben koncentrálódó hosszú felezési idejű radioaktív elemek bomlási hőjéből táplálkozik. A geotermikus energia a felszín és a mélyebb zónák közötti hőmérséklet-különbség miatt sugárzás, áramlás és vezetés révén a Föld felszíne felé igyekszik, felhasználás hiányában felemésztyődik az atmoszférában.

A geotermikus energia egyik fontos jellemzője a geotermikus gradiens. A geotermikus gradiens a felszín alatti hőmérséklet-növekedés mérőszámaként használt mutató. Értéke 10 és 60 °C/km között változik. 15 °C-os felszíni átlaghőmérséklettel számolva 2 km-es mélységben már 65-75 °C-os hőmérsékleti értékekre számíthatunk. A Föld belsejéből származó hő eloszlása a Föld különböző területein nem egyenletes. Ezért a geotermikus energia fő élvezői nyilvánvalóan azok az országok, melyeknél fekvésükből adódó lemeztektonikai helyzetük miatt kiugróan magas a geotermikus gradiens értéke.

1.2. *Magyarország geotermikus adottságai*

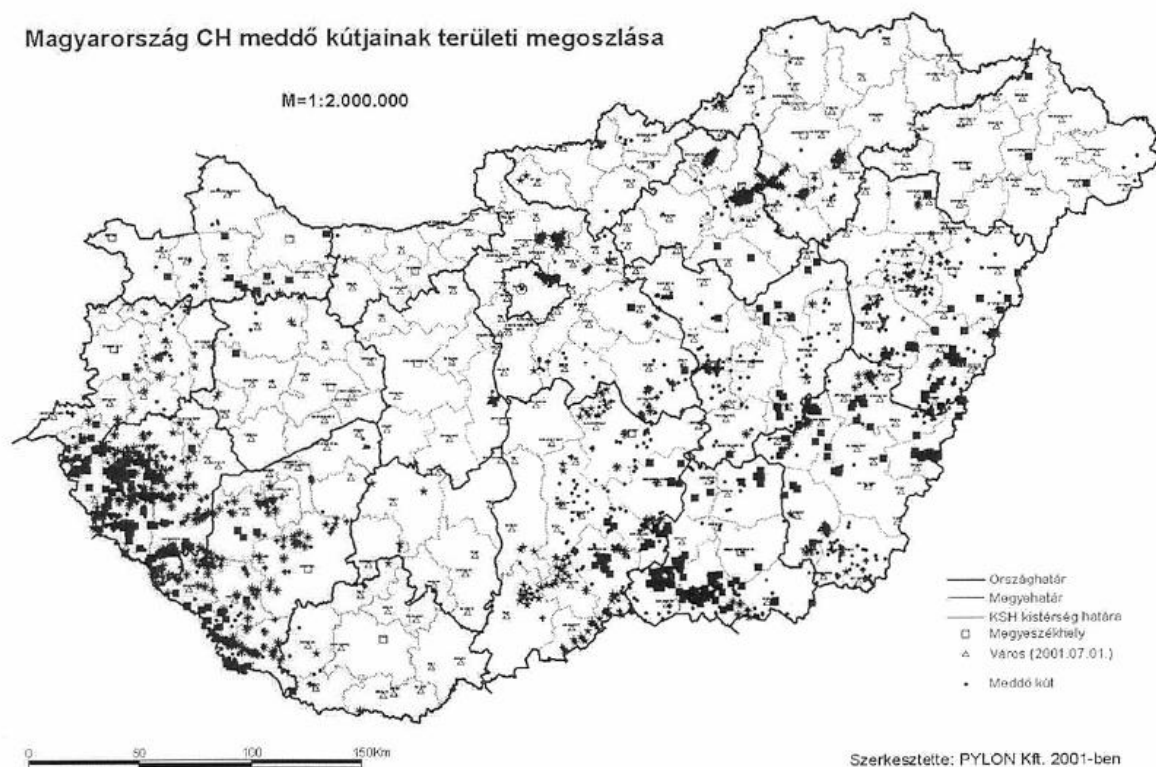
Magyarország területe, a Pannon-medence alatti különlegesen vékony, 60-100 km-es litoszféra miatt sorolható-geotermikus adottságait tekintve- Európa élvonalában. A litoszféra kivékonyodása az alsó- és középső-miocén lejátszódott geodinamikai események következménye.

A kedvező adottságokat jelzik a hőáramsűrűség értékek is. Maximum 90-120 mW/m², de a jellemző érték is eléri a 80-110 mW/m²-t, ami meghaladja az európai kontinensre jellemző átlagos 70-90 mW/m²-t.

A magyarországi geotermikus gradiens átlagosan 50 °C/km. Ebben, a kedvező hőáramsűrűség mellett szerepet játszik az is, hogy jól szigetelő agyag és homok alkotja a medenceüledéket. A geotermikus gradiens a Dél- Dunántúlon és az Alföldön nagyobb, a Kisalföld és a hegyvidéki területeken pedig kisebb, mint az országos átlag.

Magyarországon a kedvező adottságok ellenére a felszínen mérhető vízhőmérséklet csak ritkán haladja meg a 100 °C-ot.

Hazánk igen jól megkutatott ország, ami azt jelenti, hogy a fúrásos megkutatottsága az egyik legnagyobb a világon (1 fúrás/5 km²). A szénhidrogén-ipar által 66 év alatt lemélyített meddő fúrások száma mintegy 3000 db, amelyeknek területi elhelyezkedését a 1-1. ábra mutatja. [10.]



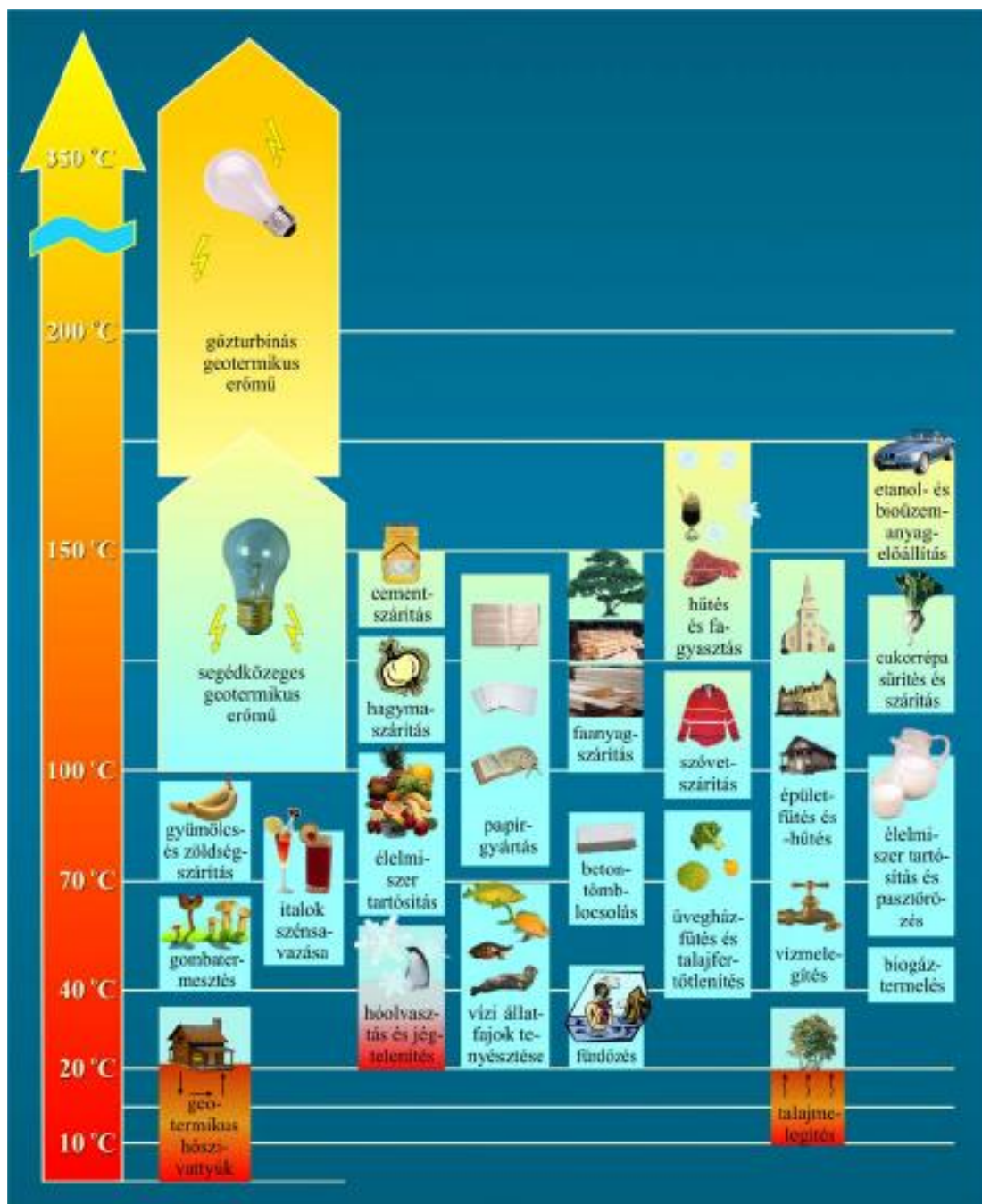
1-1. ábra. Magyarország meddő kútjainak területi megoszlása [10.]

1.3. A geotermikus energia hasznosítása

A 1-2. ábrán látható, hogy különböző hőmérsékleti szinteken milyen módon érdemes hasznosítani a geotermikus energiát.

A jelenlegi gazdasági környezetben nagyjából 100 °C feletti hőmérsékletű közegek használata esetén tekinthető gazdaságosnak a villamosenergia-termelés. Számos kutatás folyik annak érdekében, hogy már alacsonyabb hőmérsékleti szinteken is lehetővé váljon a geotermikus források áramtermelésre való kiaknázása.

Dolgozatunk fő célja, hogy elfogadható hatásfokú (6% feletti) és gazdaságos villamosenergia-termelő körfolyamatot hozunk létre, ezért a geotermikus energia egyéb hasznosításával a továbbiakban nem foglalkozunk.



1-2. ábra. Lindal-diagram [1.]

1.4. Geotermikus energia hasznosítása áramfejlesztésre

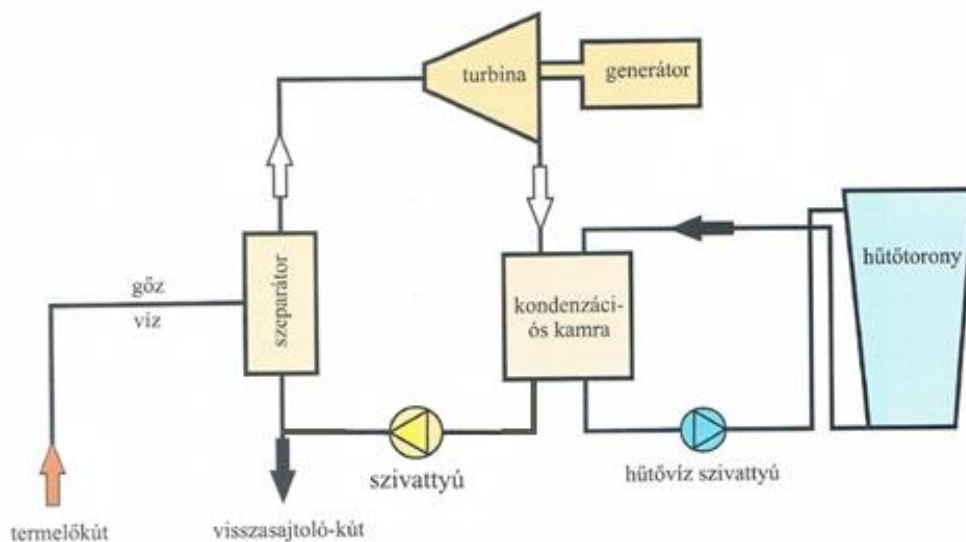
Az áramfejlesztés a geotermikus energiaforrás jellegétől függően történhet hagyományos gőzturbinákkal vagy segédközegezes eljárással. A gőzturbinák meghajtásához legalább 150 °C hőmérsékletű fluidum szükséges. Működtetésük történhet úgy, hogy a gőz a turbinák meghajtása után egyszerűen a környezetbe távozik, vagy úgy hogy lecsapják.

1.4.1. SZABAD GŐZKIBOCSÁTÓ TECHNOLÓGIA

A szabad gőzkibocsátó technológia a legegyszerűbb és legolcsóbb áramtermelő megoldás. A folyamat lényege, hogy a feltárt gőzt turbinán expandáltatják, majd a turbina után közvetlen a szabadba távozik. Az expanzió előtt fontos, hogy a gőz és víz fázist elkülönítsék egymástól. Ezt rotációs szétválasztó generátorral valósítják meg.

A villamosenergia-termelés e fajtáját főleg ott alkalmazzák, ahol a felszínre jövő gőz nagy részarányban tartalmaz kondenzátorban nem kondenzálódó gázokat.

1.4.2. KONDENZÁCIÓS ÜZEMEK



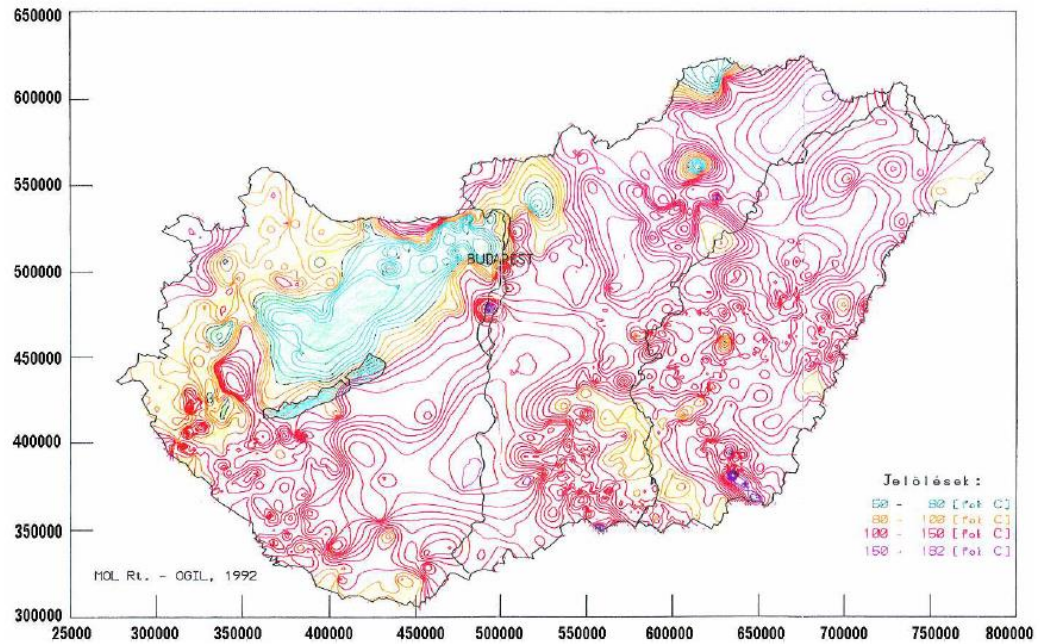
1-3. ábra. Kondenzációs geotermikus erőmű sematikus ábrája [1.]

A kondenzációs üzemeknél az expanzió után a gőz alacsony nyomású kondenzátorba kerül. Az alacsony kondenzátornyomás miatt nagyobb entalpiaesés érhető el a turbinán, így a rendszer teljesítménye nagyobb a szabad gőzkibocsátó technológiáénál. A technológia hátránya, hogy a kondenzátor és a hozzá tartozó hűtőrendszer jelentősen megbonyolítja és megdrágítja a rendszert.

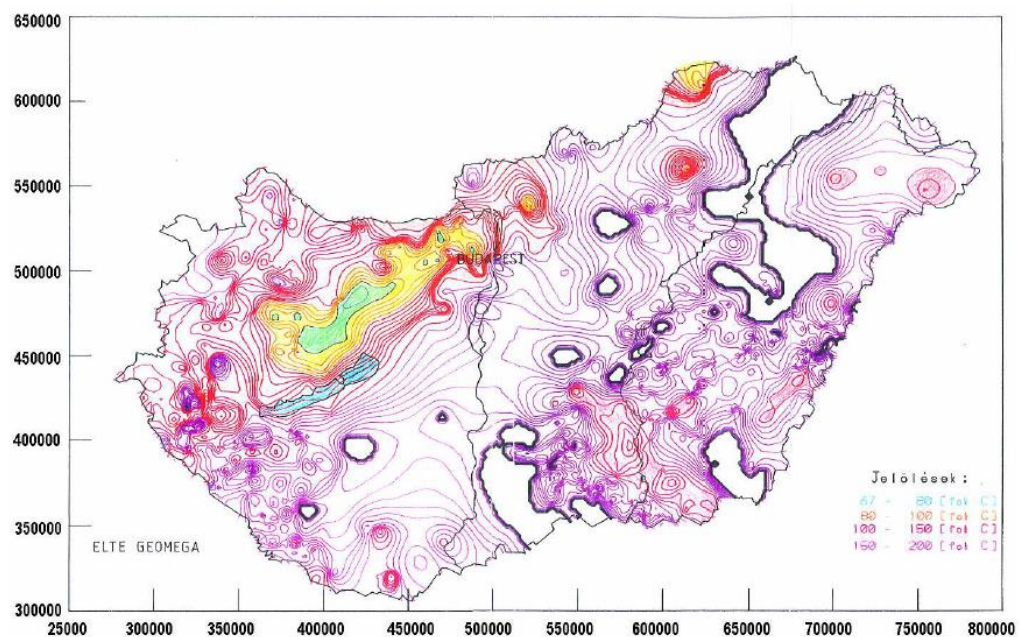
Mivel Magyarországon főleg 150 °C alatti közeghőmérséklet előfordulása a valószínű, ezért a gőzturbinás villamosenergia-termelés helyett a segédközegek rendszereket érdemes vizsgálni.

Ennél magasabb hőmérséklet csak mélyebb fúrásokkal érhető el, de ez a beruházási költségeket jelentősen növeli, tekintve, hogy a mélységgel közel exponenciálisan nőnek a fúrási költségek [4.]

Az izotermák alakulását 2000 m-es, illetve 3000 m-es mélységben a 1-4. ábra és 1-5. ábra mutatja.

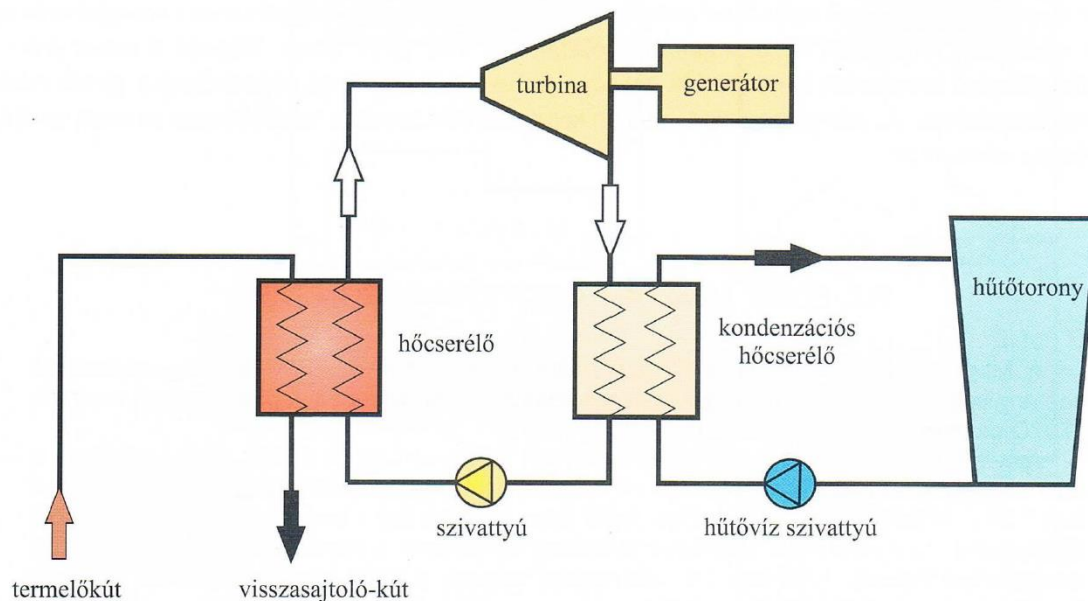


1-4. ábra. Hőmérséklet eloszlás 2000 m mélységben [10.]



1-5. ábra. Hőmérséklet eloszlás 3000 m mélységben [10.]

1.4.3. SEGÉDKÖZEGES ÜZEMEK



1-6. ábra. Binér geotermikus üzem sematikus ábrája [1.]

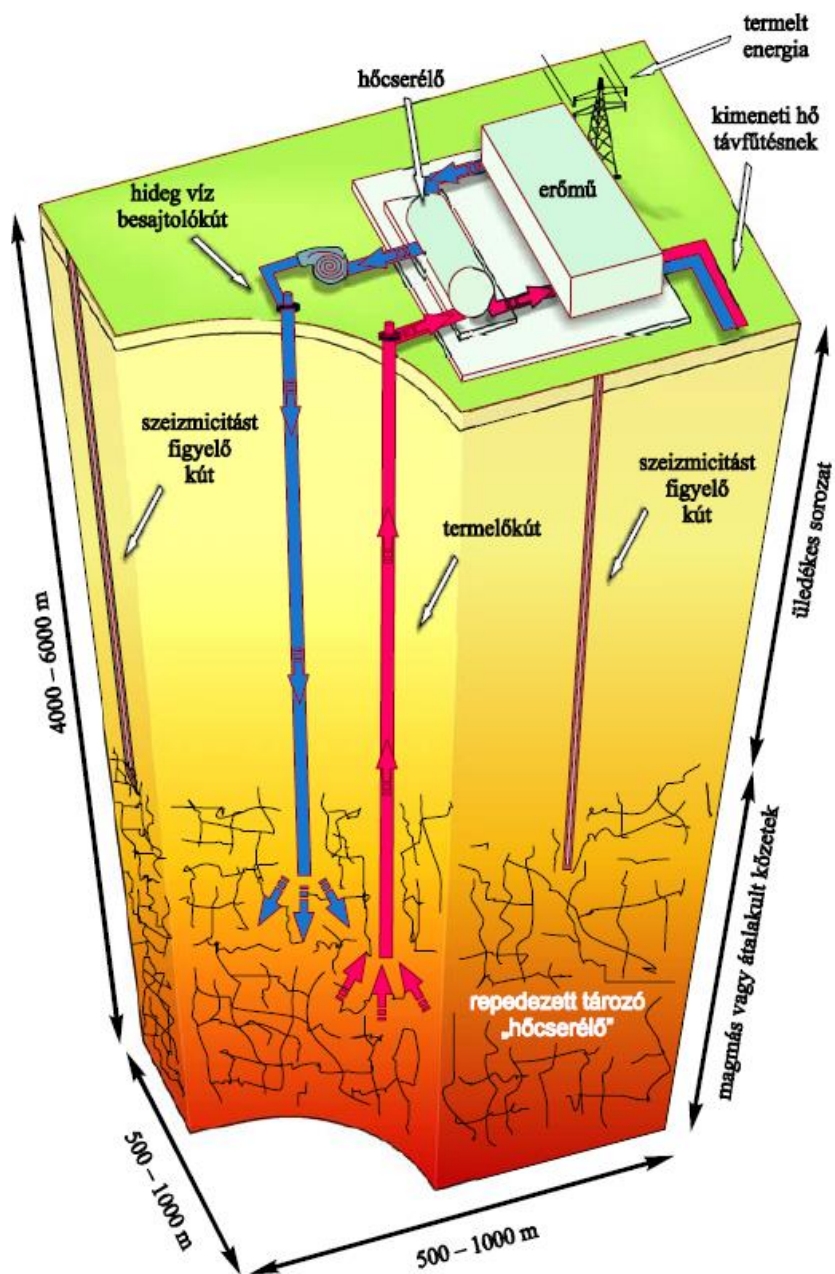
A 150 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű geotermikus fluidumok áramtermelési felhasználásának technológiája attól kezdve indult érdemi fejlődésnek, amióta a segédközeges üzemeket sikerült tökéletesíteni. Ezek költséghatékony és megbízható technológiát kínálnak a termálvizek áramtermelési hasznosítására 100 °C körüli alsó határig. A geotermikus energiát ezekben az üzemekben egy másodlagos folyadék bekapcsolásával, hőcserélőn keresztül hasznosítják. A másodlagos munkafolyadék többnyire alacsony forráspontú, a vízgőzhöz képest normál hőmérsékleten igen nagy gőznyomású szerves vegyület. Általában n-pentán vagy izo-pentán vagy izo-bután. A felső hőmérsékleti határ a binér rendszer szerves fluidumának hőstabilitásától függ. Akár 175 °C-os termálvíz is hasznosítható e technológiával. Az alsó hőmérséklet pedig a hőcserélők méretével összefüggésben lévő gazdaságossági tényezők szabják meg. Megfelelően megválasztott másodlagos fluidummal nem kizárt, hogy 85 °C-os termálvíz is hasznosítható legyen áramtermelésre. Ugyanakkor megjegyzendő, hogy 100 °C-nál mindössze 2,9% az átalakítás hatásfoka, de 140 °C-nál is csak 5,6%, ami számottevő hőveszteséget jelez [1.] . Az általánosan tapasztalható alacsony hatásfok a többlépcsős, kombinált áram- és hőtermelés létjogosultságát támasztja alá.

A Rankine-ciklusban (ORC) a termálvíz által hőcserélőkön keresztül felfűtött másodlagos fluidum felmelegedve gőzzé alakul. Az így keletkezett gőz közönséges

axiális áramlású turbinát hajt meg. A használat után a fluidumot visszavezetik a ciklus elejére. A víz hőmérsékletéhez jól megválasztott ORC fluidummal az előzőekben említett gyenge hatásfok növelhető. A jelenlegi segédközeges rendszereknél 40-70%-kal jobb hatásfokot nyújthat a Kalina-ciklus. Itt a másodlagos közeg kétkomponensű víz és ammónia keveréke. A hatásfok növekedésének az oka, hogy az elgőzölgés nem állandó hőmérsékleten megy végbe a koncentrációváltozás miatt, hanem növekvő gőztartalomhoz egyre magasabb elgőzölgési hőmérséklet tartozik, amellyel csökken a munkaközeg és a melegítő közeg közti hőmérsékletkülönbség, s ennek következtében a hőveszteség. Ezt a folyadékot túlhevített állapotban egy nagynyomású turbinába juttatják, ahol kitágul. Majd újra felfűtik, mielőtt rávezetik a kisnyomású turbinára. A második expanzió után a telített gőzt egy felületi hőcserélőn, rekuperátoron vezetik át, lehűtik és kondenzálják. Ezzel a megoldással hatékonyabbá tehető az erőmű.

A jövőbeli geotermikus energiahasznosítás ígéretes módja a hőforrásként mesterséges földhőrendszereket használó energiatermelés.

Az EGS-rendszer (Enhanced Geothermal System), más néven HDR (Hot Dry Rock) (1-7. ábra) lényege, hogy nagyobb, néhány kilométeres mélységben, ahol a közhőmérséklet eléri a 200°C -ot, egy repedésrendszert alakítanak ki hőcserélőnek a meglévő repedésrendszer bővítésével. Ebbe a repedésrendszerbe a felszínről vizet juttatnak, hogy felvegye a földhőt. Betápláló és kiemelő kutak, valamint felszíni hasznosító egységek egészítik ki a cirkulációs rendszert. A rendszer energiáját hőcserélőkkel nyerik ki, áramfejlesztésre és/vagy távfűtésre használják. A felszíni hőhasznosító üzemegységet is beleértve a rendszer zárt körként működik.[9.] A mesterségesen kifejlesztett földhőrendszerek szintén segédközeges technológiát, Rankine- vagy Kalina-ciklusú megoldást használnak a tározóból kitermelt víz energiájának hasznosítására. Kisméretű mobil üzemek „fáradt” vizek felhasználásával is kiépíthetők. Ezekkel a hagyományos energiaforrásokkal nem rendelkező, elszigetelt közösségek áramellátását is meg lehet oldani. Ezeken a területeken a nagyfeszültségű távvezeték kiépítésének költsége sokszorosa egy segédközeges geotermikus üzem létesítésének. Az áramszolgáltatás mellett keletkező hő közvetlen hasznosítása emellett további gazdasági előnnyel jár.

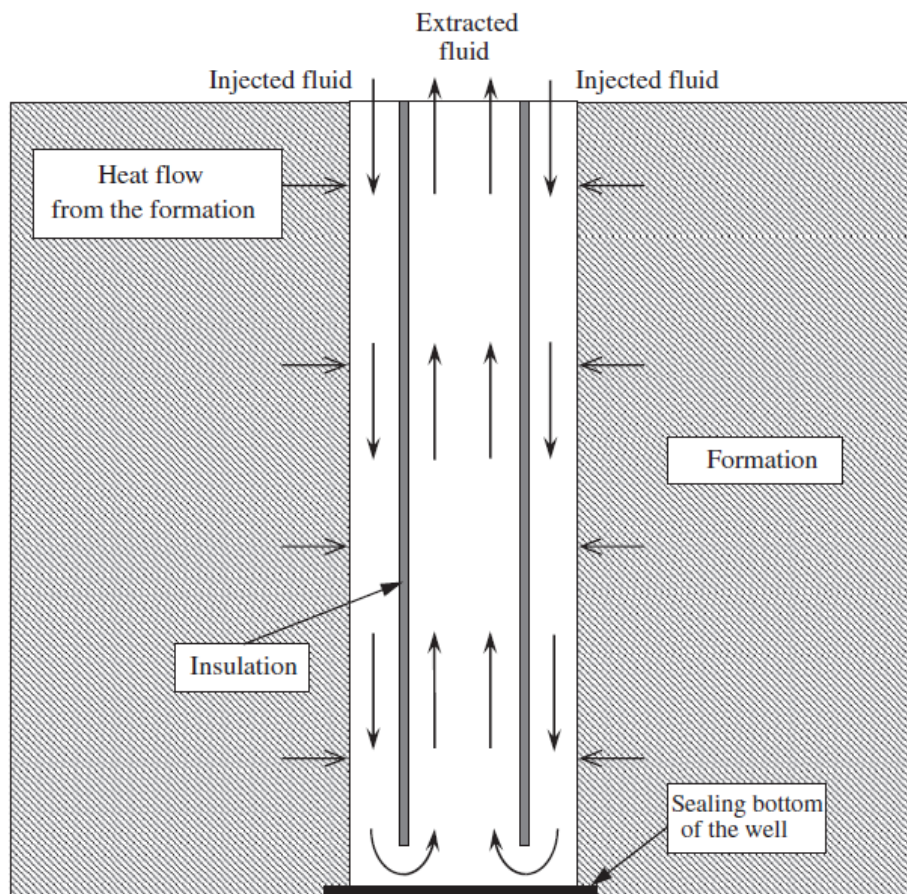


1-7. ábra. EGS rendszer [1.]

2. FELADAT

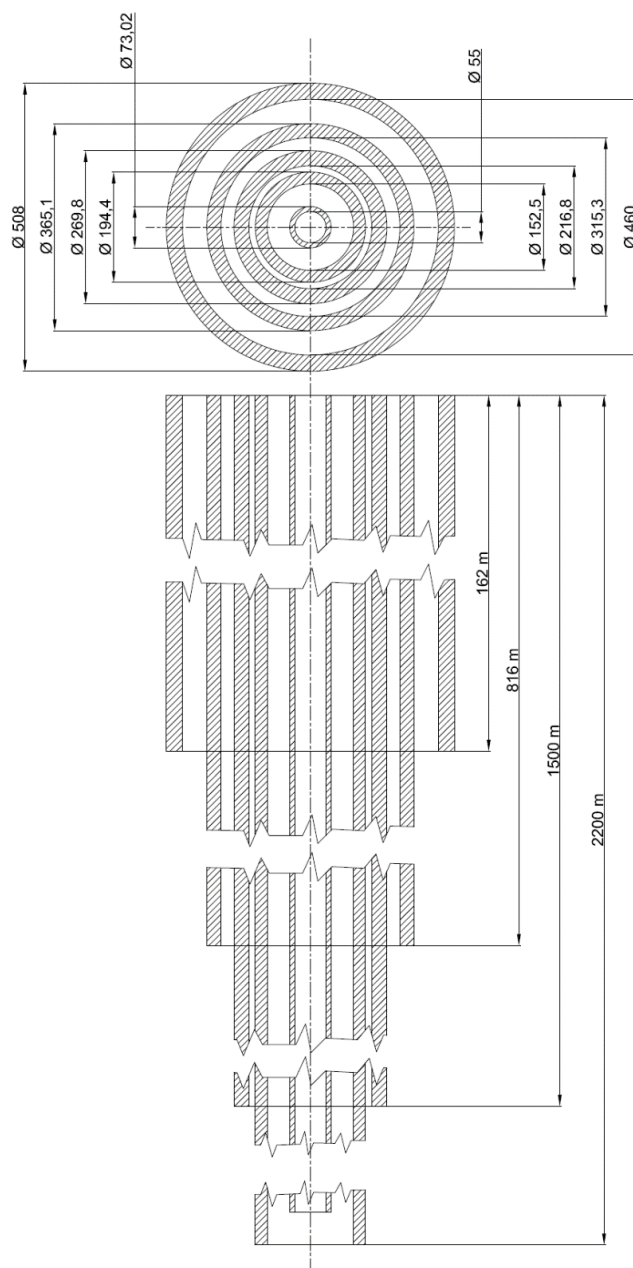
A feladatunk a tanulmányi verseny során az volt, hogy kimerült szénhidrogén kútra illesszünk villamosenergiát termelő körfolyamatot. A kúton kisebb átalakításokat végeznének. A béléscső alja perforálás nélkül lezárásra kerül, illetve koaxiális elrendezésben egy termelőcsövet helyeznek el benne. A kút így egy duplacsöves hőcserélőként funkcionál. A kútban szén-dioxid hőhordozó közeget áramoltatnak. A szén-dioxid folyékony állapotban kerül besajtolásra a külső gyűrűbe. Lefelé haladva melegszik, majd a talpponton visszafordul a belső csőbe, amelyben halmazállapotot váltva, szuperkritikus állapotban a felszínre jön. A folyamat sémája a 2-1. ábrán látható. A cég rendelkezik egy olyan modellel, amely számítani tudja a különböző lesajtolási nyomáshoz és tömegáramhoz tartozó kútfejnél kialakult kilépő termodinamikai jellemzőket. A pályázati információs csomagban rendelkezésünk bocsátották a kút paramétereit, valamint a kőzetek tulajdonságait, amelyben a kút található.

Az illeszthető körfolyamat típusával kapcsolatban teljesen szabad kezet kaptunk, illetve igény esetén más hőhordozó közegre is módosítani tudják a kútmodelljüket. Célunk elsősorban az volt, hogy a körfolyamat hatásfoka elérje a 6%-ot.



2-1. ábra. A kút kialakítása [8.]

A pályázati információs csomagban található kút méretek alapján elkészítettük a kút szerkezeti rajzát, amely a 2-2. ábrán látható. A 2-1. táblázat tartalmazza a kút adatait.



2-2. ábra. A kút pontos méretei

2-1. táblázat. Kút adatok

Típus	Külső átmérő [mm]	Belső átmérő [mm]	Falvastagság [mm]	Súly [ppf]	Csővezési mélység [m]	Csőtípus	TOC
2 7/8	73.02	55	18.025		0-3700	termelőcső	
7	194.4	152.5016	41.9604	35	0-3700	béléscső	1200m
9 5/8	269.8	216.789	53.086	53.5	0-2310	béléscső	felszín.
13 3/8	365.1	315.341	49.784	68	0-816	béléscső	felszín.
18 5/8	508	450.977	57.023	87.5	0-162	béléscső	felszín.

3. A VIZSGÁLT MEGOLDÁSOK BEMUTATÁSA

3.1. *Peremfeltételek*

- A gáz sűrűlódásából keletkező hőt elhanyagoljuk, a folyamat irreverzibilis volta miatt
- A rendszerben zajló folyamatokat stacionáriusnak tekintjük
- A munkaközeg CO_2
- A legmagasabb munkaközeg tömegáram 20 kg/s
- Hangsebesség elérése a hőveszteség minimalizálása miatt (Mining Support Kft. számításai alapján)
- A kút talpponti nyomása 200 bar
- A kútfej kilépési hőmérséklete $75 \text{ }^\circ\text{C}$
- A hűtés energiaszükségletét nem vettük figyelembe a hatásfok számítások során, hanem külön fejezet foglalkozik annak hatásával
- A hőbeviteli szakasz ábrázolásánál a T-s diagramon egyszerűsítéssel éltünk, csak a kezdő és a végpont összekötésével ábrázoltunk, nem vettük figyelembe a kútban lezajló nyomásváltozást. A számítások végkimenetelére ez nem volt hatással. Lásd: 11. Mellékletek.

3.2. *Számítási módszer*

A számításokhoz a FluidProp nevű solvert használtuk, amely képes számos közeg termofizikai tulajdonságainak meghatározására termodinamikai függvények segítségével. A számításaink ellenőrzéséhez használt CycleTempo hőséma számító program szintén a FluidPropot használja. A FluidProp többféle egyenlet alapján képes számolni. Mi a StanMix-et használtuk, ami az iPRSV állapotegyenletet alkalmazza, mely a Peng-Robinson-Stryjek-Vera egyenlet egy módosítása. Ez az egyenlet az egyik legpontosabb, a nem ideális gázok és fluidumok viselkedésének leírása terén. [6.] [7.]

$$p \quad (2.1)$$

$$= \frac{R \cdot T}{v - b}$$

$$- \frac{a}{v^2 + 2bv - b^2}$$

$$a = \left(\frac{0,457235 \cdot R^2 \cdot T_c^2}{p_c} \right) \cdot \alpha \quad (2.2)$$

$$b \quad (2.3)$$

$$= \frac{0,077796 \cdot R^2 \cdot T_c^2}{p_c}$$

$$\alpha = [1 + \kappa \cdot (1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (2.4)$$

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot \left\{ \sqrt{[A - D \cdot (T_r + B)]^2 + E} + A - D \cdot (T_r + B) \right\} \cdot \sqrt{T_r + C} \quad (2.5)$$

Ahol: A=1,1

B=0,25

C=0,2

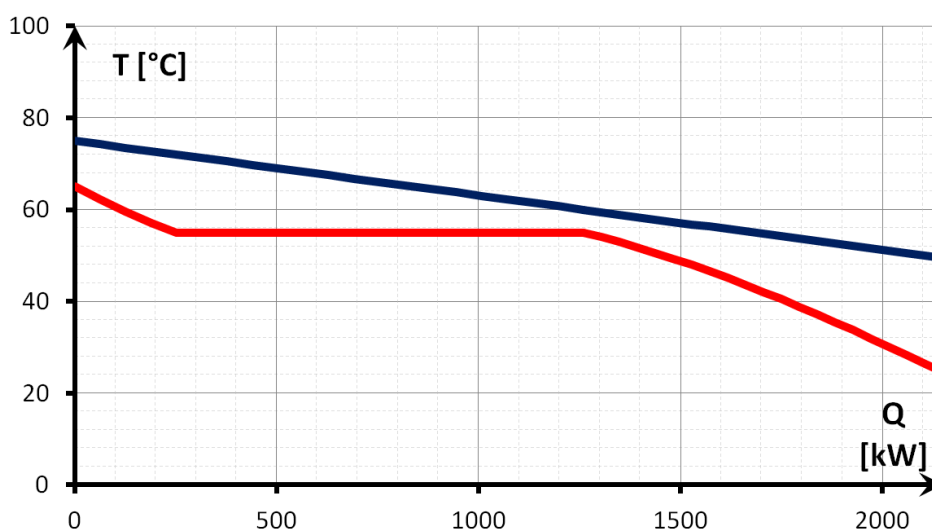
D=1,2

E=0,01

$\kappa_1=0$, ha $T_r > 0,7$, ahol $T_r = \frac{T}{T_c}$

$$\kappa_0 = 0,378893 + 1,4897153 \cdot \omega - 0,17131848 \cdot \omega^2 + 0,0196554 \cdot \omega^3 \quad (2.6)$$

A feladat során fontos feltétel volt, hogy a CO_2 -t folyadék állapotba vezessük vissza a kútba, ehhez a kritikus ponti hőmérséklete, $31\text{ }^\circ\text{C}$ alá kell hűteni. A hőcserélő egyik oldalán a CO_2 hűlése, másik oldalon pedig a munkaközeg előmelegítése és elgőzölgése történik. A legkisebb hőfokrás a két közeg között az elgőzölgés kezdőpontján lesz, így a CO_2 legnagyobb mértékű visszahűtéséhez az előmelegítés hőigényének részarányát kell növelni az elgőzöltetéshez képest. Minél nagyobb az ORC-ben választott munkaközeg kritikus ponti hőmérséklete, annál nagyobb lesz az elgőzölgés hőigényének részaránya azonos elgőzölgési hőmérséklete mellett, így célszerű minél alacsonyabb kritikus hőmérsékletű munkaközeget választani. A 3-1. diagramon látható a hőcserélő T-Q diagramja, melyen a kék görbe a CO_2 hűlését, míg a piros az ORC munkaközeg melegedését és elgőzölgését mutatja. A számítást két munkaközeg esetére végeztük el, az egyik az R125 (pentafluoretán), $66,25\text{ }^\circ\text{C}$ kritikus hőmérséklettel, a másik pedig az R32 (difluormetán) $78,41\text{ }^\circ\text{C}$ kritikus hőmérséklettel.



3-1. diagram. A hőcserélő T-Q diagramja R125 közegre

Az alább bemutatott eredmények számítása során $75\text{ }^\circ\text{C}$ -os CO_2 hőmérséklettel számoltunk a kútból történő kilépéskor, a tömegáramát figyelmen kívül hagyva, hiszen a fajlagos mennyiségekkel történő számítás elegendő volt a kívánt eredmények meghatározásához. Az elgőzöltetőben a hőmérséklet-lefutásokat a legkisebb megengedhető hőfokrás módszerének segítségével számoltuk, melynek értékére $5\text{ }^\circ\text{C}$ -ot választottunk. A munkaközeg túlhevítését is feltételeztünk, $70\text{ }^\circ\text{C}$ -os értékig a kiválasztott $5\text{ }^\circ\text{C}$ -os minimális hőfokrásnak megfelelően, mivel a túlhevítés jelentősen javította a körfolyamat hatásfokát. A belső hőcserélőben és a kondenzátorban szintén $5\text{ }^\circ\text{C}$ -os

minimális hőfokréssel számoltunk, valamint a kondenzátorhőmérsékletet 20 °C-nak választottuk. A turbina és szivattyú hatásfokát 75 %-nak tekintettük, a generátorét pedig 95 %-nak. Ezek az értékek viszonylag alacsonyak, a gyakorlatban ennél jobb hatásfokú gépek is elérhetőek, azonban a körfolyamat során az egyes berendezésekben jelentkező nyomásesést, a hőveszteségeket, valamint a hűtés energiaigényét (szivattyú illetve ventilátor) nem vettük figyelembe a modell során, így az alacsonyabb hatásfok használata realisabb eredményekhez vezet.

Több különböző elgőzölگési hőmérséklet esetére is megvizsgáltuk a lehetőségeket, az eredményeket az 3-1. táblázatban foglaltuk össze.

A táblázatban T_{elg} [°C] jelenti az elgőzölگési hőmérsékletet, η_{ORC} [%] a körfolyamat hatásfokát, $T_{CO2,ki}$ [°C] a CO₂ hőmérsékletét a hőcserélőből történő kilépéskor, $\eta_{hőhaszn}$ [%] pedig a hőhasznosítás arányát. A CO₂ közeget a folyadék állapot eléréséhez mindenképpen közel 30 °C-ra le kell hűteni, amely a fenti táblázat adatai szerint a hőcserélőben általában nem sikerül, így további hűtést igényel. A hőhasznosítás aránya kifejezi, hogy a CO₂ közeg 75 °C-ról 30 °C-ra hűlése során átadott energia hányad részét hasznosítottuk a hőcserélőben. $\eta_{össz}$ [%] a teljes rendszer hatásfoka, amely a körfolyamat hatásfokának és a hőhasznosítás arányának szorzataként számítható.

3-1. táblázat. Kétkörös rendszer hatásfoka különböző munkaközégek és elgőzölگési hőmérséklet esetén

	T_{elg} [°C]	η_{ORC} [%]	$T_{CO2, ki}$ [°C]	$\eta_{hőhaszn}$ [%]	$\eta_{össz}$ [%]
R125	60	6,33	54,69	45,18	2,86
	50	5,89	48,41	59,13	3,48
	40	4,62	43,80	69,37	3,20
R32	60	6,27	58,63	36,42	2,28
	50	5,67	48,94	57,95	3,29
	40	4,49	41,70	74,01	3,33

Mivel a kút hőteljesítménye állandó, ezért a villamos teljesítményt a hatásfok határozza meg, a két jellemző analóg módon használható. Tehát cél a minél magasabb hatásfok elérése, mivel ez magasabb villamos teljesítményt, több termelt villamos energiát, ezáltal több bevételt és profitot eredményez.

A táblázatból látható, hogy magas elgőzölgesi hőmérséklet esetén, amikor a körfolyamat hatásfoka kellően magas volt, a CO_2 -t csak kis mértékben tudtuk visszahűteni, ami az összhatásfokot jelentősen lecsökkenti. Alacsonyabb elgőzölgesi hőmérséklet esetén a javult a hőhasznosítás aránya, azonban a körfolyamat hatásfokának romlása újfent alacsony összhatásfokot eredményezett. A kétkörös rendszer alkalmazásával tehát a hatásfok minden esetben 4 % alatt maradt, amely nem felel meg a feladat elvárásainak.

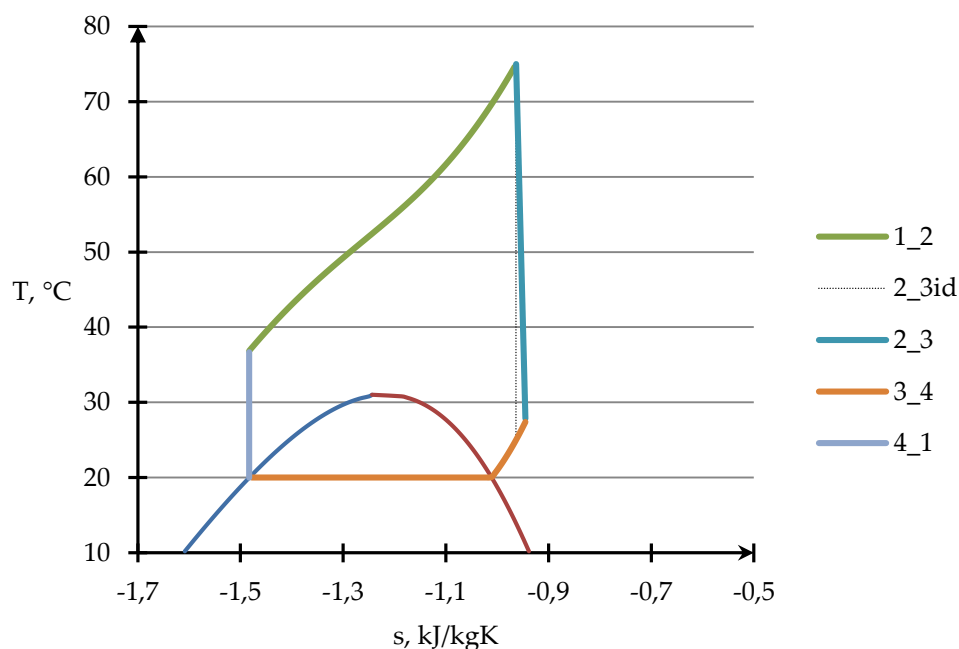
Vizsgáltuk a belső hőcserélő elhagyásának lehetőségét is, amelynek esetében a CO_2 -t alacsonyabb hőmérsékletre tudtuk visszahűteni, hiszen hidegebb munkaközeg lép be a hőcserélőbe. A körfolyamat hatásfoka ennek hatására azonban olyan mértékben csökkent, hogy az összhatásfok közel azonos maradt. A belső hőcserélő beépítése vagy elhagyása tehát nem változtat a teljes rendszer hatásfokán, így gazdasági szempontból nem javasolt a beépítés. A túlhevítés elhagyása esetén is hasonló tendenciát tapasztalunk: nő a CO_2 visszahűtése, így a hőhasznosítás aránya, azonban a körfolyamati hatásfok lecsökken, így ebben az esetben sem sikerült magasabb hatásfokot elérni.

Kétkörös rendszer kialakítása tehát a CO_2 kiírás szerint szükséges visszahűtése miatt nem valósítható meg az elvárt hatásfokkal. Más kút kialakítás esetén, amennyiben nincs szükség a CO_2 ilyen mértékű lehűtésére, célszerű lehet a kétkörös rendszer alkalmazása, azonban jelen pályázat keretei közt ezt a lehetőséget a részletes vizsgálatok elvégzése és a különféle lehetőségek áttekintése után elvetettük, helyett egy egykörös rendszer kialakítását, tehát a felszínre jutó CO_2 közvetlen turbinára vezetését javasoljuk.

3.4. Egykörös ORC körfolyamat

Megvizsgáltuk a szén-dioxid direkt hasznosítását is. Ebben az esetben a kútból érkező szén-dioxidot közvetítő közeg beiktatása nélkül a turbinába vezetjük. A munkavégzés után a turbinából a nyomásszinttől függően a regenerátorba vagy egyből a kondenzátorba. Előbbi célja, hogy a kondenzátorba jutó munkaközeg ne túlhevített, hanem telített állapotban kerüljön a kondenzátorba. Így megakadályozható, hogy a túlhevített gáz lefújja a kondenzátum-filmet a kondenzátorfelületről, ami a hőátadás romlását okozná. Az innen elvont hőt a kondenzátor után a közeg előmelegítésére használhatjuk, ami a hatásfok javulását eredményezi.

hőmérsékletkülönbséggel. A minimális hőfokrást $\Delta T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nak és a megengedett felmelegedést $\Delta T=6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nak vettük fel. Ez azt jelenti, hogy hagyományos üzemeltetés $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál melegebb hűtőközeggel nem valósítható meg.



3-2. diagram. A regenerátor nélküli eset T-s diagramja (115 bar, 75°C)

A 3-2. diagram a regenerátor nélküli körfolyamat T-s diagramját ábrázolja $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os kondenzátor hőmérséklet, 115 bar kútfej nyomás és 75°C kútfej hőmérséklet esetén. A számított eredményeket 3-2. táblázat tartalmazza.

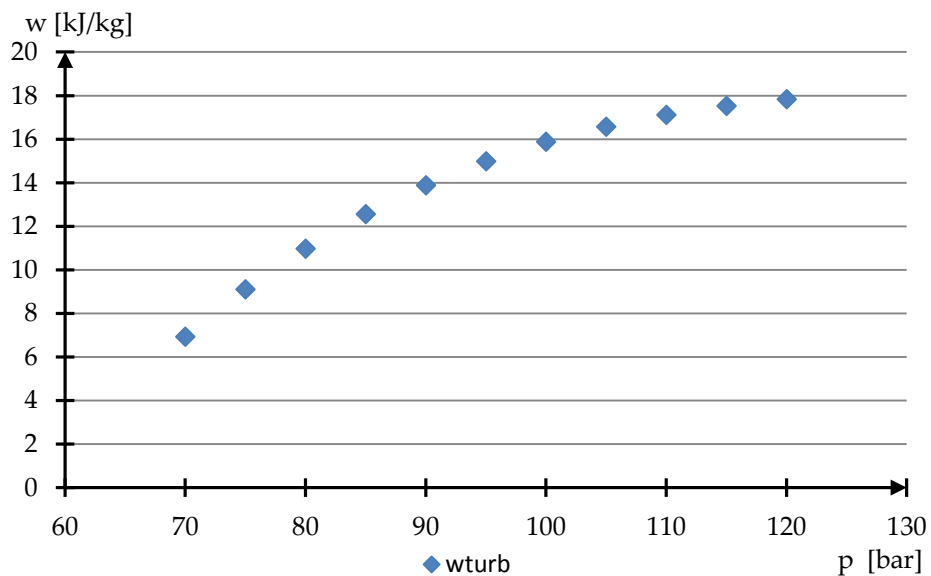
3-2. táblázat. A kézi számítás eredményei CO_2 közegre regenerátor nélkül

		1 _{id}	1	2	3 _{id}	3	4
p	bar	135,00	135,00	115,00	57,86	57,86	57,86
T	$^{\circ}\text{C}$	38,71	39,28	75,00	20,15	22,03	20,00
h	kJ/kg	-220,29	-218,4	-68,73	-92,08	-86,24501	-231,00
s	kJ/kgK	-1,48	-1,4768	-1,0090	-1,0090	-0,989151	-1,48

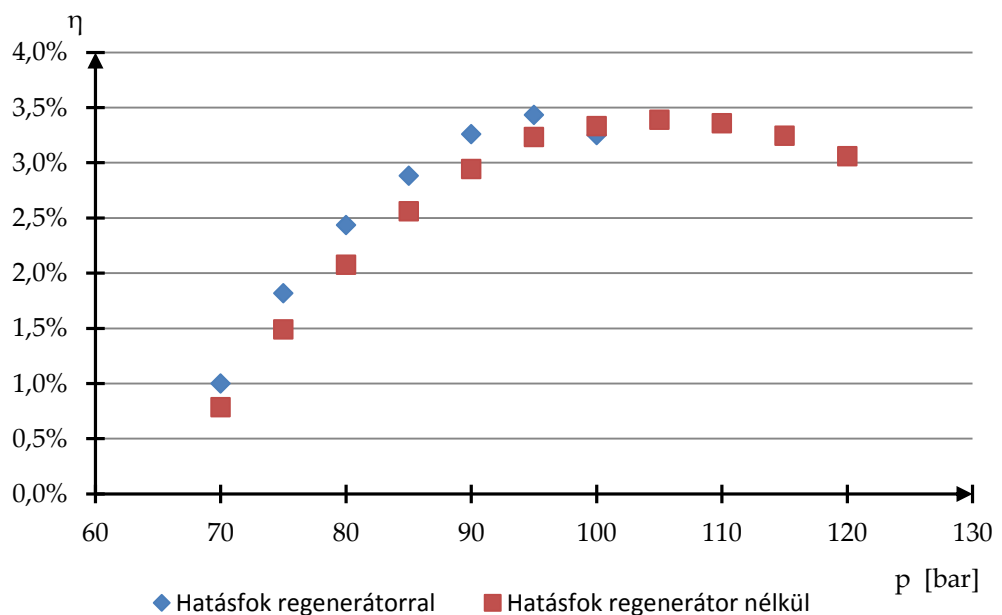
A kondenzáció után a cseppfolyósított szén-dioxidot szivattyú nyomja vissza a kútba. Ez látható az 3-2. ábrán és a 3-3. ábrán. A számítás során a szivattyú hatásfokára 85%-ot

vettünk figyelembe, ami megfelel egy átlagos szivattyú hatásfokának. A szivattyú által legyőzendő, a kútban eső nyomásvesztéséget 20 bar-nak vettük fel.

A rendszer hatásfoka a kútfej nyomás és hőmérséklet növelésével egyre nő. Utóbbi csak nagyon szűk határok között változik a tömegáram változtatásának hatására [3.] ezért ezt elhanyagoltuk és állandó 75°C-kal számoltunk. A kútfejnyomás változásának hatásait az 3-3. diagram és az 3-4. diagram ábrázolja.



3-3. diagram. A nyomásváltozás hatása a turbinából kinyert fajlagos munkára



3-4. diagram. A nyomásváltozás hatása a hatásfokra

3-3. diagramon látszik, hogy a nyomásnövelés hatására a kinyert munka növekménye egyre kisebb lesz. Az 3-4. diagramon az látszik, hogy a hatásfoknak maximuma van a nyomás függvényében, ami más és más regenerátoros (75 bar), és regenerátor nélküli (105 bar) esetben. A kinyert teljesítmény a keringtetett tömegáram növelésével nő egy bizonyos határig. A tömegáram növelésével a CO₂ felmelegedése elhanyagolható mértékben változik. A maximális tömegáram 20 kg/s körüli értéknél van.

A turbina esetén 75%-os hatásfokot vettünk figyelembe a számítás során. Ez egy elég alacsony hatásfoknak számít. Gőz munkaközeg esetén lehet ennél sokkal jobbat is találni, de CO₂ munkaközegű turbinára kereskedelmi forgalomban még nem igazán lehet példát találni. Ilyen kis teljesítmény szinteken csak kísérleti berendezések léteznek.

A 3-4. diagramon látható, hogy a regenerátor használatával nő a hatásfok. Ennek is van egy korlátja, ami 95 bar körül mozog. E fölött már nem használható a regenerátor a hőmérsékletek keresztezése miatt. A turbinából kilépő hőmérséklet még alacsonyabb, mint a szivattyú utáni, a hőátvitel iránya megfordul. A regenerátor Bošnjaković tényezőjére $\Phi=0,9$ -et vettünk figyelembe a számítás során.

3.4.1. KORLÁTOK

Fontos megemlíteni, hogy a fenti számítások során 20 °C-os kondenzátor hőmérséklettel számoltunk, ami azonban a valóságban az év jelentős részében nem valósítható meg. A nyári időszakban gyakran előfordul, hogy a természetes vizek és főként a levegő hőmérséklete 20 °C fölé emelkedik, ilyenkor még vízhűtés esetén sem érhető el ennél alacsonyabb kondenzációs hőmérséklet. A feladat szerint fontos szempont a rendszer mobilitása is, valamint a kutak többsége vízhiányos területre esik, így léghűtéses kondenzátor kialakítása a legcélszerűbb. A kondenzátor felületének méretétől és a felhasznált levegő mennyiségétől is függ, hogy adott külső levegő hőmérséklet mellett milyen kondenzációs hőmérséklet érhető el, de 20 °C feletti levegővel már problémás a kondenzációs hőmérséklet 30 °C alatt tartása, 25 °C felett pedig csak igen jelentős túlméretezés mellett lehetséges.

Az Alföldre jellemző meteorológiai adatok szerint éves szinten közel 600 órában mértek 25 °C feletti, és még 1700 órában 20 °C feletti hőmérsékletet. Ilyen hőmérsékletek mellett a kondenzáció hőmérséklete nem tartható a CO₂ kritikus hőmérséklete, 31 °C alatt, így nem tudjuk folyadékká alakítani a CO₂-t, így ilyen esetekben, a feladat feltételei szerint nem működtethető a rendszer. Éves szinten 1700 órányi leállás, mely a teljes év

csaknem 20 %-át teszi ki, jelentősen lerontja a rendszer kihasználtságát és a megtermelt energia mennyiségét, ezáltal jelentősen elnyújtva a megtérülési időt. A leállás elkerülése tehát mindenképpen fontos: ennek egyik módja lehet vízűtés alkalmazása, illetve más innovatív hűtési módszerek is felmerültek.

A talaj hőmérséklete nyáron is kellően alacsony ahhoz, hogy elérhető legyen a CO₂ kondenzációja, így a talaj felszínközeli, hidegebb rétegeiben elhelyezett csövekben egész évben kondenzáltatható lenne a közeg. Ennek hátránya az igen jelentős beruházási költség, ami az egész kiserőmű megtérülését kétségessé teszi. Felmerült annak a lehetősége is, hogy a már meglévő csőbe gázként engednénk vissza a közeget, amely annak felső szakaszában, ahol még alacsony a talaj hőmérséklete, kondenzálódna, majd tovább lefelé haladva folyadékként melegedne fel a kútban. Ennek vizsgálata a kútmodell átalakítása segítségével lenne elvégezhető, amelyre a pályázat során nincs lehetőségünk, így ezt az esetet csak ötletként vetjük fel, melynek részletes vizsgálatát adott esetben, a későbbiekben célszerű lehet elvégezni.

A következő fejezetben részletesen vizsgáltuk a külső hőmérséklet hatását a rendszer üzemére és hatásfokára. A külső hőmérséklet változása jelentősen befolyásolja a kondenzátorban elérhető nyomást, ezen keresztül pedig a teljes rendszer hatásfokát.

Mint azt a peremfeltételek között megemlítettük (3.1 alfejezet) a maximális megengedett tömegáram 20 kg/s.

3-3. táblázat. Teljesítmények a tömegáram függvényében, regenerátor nélkül, 105 bar, 75°C a kútfejnél

Tömegáram (kg/s)	Villamos teljesítmény (kW)	Elvonandó hőteljesítmény (kW)	Bevezetett hőteljesítmény (kW)
2	11,2	315,9	330,4
5	28,0	789,8	826,0
10	56,0	1579,6	1652,0
15	84,0	2369,3	2478,0
20	112,0	3159,1	3304,0

3-4. táblázat. Teljesítmények a tömegáram függvényében, regenerátorral, 75 bar, 75 °C a kútfejnél

Tömegáram (kg/s)	Villamos teljesítmény (kW)	Elvonandó hőteljesítmény (kW)	Bevezetett hőteljesítmény (kW)
2	6,1	327,8	333,8
5	15,2	819,4	834,6
10	30,3	1638,8	1669,1
15	45,5	2458,2	2503,7
20	60,6	3277,6	3338,2

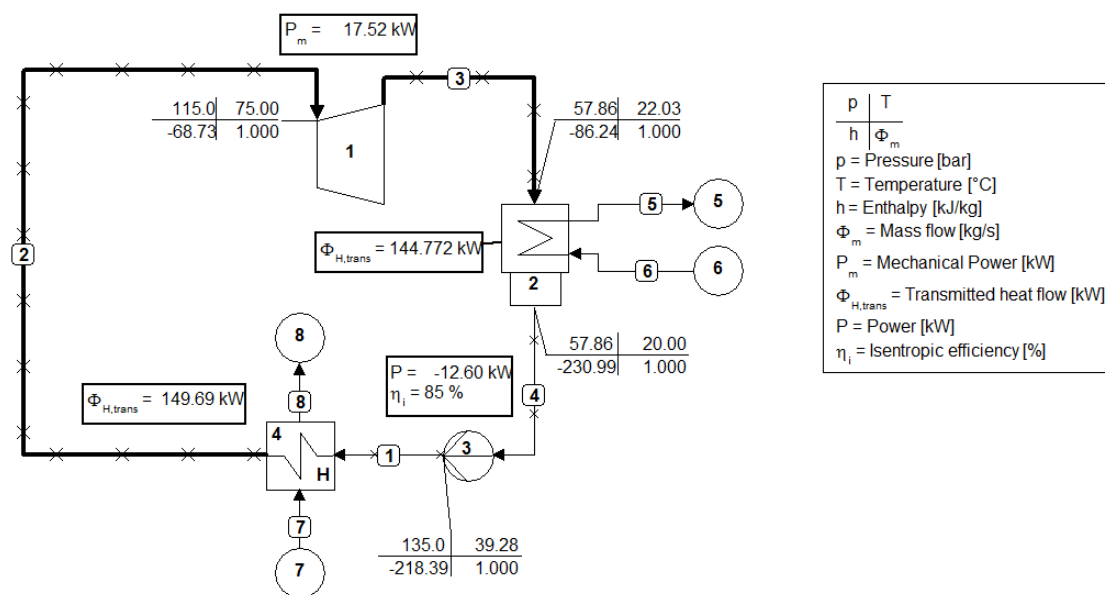
Az 3-3. táblázat a legjobb hatásfokú regenerátor nélküli eset főbb teljesítmény adatait mutatja. Ebben az esetben a hatásfok 3,39%, ami nem felel meg a kiírásban felvetett minimum 6%-os hatásfoknak.

Az 3-4. táblázat a legjobb hatásfokú regenerátoros eset főbb teljesítményadatait mutatja. Ebben az esetben 3,43% a hatásfok, ami szintén nem felel meg a támasztott követelményeknek.

Ha a nagyobb villamos teljesítmény elérése a cél, akkor az előbbi, ha a jobb hatásfok, akkor az utóbbi megoldás javasolt.

3.4.2. MODELL VALIDÁLÁS

Eredményeink validálása végett elkészítettük a rendszer modelljét a CycleTemo hőséma számító programban. A 3-4. ábra a kapcsolási rajz mellett tartalmazza a számított eredményeket is. Az eredmények 1 kg/s tömegáram értékre vonatkoznak. Látszik, hogy a program által számolt eredmények, és az általunk számított eredmények (3-2. táblázat) megegyeznek. A geotermikus kutat a 4-es számú általános hőcserélővel modelleztük, aminek a primer közege a széndioxid munkaközeg, a szekunder közege pedig víz. A modell szempontjából irreleváns a közeg típusa, mindössze a kilépő közeg hőmérsékletét írtuk elő.



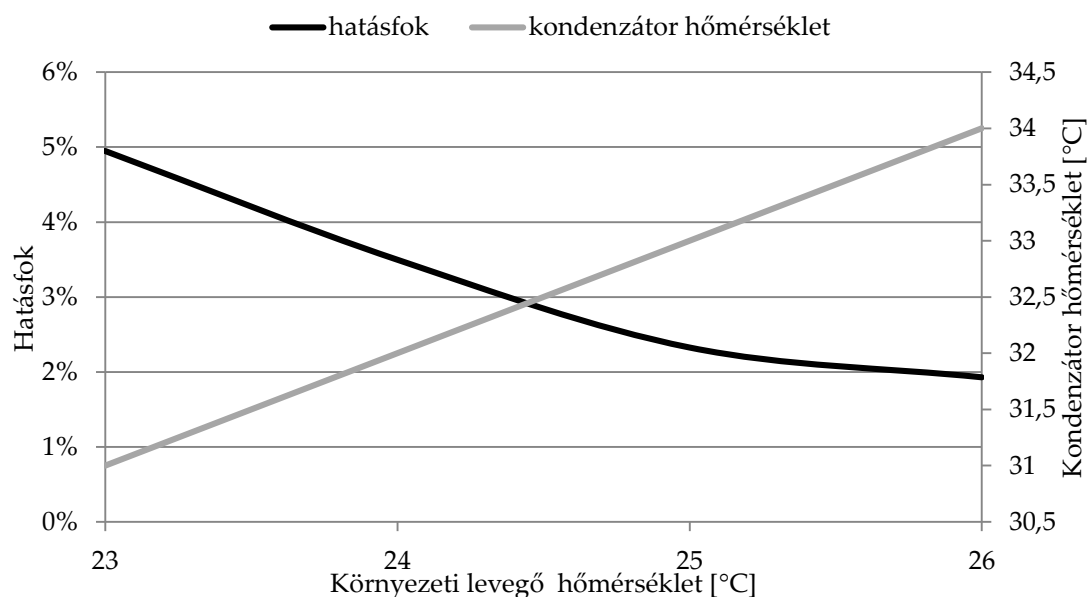
3-4. ábra. A modellezet rendszer sémája és a számított eredmények

3.5. Az erőmű éves üzemvitelének értékelése természetes cirkulációjú, léghűtéses rendszer esetén.

Jelen projekt egyik megvalósítási módja szerint a szerves Rankine körfolyamat szén-dioxid munkaközegének kondenzációja egy környezeti levegővel hűtött toronyban történik. A véges hőcserélő felület következtében ilyen megoldásoknál a javasolt hőfokkülönbség 6 °C , amely a minimális hőmérsékleti hajtóerőt biztosítja a hőcseréhez, azaz a szén-dioxid munkaközeg kondenzációjához. Esetünkben a munkaközeg kondenzációjához a szén-dioxid, adott kondenzációs nyomáshoz tartozó, kritikus hőmérsékletét kell elérni, amely 31 °C . Ennek eléréséhez legalább 23 °C hőmérsékletű környezeti levegő szükséges. Hazánkban az 1971-től 2000-ig tartó időszakra összesített, átlagos havi középhőmérsékleti adatok homogenizált és interpolált szélsőértékei, az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisa szerint, mindhárom nyári hónapban 20 °C fölé emelkednek. Ilyen körülmények között a munkaközeg nem kondenzálna le. Ez a közeg nem engedhető rá a tápszivattyúra, hiszen a gáz fázis annak tönkremenetelét okozná.

Viszonylag szűk, néhány fokok tartományban a 23 °C fölötti környezeti hőmérsékletű hűtőlevegővel is üzemképes maradhat az erőmű, de ekkor a hatásfok erősen az optimális

érték alatt marad. Számításokat végeztünk néhány 23 °C fölötti értékre, amelyek eredményeit az 3-5. diagramon láthatjuk.



3-5. diagram. A hatásfok és a kondenzátor hőmérséklet alakulása a kritikus pont feletti hőmérsékletek esetén

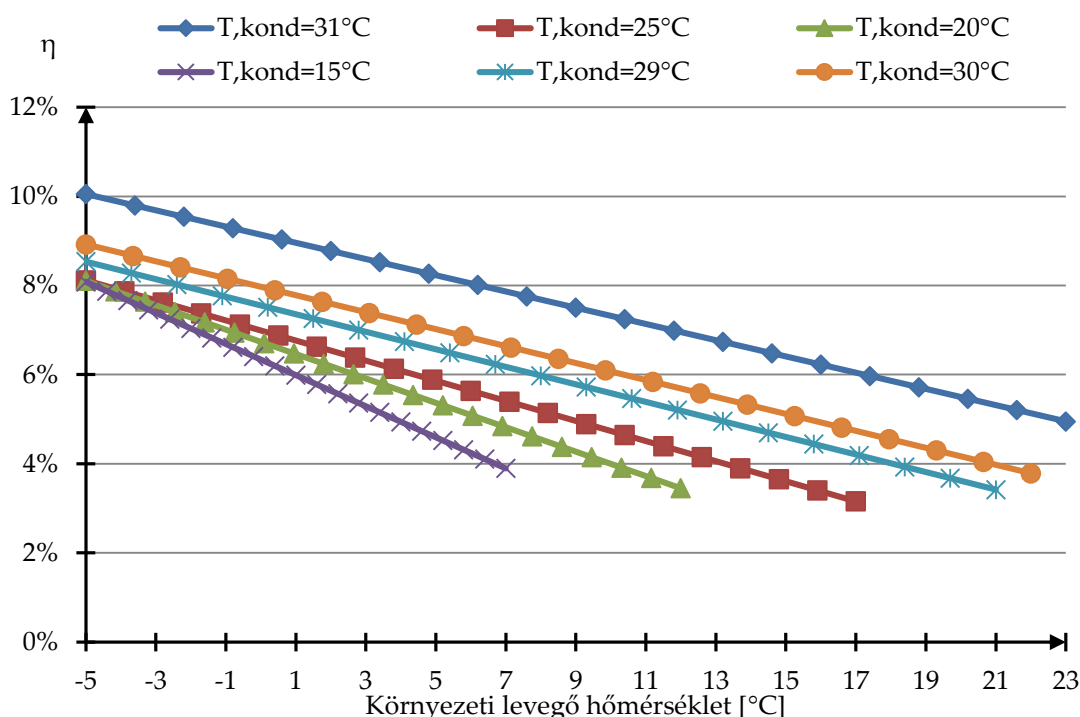
A fenti ábra alapján elmondható, hogy ugyan még az erőmű üzemképes ebben a tartományban is, azonban az üzemvitele nem gazdaságos. Mégis a folyamatos üzemre törekedve érdemes megfontolni ebben a rossz hatásfokú tartományban is a működést. Egy alföldi településen mért napi átlaghőmérsékletekből felállított éves tartamdiagram alapján megállapítható, hogy a fent leírt, környezeti hőmérséklet szempontjából kitolt üzemeltetés mennyivel hosszabbíthatja meg a működést. Ez alapján, éves szinten a 26 °C fölötti hőmérséklet 591 órában mérhető, így kijelenthető, hogy az erőműnek éves szinten legalább 25 napot állnia kell. Véleményünk szerint, ez az időszak jól kihasználható a karbantartási munkálatok elvégzésére. 23 °C fölötti hőmérséklet az év 1232 órájában mérhető. Ez hozzávetőlegesen 52 napot jelent. Ez alapján kijelenthető, hogy a kitolt üzem éves szinten 23 nappal hosszabbíthatja meg az üzemidőt.

Ennek kivitelezéséhez a kondenzátor után egy fojtószelep beépítése javallott. A szelepen szabályozott nyomáseséssel, a még gáz halmazállapotú szén-dioxid munkaközeg folyadék halmazállapotba vihető. A 3-5. táblázat a megemelt hőmérsékletekhez tartozó szükséges nyomáseséseket tartalmazza, amelyet a fojtás során szabályozni kell.

3-5. táblázat. Megemelt hőmérsékletekhez tartozó nyomások

Kondenzációs hőmérséklet [°C]	Környezeti hőmérséklet [°C]	Expanziós nyomásszint [bar]	Fojtás mértéke [bar]
32	24	75,8	-2,05
33	25	78,2	-4,45
34	26	82,8	-9,05

Kritikus hőmérséklet alatti kondenzátor hőmérsékletek esetén a hatásfokok a 3-6. diagram szerint alakulnak.



3-6. diagram. A hatásfok alakulása a környezeti hőmérséklet és a kondenzátor hőmérséklet függvényében

A 3-6. diagramon egy adott kondenzátor hőmérsékletéhez, a környezeti levegő csökkenésével egyre magasabb hatásfok tartozik. A kondenzátor hőmérsékletek csökkenésével az erőmű üzemelési tartománya egyre csökken, hiszen a kondenzációhoz szükséges minimális hőfok hajtóerők meghatározzák a legkisebb környezeti hőmérséklet értéket. Jelen számításban a hűtőközeg oldalról 6 °C minimális hőmérséklet hajtóerőt tételeztünk fel a kilépő és a belépő oldal között, a kilépő hűtőközeg és a kondenzátor hőmérséklet között pedig 2 °C hőmérséklet hajtóerőt. Megfigyelhető, hogy a kondenzációs hőmérséklet csökkentésével a hatásfokgörbék lefelé tolódnak. Ennek magyarázata a belépő és az elvont hőteljesítményekkel magyarázható. A kondenzációs

hőmérséklet csökkenés a hozzá tartozó expanziós nyomás csökkenését jelenti. Ez a turbinából kinyert teljesítményt növeli, azonban az alacsonyabb kondenzációs hőmérséklet a bevitt hőteljesítményt jelentősen növeli. Továbbá a kondenzációs hőmérséklet csökkenése a hűtéshez szükséges levegő tömegáramot is jelentősen növeli. Végeredményben a turbinán kinyert többlet teljesítmény elvész a hűtőventillátor növekvő teljesítményfelvételével, valamint a bevitt hőteljesítmény növekedésével olyannyira, hogy a hatásfok a minimális hőfokhajtóerőkkel számítva csökkennek. A minimális hőfokhajtóerők növelésével, azaz hidegebb időben, a hatásfok minden esetben növekszik. Megállapítható, hogy a maximális hatásfok eléréséhez a kondenzátor hőmérsékletét ki kell tolni a kritikus 31 °C értékig. Ezzel a hatásfokgörbével az éves tartamdiagram alapján meghatározott éves átlagos hatásfok értéke 7,7% értékre adódott.

Jelen számítás léghűtéses rendszerre vonatkozik. A hatásfoknövelés témaköre további érdekes megvalósítási lehetőségeket hordoz magában, ám ezek jelen TDK keretein túlmutatnak. Az egyik ilyen lehetőség megvalósításának a túl alacsony talpponti hőmérséklet az akadálya. Magasabb közeghőmérséklet esetén is fennállna a kondenzációs hőmérséklet problémája, azonban már akár 80 °C turbina utáni hőfokszint elegendő lenne egy abszorpciós rásegítő hűtés beépítésére, amely a munkaközeg kondenzációját magasabb környezeti hőmérsékletek esetén is megvalósíthatóvá tenné és közbülső hőcserélő lévén, egyben a kinyert teljesítményt is kis mértékben megnövelné.

4. GAZDASÁGI SZÁMÍTÁSOK

A gazdasági értékeléshez a nettó jelenérték (NPV - Net Present Value), illetve belső megtérülési ráta (IRR - Internal Rate of Return) mutatókat vizsgáltuk meg.

A 4.1 alfejezetben összegyűjtöttük a geotermikus erőmű létesítése során fellépő költségeket. Mivel konkrét berendezések nem kerültek kiválasztásra, az árak közelítő jellegűek, így az eredmények is csak nagyságrendileg alkalmasak a beruházás gazdasági értékelésre. A beruházás legnagyobb költsége az ORC berendezéshez tartozik, azonban ennek a becslése nehézkes, mivel esetünkben a munkaközeg CO₂, míg a kereskedelmi forgalomban kapató rendszerek általában R245fa közeget használnak, amely magasabb hőmérséklet és alacsonyabb nyomásértékeket jelent. Az árat egy teljes ORC alapján becsültünk, nekünk azonban nincs szükségünk az elgőzölögtető hőcserélőre, illetve bizonyos esetben a regenerátorra és szivattyúra sem, így nem tudhatjuk pontosan, hogy a rendszer fennmaradó része mennyibe kerülne. A fentiek miatt a lent bemutatottnál jóval alacsonyabb is lehet a beruházási költség, amely gyorsabb megtérülést jelent.

4.1. Beruházási költség

4-1. táblázat. Beruházási költségek

Berendezés	Ár
DN50 bélésű: 2200 méteres acél (P235GH) bélésű	4 433 000 Ft (6,5 Euro/m)
ORC energiatermelő egység hőcserélő nélkül	700 MFt
Felszíni technológia költsége, távfelügyelet, villamos csatlakozás	200 MFt [2.]
Tervezés, engedélyeztetés, egyéb mérnöki szolgáltatás	13,5 MFt
Σ 918 MFt	

4.2. Bevétel

Mivel nyáron a hűtés száraz területen 26 °C-nál magasabb külső hőmérséklet miatt a munkaközeg kondenzáltatása nem kivitelezhető, így az ennél magasabb átlaghőmérsékletű napokon az erőmű nem működőképes. Ebből adódóan napi átlaghőmérséklet előfordulási adatsor alapján 591 órát nem tud üzemelni az erőmű. A

nagyobb teljesítményű (112 kW) erőmű így évente közelítőleg 66,192 MWh villamos energiát termel majd.

Az erőmű valószínűsíthetően önkormányzati szerepvállalással fog megépülni és az önkormányzatok tulajdonát fogja képezni. Az erőmű által termelt, értékesített villamos energiából származó bevétel a város lakosságának energiaköltségeit csökkentené. Az erőmű megtérülési idejére ezért nagy hatással van az általa kiváltott hálózatról vételezett villamosenergia piaci ára.

4.3. NPV

A nettó jelenérték egy különbség jellegű mutató, ami a beruházás élettartama során elérhető összes, az élettartam első évére diszkontált hozam és az egyszeri ráfordítás különbségeként határozható meg. A nettó jelenérték nem egy valóságos összeg, hanem a beruházás élettartama során a különböző jövőbeli időpontokban keletkező hozamoknak (bevételekből és a beruházási, valamint a működési költségekből számított különbségnek) a jelenre, illetve a döntés pillanatára vonatkoztatott értékét tükrözi. [4.]

A beruházás abban az esetben tekinthető gazdaságosnak, ha az élettartama alatt a nettó jelenértéke, lehetőleg minél nagyobb pozitív érték. Az adott időpontbeli pénzmozgások számításánál figyelembe vettük a villamosenergia árának változását.

A beruházás nettó jelenértékének számításához a (4.1) képletet használtuk:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4.1)$$

Ahol:

r: a kalkulatív kamatláb

n: a vizsgált időtáv hossza

t: az adott pénzmozgás időpontja

C₀: a 0. időpontban befektetett összeg

C_t: nettó pénzmozgás a t. időpontban

A számításhoz a 4-2. táblázatban szereplő adatokat használtuk

4-2. táblázat. Felhasznált adatok

Megnevezés	Érték
Jegybanki alapkamat	2,7%
Villamosenergia piaci ára	40 Ft/kWh
Elvárt hozam	5%
Beruházási költség	918 MFt
Megtermelt villamos energia	914,928 MWh
Vizsgált időtartam (élettartam)	30 év

A beruházás nettó jelenértékének meghatározásakor három villamosenergia áralakulási forgatókönyvet is megvizsgáltunk.

A beruházás 30. vizsgált évére (élettartam vége) kapott eredményeket a 4-3. táblázatban foglaltuk össze:

4-3. táblázat. NPV

Árváltozás évente	NPV
5%	127 632 000 Ft
10%	1 305 200 512 Ft
15%	4 322 674 964 Ft

Reális feltételezés lehet a villamosenergia ár 10%-os növekedése. Az NPV értékekből látszik, hogy a beruházás gazdaságosnak tekinthető.

10%-os villamosenergia áremelkedés mellett a beruházási dinamikus megtérülési ideje 18 év.

4.4. IRR

A belső megtérülési ráta, mint gazdaságossági módszer igen közel áll a nettó jelenérték számításához. A beruházás révén lehetséges évi átlagos hozamnövekedésnek azt a mértékét, amely mellett a befektetés az adott időhorizont alatt a diszkontált hozamokból

éppen megtérül, a beruházás belső kamatlábának, vagy belső megtérülési rátának nevezzük. [4.]

A mutató meghatározásához az (5.2) egyenlet megoldása szükséges:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0$$

(5.2)

A belső megtérülési ráta alkalmazása esetén a gazdasági kritérium az, hogy a kalkulatív kamatlábhoz viszonyítva minél nagyobb legyen a beruházás belső kamatlába.

A beruházás 30. vizsgált évére (élettartam vége) kapott eredményeket a 4-4. táblázatban foglaltuk össze:

4-4. táblázat. IRR

Árváltozás évente	IRR
5%	0,86%
10%	5,34%
15%	9,80%

5. EGYÉB MUNKAKÖZEGEK ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

Mivel a számításaink alapján kiderült, hogy a szén-dioxid munkaközeggel nem valósítható meg gazdaságosan a körfolyamat, ezért egykörös rendszer esetén egyéb munkaközegeket is megvizsgáltunk. A kiválasztás alapjául szolgált, hogy a munkaközeg kritikus pontjának a geotermikus hőforrás kútfej közelében kialakult hőmérsékletnél alacsonyabbnak kell lennie. Ez alapján megvizsgáltuk az R125, R22, propán, R32, R134a (az utóbbi kettőt sajnálatos módon a kritikus pontjuk felett nem képes kezelni a FluidProp) közegek alkalmazásának a lehetőségét is. A választott munkaközegek kritikus jellemzőit az 5-1. táblázat tartalmazza.

5-1. táblázat. Munkaközegek kritikus jellemzői

Anyag	Kritikus	Kritikus
	hőmérséklet [°C]	nyomás [bar]
Szén-dioxid	31,04	73,8
R125	66,25	36,3
R32	78,41	58,3
R22	96,05	49,8
Propán	96,67	42,5
R134a	101,06	40,6

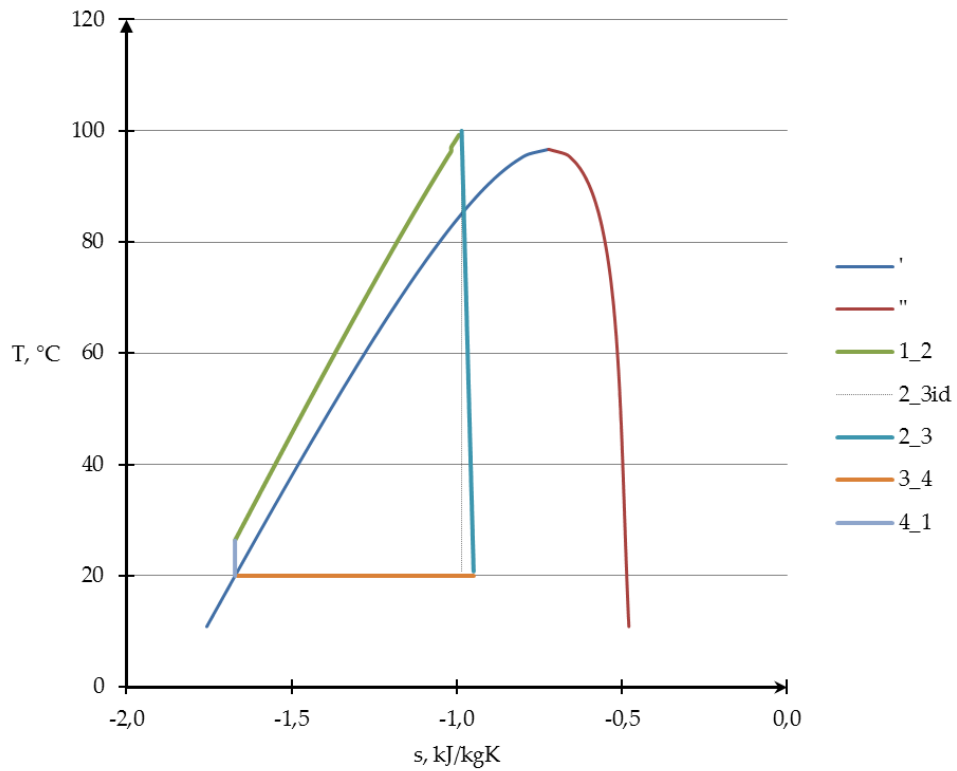
A kút használhatósága érdekében mindenképpen szuperkritikus állapotváltozásra van szükség, mivel a szubkritikus nyomáson történő fázisváltozás során, hirtelen sűrűségváltozás hatására a keletkező gőzbuborékok visszaáramlását nem lehetne meggátolni. A számításhoz szükséges közegjellemző adatokat a Mining Support Kft. jóvoltából az 5-2. táblázat tartalmazza.

5-2. táblázat. Mining Support Kft. számításai

Munkaközeg	m [kg/s]	besajtott fázis	H _{cr} [m]	T _{ki} [C]	Várható $\dot{Q}$ [MW _{th}]	Várható fázisállapot
R32	4	folyadék	1350	90	2,07	szárazgőz
	10		1400	87	5,14	szárazgőz
	15		1470	87	7,7	szárazgőz
R22	4	folyadék	2000	85	2,19	nedves gőz
	10		2130	80	5,49	nedves gőz
	15		2150	78	8,04	nedves gőz
Propán	4	folyadék	2180	86	3,04	nedves gőz
	10		1900	92	7,74	nedves gőz
	15		1750	100	11	nedvesgőz/szárazgőz
R125	4	folyadék	1000	90	2,15	szárazgőz
	10		1150	92	5,5	szárazgőz
	15		1200	92	7,9	szárazgőz
R134a	4	folyadék	1187	85	1,98	nedves gőz

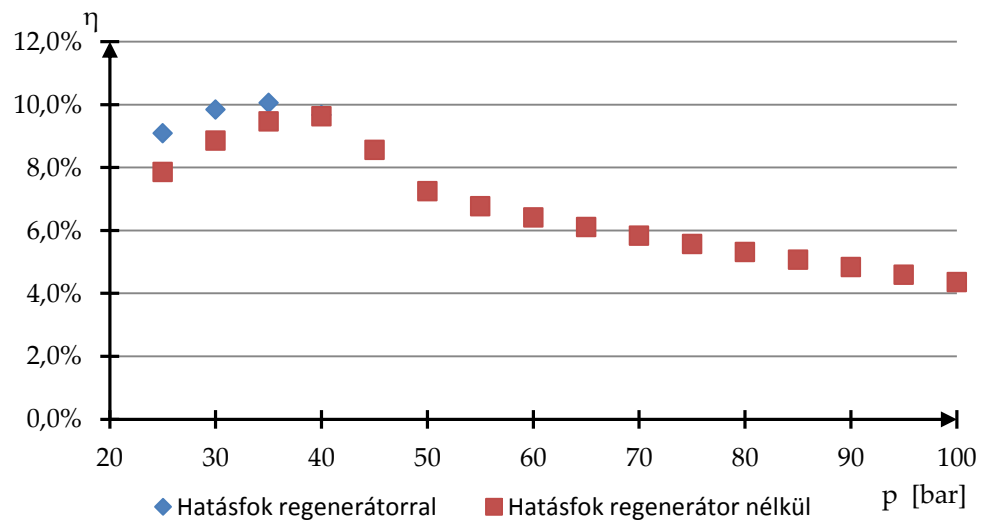
5.1. Propán

A Mining Support Kft. által készített kútmodell alapján szolgáltatott adatokkal elvégezve a számítást az 5-1. diagramon látható eredményeket kaptuk, amelyből látszik, hogy a körfolyamat az adott kútfejnyomáson nem valósítható meg.



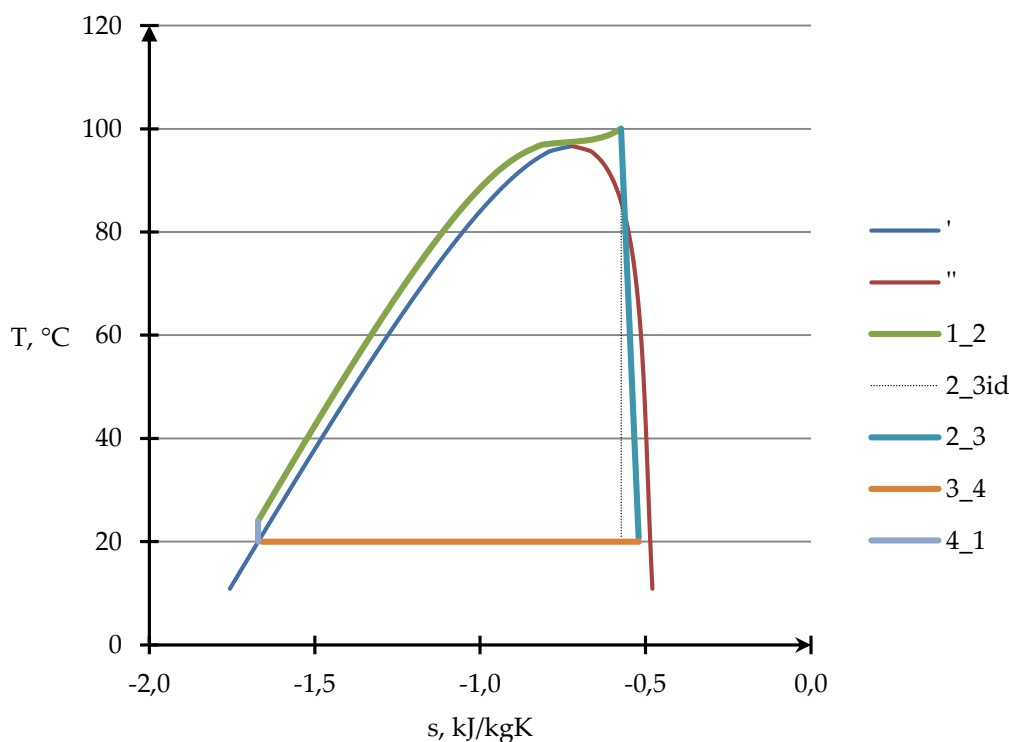
5-1. diagram. *T-s diagram propán munkaközegre 80 bar kútfajnyomásra, 100°C kútfajhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén*

Elvégeztük a hatásfok alakulásának vizsgálatát a nyomásfüggvényében, amelyet az 5-2. diagram tartalmaz.



5-2. diagram. *Hatásfok alakulása a nyomás függvényében $T_{kútfaj}=100^{\circ}\text{C}$ és $T_{kond}=20^{\circ}\text{C}$ esetén*

Látható, hogy alacsonyabb nyomásoknál a regenerátoros eset kedvezőbb, viszont ez nem megvalósítható, mivel ez a kritikus nyomás alatt van. A regenerátor nélküli eset maximális hatásfoka körülbelül a kritikus nyomás (42,5 bar) értékénél van, ami 9,47%. Ennek az esetnek a T-s diagramját mutatja az 5-3. diagram.



5-3. diagram. Maximális hatásfokhoz tartozó kútfejnyomás (42,5 bar) esetén a T-s diagram
($T_{kútfej}=100^{\circ}\text{C}$ és $T_{kond}=20^{\circ}\text{C}$)

Mivel a kútfejnyomás jóval magasabb a kritikus nyomásnál, ezért a fenti jó hatásfokú körfolyamat megvalósításához fojtani kell a kilépésnél.

Ez az eset a jó hatásfok ellenére technológiailag nehezen megvalósítható, mivel az expanzió nagy részében a munkaközeg a nedves mezőben mozog.

Hátrányként említhető még a propán tűz- és robbanásveszélyes tulajdonsága.

5.2. R22

A számításokat klór-difluor-metán (R22) munkaközegre is elvégeztük. Mivel kútfejhőmérséklet alacsonyabb, mint a közeg kritikus hőmérséklete, ezért nem

valósítható meg szuperkritikus körfolyamat, amely alapfeltétele az egykörös üzemnek. A közeg nagy hátránya a fentiekén kívül az ózonrétegre gyakorolt káros hatása.

5.3. *R32*

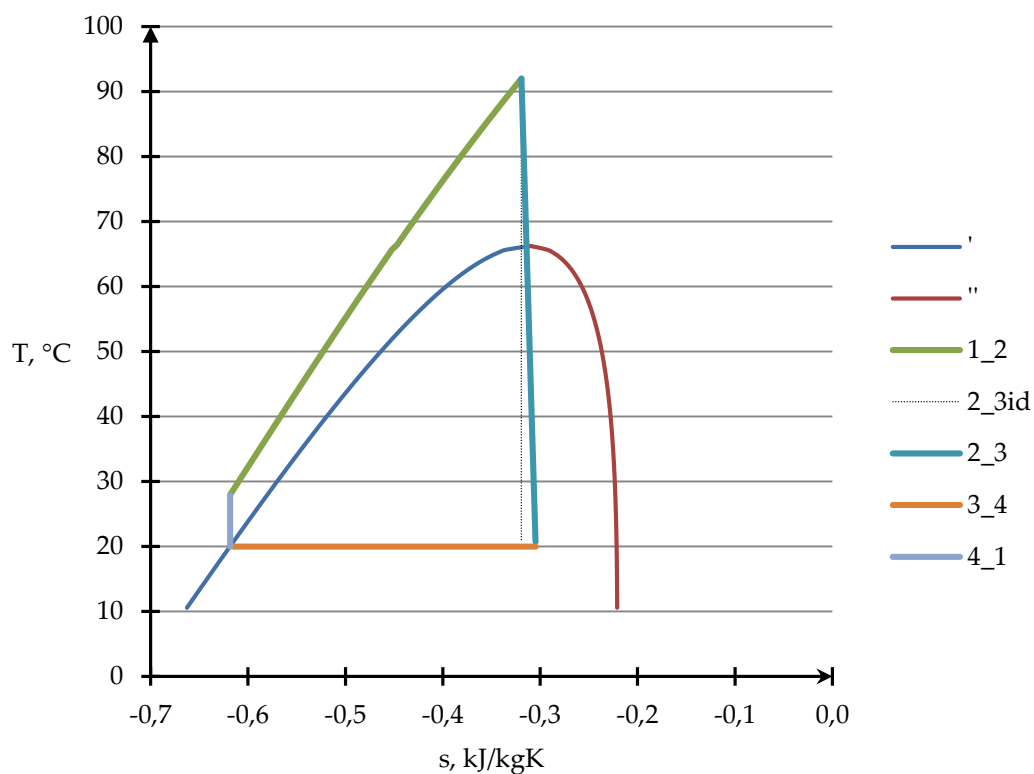
A difluormetán (R32) munkaközeg számítására a kritikus állapot fölött a FluidProp nem volt képes, ezért ezt nem vizsgáltuk.

5.4. *R134a*

Az 1,1,1,2-tetrafluoretán munkaközeg esetében is alacsonyabb a kútfejhőmérséklet mint a kritikus hőmérséklet ezért az 5.2 alfejezethez hasonlóan itt sem valósítható meg az egykörös körfolyamat.

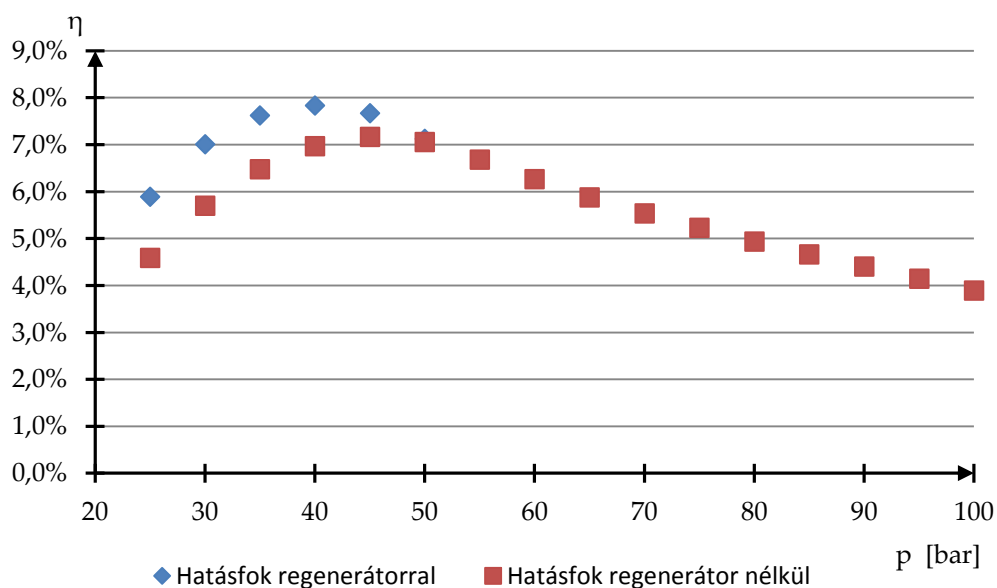
5.5. *R125*

A pentafluoretán munkaközeg esetén a kritikus hőmérséklet a kútfejhőmérséklet alatt van, ami lehetővé teszi az egykörös üzemet. A kútfejnyomáson (80 bar) és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén érvényes T-s diagram az 5-4. diagramon látható.



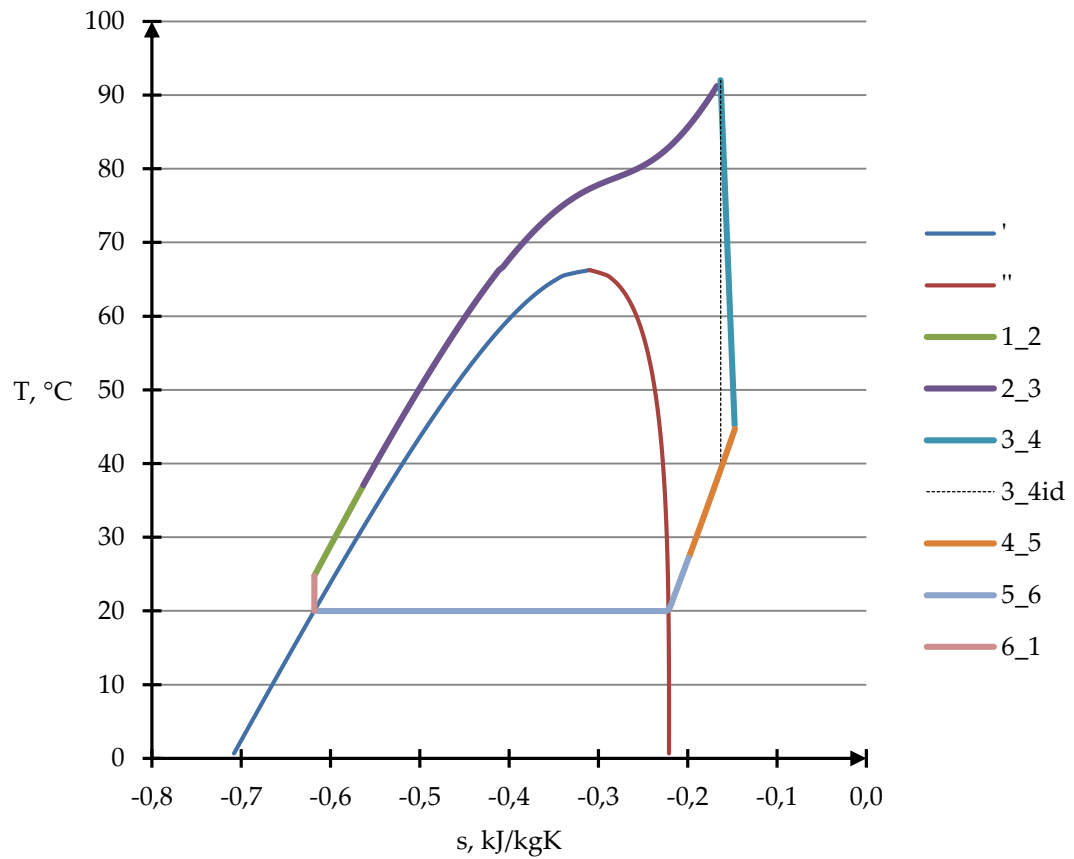
5-4. diagram. *T-s diagram R125 munkaközegre 80 bar kűtfejnnyomáson, 92°C kűtfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén*

Látható, hogy a körfolyamat ily módon nem valósítható meg, ezért megvizsgáltuk az optimális kezdőnyomás értékét, ami az 5-5. diagramon látható. A regenerátor a hőmérsékletvonalak keresztezése miatt 50 bar felett nem használható.

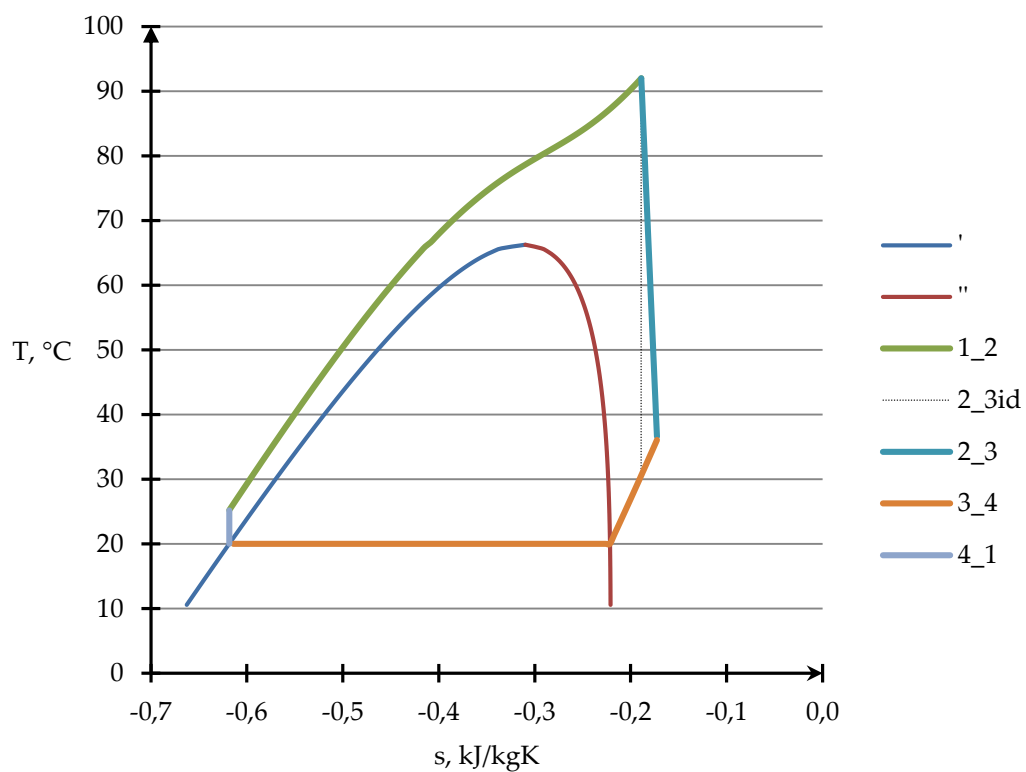


5-5. diagram. *A hatásfok alakulás a nyomás függvényében R125 munkaközegre*

A diagramról leolvasható, hogy az optimális nyomások alacsonyabbak, mint a kútfejnyomás, ezért ebben az esetben is fojtásra van szükség a kilépésnél. Az optimális kezdőnyomás értéke eltérő regenerátoros és regenerátor nélküli esetre. A két eset T-s diagramját az 5-6. diagramon, illetve az 5-7. diagramon ábrázoltuk.



5-6. diagram. R125 közegre a T-s diagram regenerátoros esetben 40 bar kútfejnyomáson, 92°C-os kútfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén



5-7. diagram. R125 közegre a T-s diagram regenerátor nélküli esetben, 45 bar kűtfejnnyomás, 92°C-os kűtfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén

A regenerátoros esetben az optimális 40 bar kezdőnyomás esetén a hatásfok 7,83%, míg regenerátor nélkül 45 bar optimális kezdőnyomás 7,17%.

5.6. A munkaközégek összehasonlítása

Az 5-3. táblázatban összegyűjtöttük az egyes munkaközégek esetén elérhető hatásfokokat.

5-3. táblázat. Munkaközégek összehasonlító táblázata

Megnevezés	Számolt hatásfok [%]	Megjegyzés
Szén-dioxid regenerátorral	3,98	Olcsó munkaközeg, de rossz hatásfok
Szén-dioxid regenerátor nélkül	3,39	Olcsó munkaközeg, de rossz hatásfok
R22	-	Túl magas kritikus hőmérséklet
R134a	-	Túl magas kritikus hőmérséklet
Propán	9,47	Az expanzió nagy része a nedves mezőben történik
R125 regenerátorral	8,44	Az expanzió a túlhevített mezőben történik
R125 regenerátor nélkül	7,17	Az expanzió a túlhevített mezőben történik

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatunkban célunk volt egy olyan energiaátalakítási technológia megtervezése, melyhez az ország területén megtalálható kimerült szénhidrogén kutak hőcserélőként szolgálhatnak. A kutak béléscsőve alul perforálás nélkül lezárásra kerül és a belsejébe koaxiális kialakításban termelőcsövet helyeznek.

A dolgozatunk első fejezetében általános képet nyújtunk a geotermikus energiáról, Magyarország geotermikus adottságairól, valamint részleteztük a kiaknázásához szükséges technológiai megoldásokat.

A második fejezetben megfogalmazzuk a feladatunkat, valamint a célkitűzéseinket.

A harmadik fejezetben részletes számítást végzünk a szén-dioxid munkaközegre. Megvizsgáltuk először a kétkörös rendszert, majd az egykörös rendszert. A kettő összehasonlítása alapján azt kaptuk, hogy az utóbbi jobb hatásfokkal tud üzemelni. A munkaközeg sajátosságaiból adódóan a szén-dioxid lekondenzáltatása nyári időszakban nehezen kivitelezhető, ami üzemviteli problémákat vet fel. Ezeknek elhárítására innovatív ötleteket vetettünk fel, amelyek vizsgálata egy következő TDK dolgozat tárgyát is képezheti. A nagy hűtőventillátor teljesítmények miatt nem érdemes száraz területre telepíteni ilyen típusú erőművet, de vízhűtés esetén elfogadható hatásfok is elérhető.

A negyedik fejezetben különböző források alapján becsült árakkal gazdasági számítást végeztünk. Meghatároztuk a beruházás megtérülési idejét, nettó jelenértékét és a belső megtérülési rátáját. A számítások alapján elmondható, hogy adott kútparaméterek mellett, ezzel a közeggel, ilyen típusú geotermikus erőmű megvalósítása a legtöbb figyelembevett gazdasági szcenárió esetén nem kifizetődő.

Az ötödik fejezetben a versenyképesség javítása érdekében más munkaközegekre is elvégeztük a vizsgálatot, úgy, mint propán, R22, R134a, R125. Ezeket a közegeket a kritikus hőmérsékletük alapján választottuk ki. A körfolyamat R22 és R134a munkaközeggel nem megvalósítható, viszont propán és főleg R125 alkalmazása esetén igen jónak számító 8,44%-os hatásfok is elérhető. (ez a hűtés energiaigényét nem tartalmazza). Ezen munkaközeg alkalmazásának hátránya a szén-dioxidhoz képest a magasabb árak.

Dolgozatunkban több oldalról megvizsgáltunk egy Magyarországon és világszinten egyaránt újnak számító technológiát. Kitértünk annak előnyeire, hátrányaira és gazdaságosságára egyaránt.

Reméljük, hogy a nem túl távoli jövőben Magyarországon is megvalósul egy hasonló technológiával üzemelő erőmű.

7. FORRÁSOK

- [1.] Mádlné Szőnyi Judit (2006) *A geotermikus energia készletek, kutatás, hasznosítás*
- [2.] Fischer Anita, Hlatki Miklós, Mezősi András, Pató Zsuzsanna (2009) *Geotermikus villamosenergia-termelés lehetőségei Magyarországon,*
- [3.] Mining Support Kft, *Pályázati információs csomag*
- [4.] Dr. Bobok Elemér, Dr. Tóth Anikó (2005) *Megújuló energiák*, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2005.
- [5.] Bihari (2002), *Erőművek*
- [6.] T.P. van der Stelt, N.R. Nannan, P. Colonna (2012) *The iPRSV equation of state*, Elsevier
- [7.] www.asimptote.nl
- [8.] Wen-Long Cheng, Tong-Tong Li, Yong-Le Nian, Kun Xie (2014) *Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells*
- [9.] Mádlné Dr. Szőnyi Judit, Dr. Rybach László, Dr. Lenkey László, Dr. Hámor Tamás, Zsemle Ferenc, (2008) *A geotermikus energiahasznosítás nemzetközi és hazai helyzete, jövőbeni lehetőségei Magyarországon*
- [10.] Groniewsky Axel (2005) *Geotermális lehetőségek Magyarországon*, Magyar Energetika, 2005/3

8. ÁBRAJEGYZÉK

1-1. ábra. Magyarország meddő kútjainak területi megoszlása [10.].....	2
1-2. ábra. Lindal-diagram [1.]	3
1-3. ábra. Kondenzációs geotermikus erőmű sematikus ábrája [1.].....	4
1-4. ábra. Hőmérséklet eloszlás 2000 m mélységben [10.].....	5
1-5. ábra. Hőmérséklet eloszlás 3000 m mélységben [10.].....	5
1-6. ábra. Binér geotermikus üzem sematikus ábrája [1.]	6
1-7. ábra. EGS rendszer [1.]	8
2-1. ábra. A kút kialakítása [8.]	10
2-2. ábra. A kút pontos méretei	11
3-1. ábra. ORC körfolyamat általános kapcsolási rajza	15
3-2. ábra. A körfolyamat regenerátor nélkül	19
3-3. ábra. A körfolyamat regenerátorral	19
3-4. ábra. A modellezet rendszer sémája és a számított eredmények	25

9. DIAGRAMJEGYZÉK

3-1. diagram. A hőcserélő T-Q diagramja R125 közegre	16
3-2. diagram. A regenerátor nélküli eset T-s diagramja (115 bar, 75°C).....	20
3-3. diagram. A nyomásváltozás hatása a turbinából kinyert fajlagos munkára	21
3-4. diagram. A nyomásváltozás hatása a hatásfokra.....	21
3-5. diagram. A hatásfok és a kondenzátor hőmérséklet alakulása a kritikus pont feletti hőmérsékletek esetén	26
3-6. diagram. A hatásfok alakulása a környezeti hőmérséklet és a kondenzátor hőmérséklet függvényében.....	27
5-1. diagram. T-s diagram propán munkaközegre 80 bar kútfejnyomásra, 100°C kútfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén.....	35
5-2. diagram. Hatásfok alakulása a nyomás függvényében $T_{kútfej}=100^{\circ}\text{C}$ és $T_{kond}=20^{\circ}\text{C}$ esetén	35
5-3. diagram. Maximális hatásfokhoz tartozó kútfejnyomás (42,5 bar) esetén a T-s diagram ($T_{kútfej}=100^{\circ}\text{C}$ és $T_{kond}=20^{\circ}\text{C}$).....	36
5-4. diagram. T-s diagram R125 munkaközegre 80 bar kútfejnyomáson, 92°C kútfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén.....	38

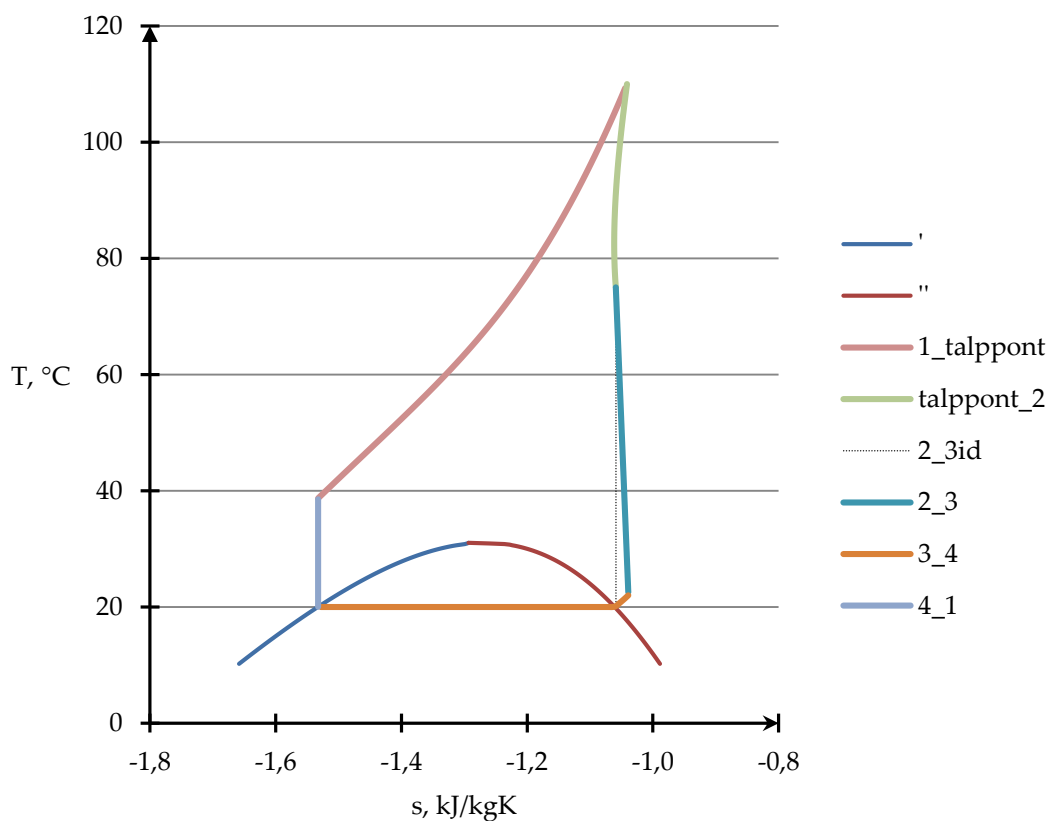
5-5. diagram. A hatásfok alakulás a nyomás függvényében R125 munkaközegre	38
5-6. diagram. R125 közegre a T-s diagram regenerátoros esetben 40 bar kútfejnyomáson, 92°C-os kútfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén	39
5-7. diagram. R125 közegre a T-s diagram regenerátor nélküli esetben, 45 bar kútfejnyomáson, 92°C-os kútfejhőmérséklet és 20°C-os kondenzátorhőmérséklet esetén	40
11-1. diagram. CO ₂ munkaközegű egykörös ORC körfolyamat T-s diagramja a kútban végbemenő nyomásváltozás figyelembevételével	49

10. TÁBLÁZATJEGYZÉK

2-1. táblázat. Kút adatok	11
3-1. táblázat. Kétkörös rendszer hatásfoka különböző munkaközegek és elgőzölgési hőmérséklet esetén	17
3-2. táblázat. A kézi számítás eredményei CO ₂ közegre regenerátor nélkül	20
3-3. táblázat. Teljesítmények a tömegáram függvényében, regenerátor nélkül, 105 bar, 75°C a kútfejnél.....	23
3-4. táblázat. Teljesítmények a tömegáram függvényében, regenerátorral, 75 bar, 75 °C a kútfejnél.....	24
3-5. táblázat. Megemelt hőmérsékletekhez tartozó nyomások	27
4-1. táblázat. Beruházási költségek.....	29
4-2. táblázat. Felhasznált adatok.....	31
4-3. táblázat. NPV	31
4-4. táblázat. IRR	32
5-1. táblázat. Munkaközegek kritikus jellemzői	33
5-2. táblázat. Mining Support Kft. számításai	34
5-3. táblázat. Munkaközegek összehasonlító táblázata.....	41
11-1. táblázat. CO ₂ munkaközegű egykörös ORC körfolyamat a kútban végbemenő nyomásváltozás figyelembevételével.....	49

11. MELLÉKLET

A kútban lefelé végbemenő nyomásnövekedés, és fölfelé végbemenő nyomáscsökkenés hatását figyelembe vevő számítás eredményeit a 11-1. táblázat tartalmazza. A T-s diagram a 11-1. diagram látható.



11-1. diagram. CO_2 munkaközegű egykörös ORC körfolyamat T-s diagramja a kútban végbemenő nyomásváltozás figyelembevételével

11-1. táblázat. CO_2 munkaközegű egykörös ORC körfolyamat a kútban végbemenő nyomásváltozás figyelembevételével

Jellemző	Mért. e.	1	kúttalp	2	3id	3	4
P	bar	135,00	172,30	115,00	57,86	57,86	57,86
T	°C	38,71	110,00	75,00	20,15	22,03	20,00
h	kJ/kg	-220,29	-44,46	-68,73	-92,08	-86,245	-231,00
s	kJ/kgK	-1,48	-0,9913	-1,0090	-1,0090	-0,98915	-1,48