

Mayer Martin János, Nyerges Viktor, Schróth Ádám

Geotermikus erőmű illesztése kimerült szénhidrogén kutakhoz

Bevezetés

Magyarország geotermikus adottságai

A geotermikus energia a Föld belsejének hőtartalékát jelenti, ami döntően a Föld magjában és a földkéregben koncentrált hosszú felezési idejű radioaktív elemek bomlási hőjéből táplálkozik. Magyarország területe a Pannon-medence alatti különlegesen vékony, 60-100 km-es litoszféra miatt sorolható – geotermikus adottságait tekintve – Európa élvonalába. A magyarországi geotermikus gradiens átlagosan 50 °C/km. A geotermikus gradiens a Dél-Dunántúlon és az Alföldön nagyobb, a Kisalföldön 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. [1]

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. A cikkben a Mining Support Kft. közreműködésével létrehozott munkánk eredményeit foglalkoztatjuk össze. A rendszer felszín alatti folyamatait a cég számolta, a mi feladatunk a cégtől kapott bemeneti adatokkal a felszíni rendszer megtervezése volt.

Kimerült szénhidrogén-kutak EGS (HDR) rendszerként való használata

Hazánk igen jól megkutatott ország, ami azt jelenti, hogy a fúrásos megkutatottsága az egyik legnagyobb a világon (1 fúrás/5 km²). A szénhidrogénipar által 66 év alatt leemélyített meddőfúrások száma mintegy 3000 db, amelyek területi elhelyezkedését az 1. ábra mutatja.

A kimerült szénhidrogén-kutak felszámolása a kutak tulajdonosa számára jelentős költséggel jár. Ha azonban a kút olyan területen he-

lyezkedik el, ahol a geotermikus gradiens értéke megfelelően magas, ott érdemes megvizsgálni a kutak kisebb átalakítása után energetikai célra való felhasználásukat. A kutak átalakításuk után úgynevezett EGS (Enhanced Geothermal System), más néven HDR (Hot Dry Rock) rendszerként funkcionálhatnak.

Hagyományos EGS rendszerek esetén nagyobb, néhány kilométeres mélységben, rétegrepszttéssel repedésrendszert alakítanak ki, és ez funkcionál hőcserélőként. Ebbe a repedésrendszerbe a felszínről vizet juttatnak, hogy az felvegye a földhőt. Betápláló és kiemelő kutak, valamint felszíni hasznosító egységek egészítik ki a cirkulációs rendszert.

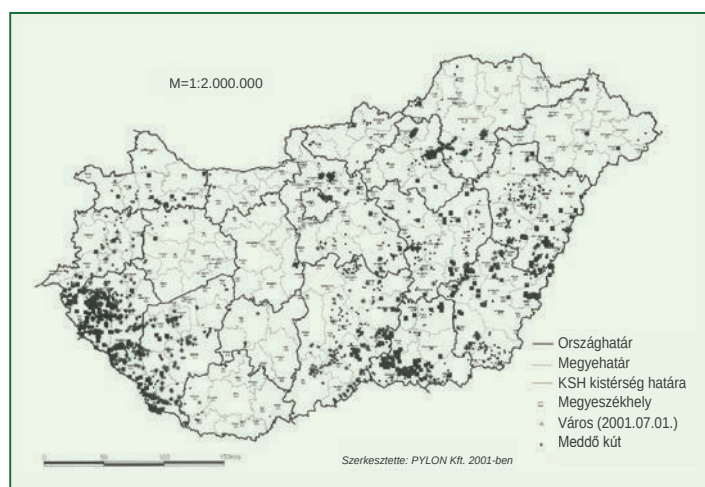
Esetünkben nem a kőzet repedései, hanem a szénhidrogén-kút szolgál hőcserélőként, továbbá a hőhordozó közeg nem víz, hanem széndioxid, ezért a közegvesztés elkerülése végett a kútnak hermetikusan zártnak kell lennie. A mesterségesen kifejlesztett földhőrendszerek segédközegek technológiát, Rankine- vagy Kalina-ciklusú megoldást használnak a hőhordozó energiájának hasznosítására.

A Rankine-ciklusban (ORC¹) a hőhordozó által a hőcserélőkön keresztül felfűtött másodlagos fluidum (amely általában valamilyen szerves vegyület) felmelegedve gőzzé alakul. Az így keletkezett gőz turbinán expandál. Kondenzáció után a fluidumot visszavezetik a ciklus elejére. A víz hőmérsékletéhez jól megválasztott ORC fluidummal a gyenge hatásfok növelhető. A jelenlegi segédközegek rendszereknél 40-70%-kal jobb hatásfokot nyújthat a Kalina-ciklus. Itt a másodlagos közeg kétkomponensű: víz és ammónia keveréke. A hatásfok növekedésének oka, hogy az elgőzölgés nem állandó hőmérsékleten megy végbe, így a hőátvitel hőfokrése csökkenthető. A szabadalmi jogok költsége túlságosan megdrágítaná a beruházást, ezért a felszíni rendszert ORC körfolyamatra alapoztuk.

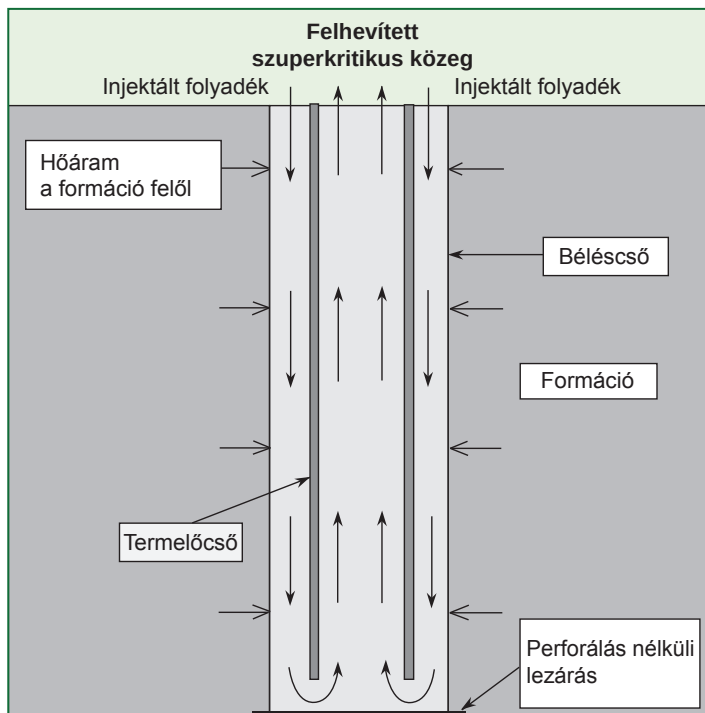
Modellezés

Kútmodell

Munkánk célja, hogy energiát termelő körfolyamatot illesszünk egy kimerült szénhidrogén-kútra. A vizsgált kút geológiai ismeretekre épülő modelljét a Mining Support Kft. készítette el. A kútnak kisebb átalakításokat végeznek. A béléscső alját perforálás nélkül lezárják, és koaxiális elrendezésben egy termelőcsövet helyeznek el benne. A kút így dupla-csőes hőcserélőként funkcionál. A cég szén-dioxid hőhordozó közegre alkotta meg a modelljét, köszönhetően a kedvező árának, valamint mivel ezzel a közeggel mind az egy-, mind a kétkörös rendszerkialakítás működőképes. A szén-dioxidot folyékony állapotban sajtolják a külső gyűrűbe. Lefelé haladva a CO₂ folyamatosan melegszik, a talpponton visszafordul a termelőcsőbe, majd szuperkritikus állapotban a felszínre jön. A folyamat sémája a 2. ábrán látható. A cég által alkalmazott modell számítja a különböző besajtolási nyomásokhoz és tömegáramokhoz tartozó kilépő termodinamikai jellemzőket a kútfejnél. A kút



1. ábra. Magyarország meddő kútjainak területi megoszlása [2]



2. ábra. A kút sematikus kialakítása [3]

paramétereit, valamint a kőzetek (formáció) tulajdonságait rendelkezésünkre bocsátották.

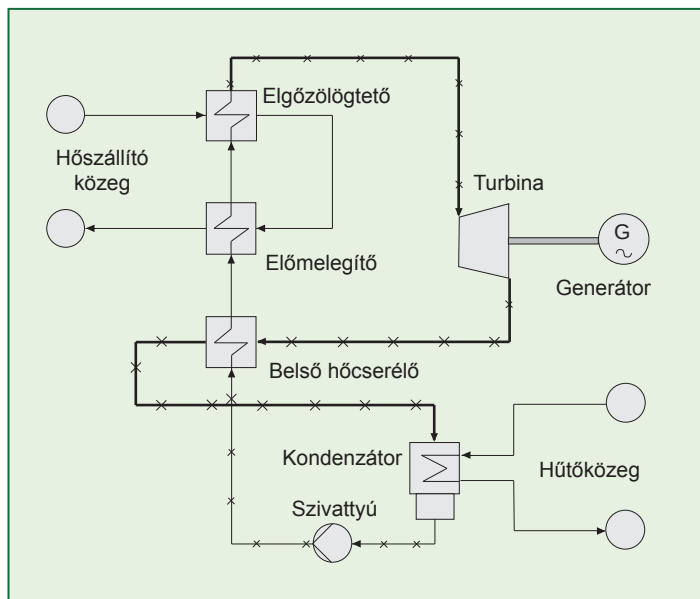
A felszíni rendszer modellje

A számításokhoz a FluidProp nevű solvert használtuk, amely termodinamikai függvények segítségével számos közeg termofizikai tulajdonságainak meghatározására alkalmas. A számításaink ellenőrzéséhez használt CycleTempo [4] hőséma-számító program szintén a FluidPropot használja. A FluidProp többféle egyenlet alapján képes számolni, amelyek közül a StanMix-et választottuk. A StanMix az iPRSV állapotegyenletet alkalmazza, amely a Peng-Robinson-Stryjek-Vera egyenlet egy módosítása. Ez az egyenlet az egyik legpontosabb a nem ideális gázok és fluidumok viselkedésének leírása terén [5][6].

Az elgőzölgtetőben a hőmérséklet-lefutásokat a legkisebb megengedhető hőfokrás módszerének segítségével számítottuk, amelynek reálisan megválasztott értéke 5 °C. A regenerátorban és a kondenzátorban szintén 5 °C-os minimális hőfokrással számoltunk, míg a kondenzátorhőmérsékletet 20 °C-nak választottuk. A turbina és szivattyú hatásfokát 75%-nak, a generátorét pedig 95%-nak tekintettük. Ezek az értékek viszonylag alacsonyak, a gyakorlatban ennél jobb hatásfokú gépek is elérhetők, azonban a körfolyamat során az egyes berendezésekben jelentkező nyomásesést, a hőveszteségeket, valamint a hűtés energiaigényét (szivattyú, illetve ventilátor) nem vettük figyelembe a modellben, így az alacsonyabb hatásfok használata realisabb eredményekhez vezet. A kútban megengedett maximális tömegáram 20 kg/s.

A Mining Support Kft. számításai alapján a tömegáram változtatásának hatására 20 kg/s tömegáramig csak kismértékben változik a kútból kilépő közeg hőmérséklete, ezért a legnagyobb teljesítmény elérése érdekében a maximálisan megengedhető 20 kg/s tömegárammal és állandó 75 °C kútfej-hőmérséklettel számoltunk.

Ebben az esetben a kút hőteljesítménye állandó, így a villamos teljesítményt a hatásfok határozza meg, a két jellemző analóg módon használható, ezért cél a minél magasabb hatásfok elérése.

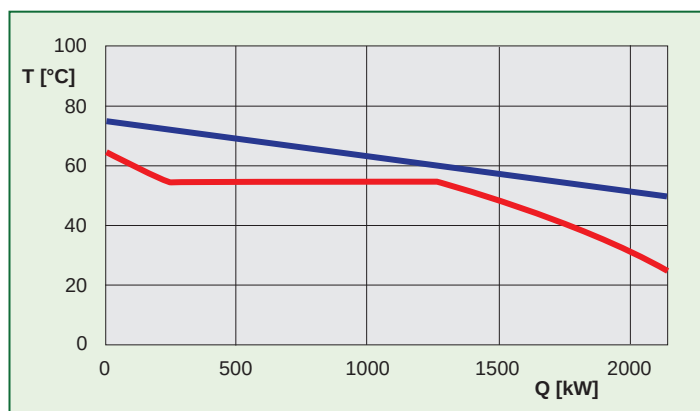


3. ábra. ORC körfolyamat általános kapcsolási rajza

Kétkörös ORC rendszer

Elsőként megvizsgáltuk annak a lehetőségét, hogy a kútból kilépő CO₂-t hőcserélőbe vezetve annak hőtartalmát egy eltérő munkaközegű szerves Rankine-körfolyamattal (ORC) hasznosítsuk. A körfolyamat kapcsolási rajza a 3. ábrán látható.

A kút megfelelő működésének feltétele, hogy a CO₂-t folyadékállapotban vezessük vissza a kútba, ehhez a kritikus ponti hőmérséklete, 31 °C alá kell hűteni. A rendszer kritikus eleme az előmelegítő és elgőzölgtető hőcserélő, melyben a CO₂ lehűlve átadja hőtartalmát a körfolyamat munkaközegének. A legkisebb hőfokrás a két közeg között az elgőzölgtető kezdőpontján lesz, így a CO₂ legnagyobb mértékű visszahűtéséhez az előmelegítés hőigényének részarányát kell növelni az elgőzölgtetőzéséhez képest. Minél nagyobb a választott ORC munkaközeg kritikus ponti hőmérséklete, annál nagyobb lesz az elgőzölgtetőzés hőigényének részaránya azonos elgőzölgtetőzési hőmérséklete mellett. Célszerű ezért alacsony kritikus hőmérsékletű munkaközeg választani, ilyen az R125 (pentafluor-etán), valamint az R32 (difluor-metán). A munkaközeg túlhevítését is feltételeztük a kiválasztott 5 °C-os minimális hőfokrásnak megfelelően, mivel a túlhevítés jelentősen javítja a körfolyamat hatásfokát. A 4. ábrán látható a hőcserélő T-Q diagramja, amelyen a kék görbe a CO₂ hűlését, míg a piros az ORC munkaközeg melegedését és elgőzölgtetőzését mutatja.



4. ábra. A hőcserélő T-Q diagramja R125 közegre

1. táblázat. Kétkörös rendszer hatásfoka különböző munkaközlegek és elgőzölgesi hőmérséklet esetén

Munka-közeg	$T_{\text{elg}} [^{\circ}\text{C}]$	$\eta_{\text{ORC}} [\%]$	$T_{\text{CO}_2, \text{ki}} [^{\circ}\text{C}]$	$\eta_{\text{hőhaszn}} [\%]$	$\eta_{\text{össz}} [\%]$
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

Több különböző elgőzölgesi hőmérséklet esetére is megvizsgáltuk a lehetőségeket, az eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A táblázatban T_{elg} az elgőzölgesi hőmérséklet, η_{ORC} a körfolyamat hatásfoka, $T_{\text{CO}_2, \text{ki}}$ a CO_2 hőmérséklete a hőcserélőből történő kilépéskor, $\eta_{\text{hőhaszn}}$ pedig a hőhasznosítás aránya. A CO_2 közeget a folyadékkállapot eléréséhez mindenképpen közel 30°C -ra le kell hűteni, ami a hőcserélőben általában nem sikerül, így további hűtést igényel. A hőhasznosítás aránya azt fejezi ki, hogy a CO_2 közeg 75°C -ról 30°C -ra hűlése során leadott energia hányadrészét hasznosítottuk a hőcserélőben. A teljes rendszer hatásfoka ($\eta_{\text{össz}}$) a körfolyamat hatásfokának és a hőhasznosítás arányának szorzataként számítható.

Magas elgőzölgesi hőmérséklet esetén a körfolyamat hatásfoka is magasabb, azonban a CO_2 -t csak kis mértékben lehet visszahűteni, ami az összh hatásfokot jelentősen csökkenti. Alacsonyabb elgőzölgesi hőmérséklet esetén a javul a hőhasznosítás aránya, azonban a körfolyamat hatásfokának romlása újfent alacsony összh hatásfokot eredményez.

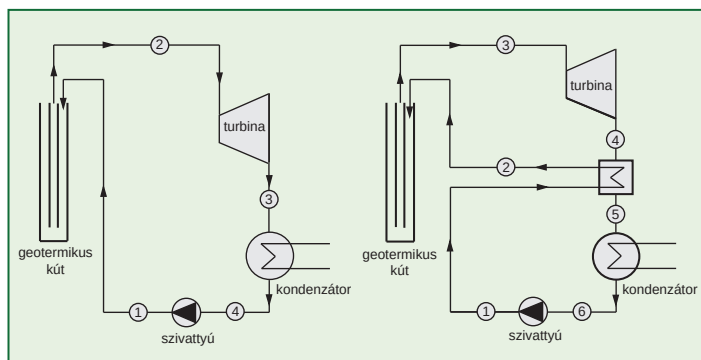
Vizsgáltuk a regenerátor elhagyásának lehetőségét is, amelynek esetében a CO_2 -t alacsonyabb hőmérsékletre lehet visszahűteni, hiszen hidegebb munkaközeg lép be a hőcserélőbe. A körfolyamat hatásfoka ennek hatására azonban olyan mértékben csökken, hogy az összh hatásfok közel azonos marad. A regenerátor 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 sikerül magasabb hatásfokot elérni.

Egykörös ORC rendszer

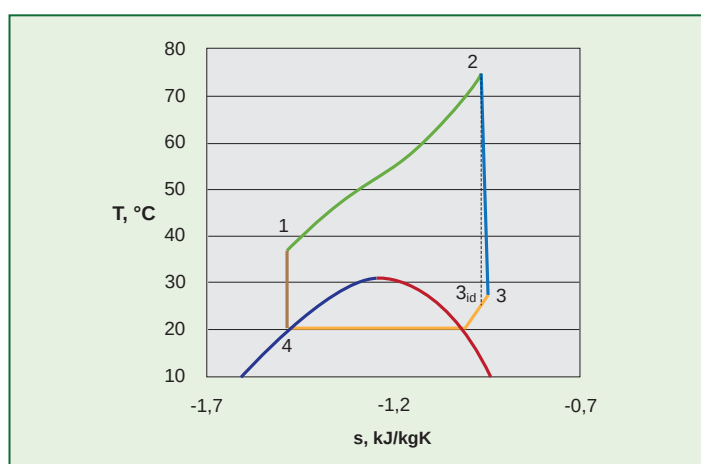
Megvizsgáltuk a szén-dioxid direkt hasznosítását is. Ebben az esetben a kútból érkező szén-dioxidot közvetítőközeg beiktatása nélkül a turbínába vezetjük. A munkavégzés után a CO_2 a turbínából a nyomásszinttől függően a regenerátorba vagy közvetlenül a kondenzátorba jut (5. ábra). Előbbi célja, hogy a kondenzátorba jutó munkaközeg ne túlhevített, hanem telített állapotú legyen. 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.

A 6. ábra a regenerátor nélküli körfolyamat T-s diagramját ábrázolja 20°C -os kondenzátorhőmérséklet, 115 bar kútfej-nyomás és 75°C kútfej-hőmérséklet esetén.

A kondenzáció után a cseppfolyósított szén-dioxidot szivattyú nyomja vissza a kútba (5. ábra). A szivattyú által legyőzendő, a kútban fellépő nyomásvesztéséget 20 bar-nak vettük fel.



5. ábra. Egykörös ORC rendszer egyszerűsített kapcsolási rajza. Bal oldalon regenerátor nélkül, jobb oldalon regenerátorral.



6. ábra. A regenerátor nélküli eset T-s diagramja (115 bar, 75°C)

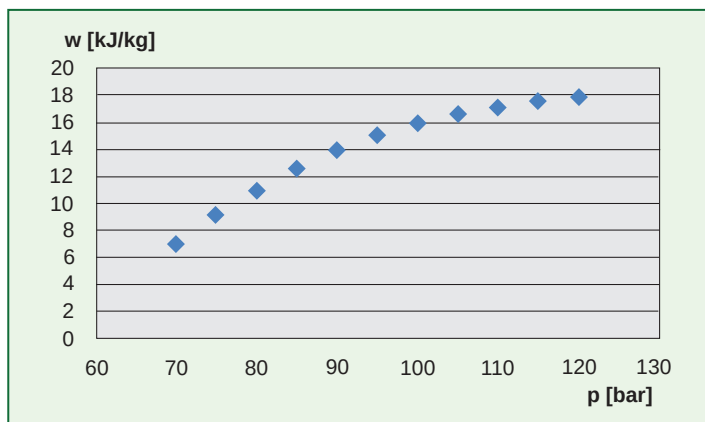
A kútfej-nyomás változásának hatásait a 7. és a 8. ábra mutatja be.

A 7. ábrán látszik, hogy a nyomásnövelés hatására a kinyert munka növekménye egyre kisebb lesz. A 8. ábra azt mutatja be, hogy a hatásfoknak maximuma van a nyomás függvényében, ami más regenerátoros (75 bar) és más regenerátor nélküli (105 bar) esetben. A kinyert teljesítmény a keringtetett tömegáram növelésével egy bizonyos határig növekszik.

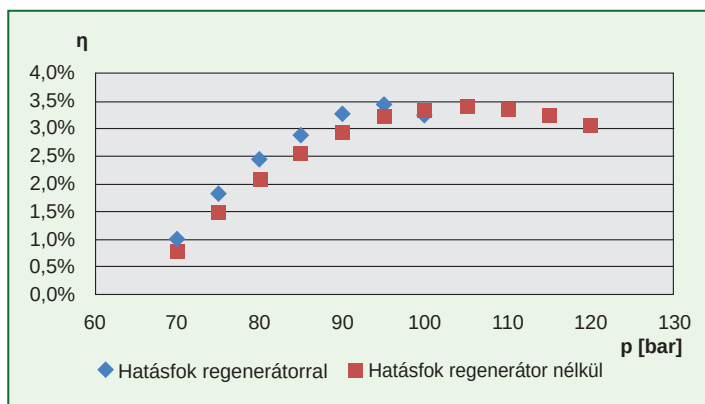
A 7. ábrán látható, hogy a regenerátor használatával nő a hatásfok, de ennek is van korlátja, amely 95 bar körül mozog. E fölött a turbínából kilépő közeg hőmérséklete alacsonyabb, mint a szivattyú utáni, amiért a hőátvitel iránya itt megfordul. A regenerátor Bošnjaković tényezőjét $\Phi=0,9$ -re vettük fel a számítás során.

A nyári üzem a rendszer kritikus pontja. A szén-dioxidot a kondenzáció megvalósításához mindenképpen a kritikus pont alá kell hűteni ($31,06^{\circ}\text{C}$) egy, a hőcserélőhöz szükséges ΔT hőmérsékletkülönbséggel. A megengedett felmelegedést $\Delta T = 6^{\circ}\text{C}$ -nak, a minimális hőfokrést a fent említett $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ -nak felvéve kiadódik, hogy a rendszer 20°C -nál melegebb hűtőközzel nem működik.

A nyári időszakban gyakran előfordul, hogy a természetes vizek és főként a levegő hőmérséklete 20°C fölé emelkedik. 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 levegőhőmérséklet mellett milyen kondenzációs hőmérséklet érhető el, de 20°C feletti levegővel már problematikus a kondenzációs hőmérséklet 30°C alatt tartása, 25°C felett pedig a kisebb hőfokrések alkalmazása miatt csak



7. ábra. A nyomásváltozás hatása a turbinából kinyert fajlagos munkára



8. ábra. A nyomásváltozás hatása a hatásfokra

a felületek igen jelentős túlméretezése mellett lehetséges. A legjobb hatásfokú esetekben a teljesítményeket a 2. táblázat mutatja. Mindkét esetben nagyon alacsony hatásfokot kaptunk.

További közegek vizsgálata

Mivel a számításaink alapján kiderült, hogy a szén-dioxid munkaközeggel az alacsony hatásfok miatt 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 hőmérsékleténél alacsonyabbnak kell lennie. Ez alapján megvizsgáltuk az R125, R22 (klór-difluor-metán) és propán alkalmazásának a lehetőségét is. A választott munkaközegek kritikus jellemzőit a 3. táblázat tartalmazza.

A kút használhatósága érdekében mindenképpen szuperkritikus állapotváltásra van szükség, mivel a subkritikus nyomáson történő fázisváltozás során, a hirtelen sűrűségváltozás hatására a keletkező gőzbuborékok visszaáramlását nem lehetne meggátolni. A 3. és a 4. táblázat alapján látszik, hogy a klór-difluor-metán (R22) esetén alacsonyabb a kútfej-hőmérséklet, mint a kritikus hőmérséklet, ezért nem valósítható meg az egykörös körfolyamat. A számításához szükséges közegjellemző adatokat a Mining Support Kft. jóvoltából a 4. táblázat tartalmazza.

Propán

Propánra is elvégeztük a hatásfok alakulásának számítását a nyomás függvényében, amelynek eredménye a 9. ábrán látható.

2. táblázat. Teljesítmények (105 bar, 75°C a kútfejnél, 20 kg/s CO₂)

Eset	Villamos teljesítmény (kW)	Elvonandó hőteljesítmény (kW)	Bevezetett hőteljesítmény (kW)	Hatásfok %
regenerátorral	60,6	3277,6	3338,2	3,43
regenerátor nélkül	112,0	3159,1	3304,0	3,39

3. táblázat. Munkaközegek kritikus jellemzői

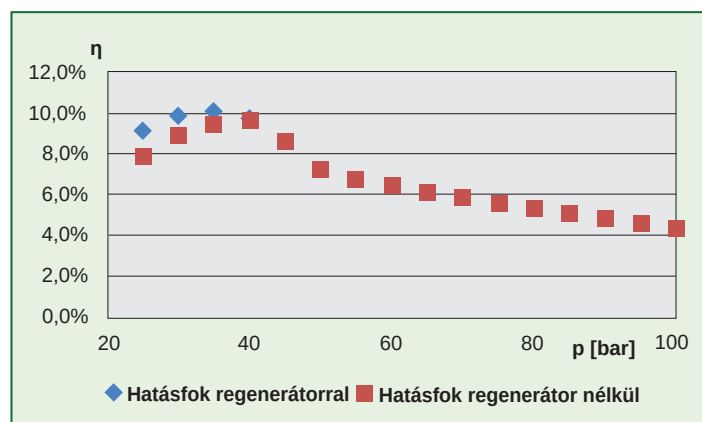
Anyag	Kritikus hőmérséklet [°C]	Kritikus nyomás [bar]
Szén-dioxid	31,04	73,8
R125	66,25	36,3
R22	96,05	49,8
Propán	96,67	42,5

4. táblázat. Mining Support Kft. számításai

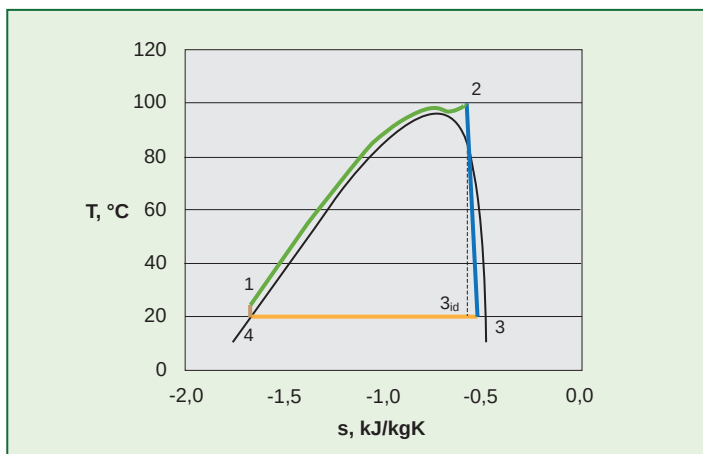
Munkaközeg	m [kg/s]	T _{ki} [°C]	Várható fázisállapot
R22	4	8	nedves gőz
	10	80	nedves gőz
	15	78	nedves gőz
Propán	4	86	nedves gőz
	10	92	nedves gőz
	15	100	nedves gőz/száraz gőz
R125	4	90	száraz gőz
	10	92	száraz gőz
	15	92	száraz gőz

Látható, hogy alacsonyabb nyomásoknál a regenerátoros eset lenne 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, amely 9,47%-nak adódik. Ennek az esetnek a T-s diagramját mutatja a 10. ábra.

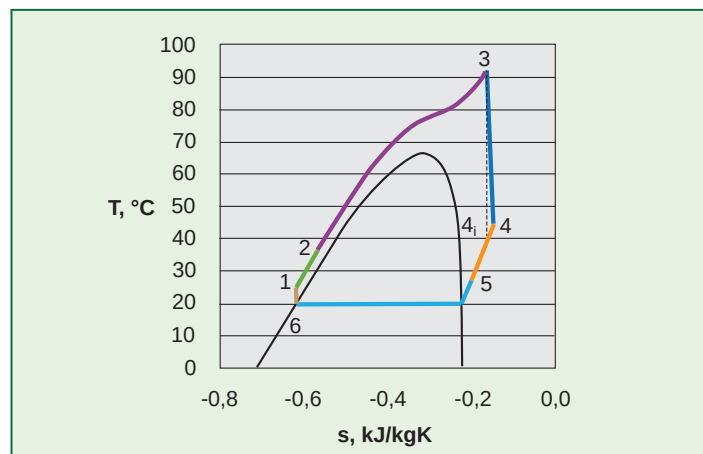
Ez az eset a jó hatásfok ellenére technológiailag nehezen megvalósítható, mivel az expanzió nagy részében a munkaközeg a nedves mezőben mozog. Hátrányként említhető még, hogy a propán tűz- és robbanásveszélyes.



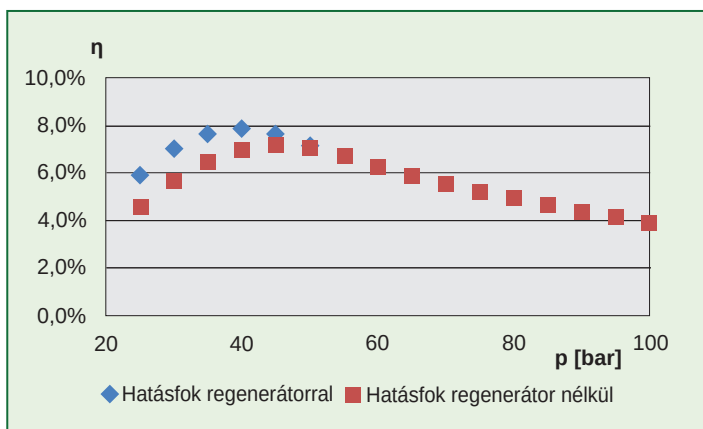
9. ábra. A hatásfok alakulása a nyomás függvényében propán esetében T_{kútfej} = 100 °C és T_{kond} = 20 °C esetén



10. ábra. A T-s diagram a maximális hatásfokhoz tartozó nyomás (42,5 bar) mellett ($T_{\text{kútfej}} = 100\text{ °C}$ és $T_{\text{kond}} = 20\text{ °C}$) propán esetében



12. ábra. A T-s diagram regenerátoros esetben 40 bar kútfejnyomáson, 92 °C -os kútfejhőmérséklet és 20 °C -os kondenzátorhőmérséklet esetén R125 közegre



11. ábra. A hatásfok alakulása a nyomás függvényében R125 munkaközegre

5. táblázat. Munkaközégek összehasonlító táblázata

Megnevezés	Számított 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
Propán	9,47	Az expánzió nagy része a nedves mezőben történik
R125 regenerátorral	8,44	Az expánzió a túlhevített mezőben történik
R125 regenerátor nélkül	7,17	Az expánzió a túlhevített mezőben történik

R125

Pentafluor-etán munkaközeg esetén a kritikus hőmérséklet a kútfejhőmérséklet alatt van, ami lehetővé teszi az egykörös üzemet. Az optimális kezdőnyomás meghatározható a 11. ábra alapján. A regenerátor a hőtadás irányának megfordulása miatt 50 bar felett nem használható.

Az optimális kezdőnyomás értéke eltérő regenerátoros és regenerátor nélküli esetre. A regenerátoros eset T-s diagramját a 12. ábrán ábrázoltuk.

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

A munkaközégek összehasonlítása

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

Bár a propán esetén adódik a legnagyobb hatásfok, az üzemeltetési nehézségek (expánzió végig a nedves mezőben) és a propán tűz- és robbanásveszélyes tulajdonsága miatt véleményünk szerint az R125 közeg alkalmazása célszerű regenerátorral.

A kút hőteljesítménye (2512 kW) és az 5. táblázat megfelelő hatásfoka (8,44%) alapján számítható az erőmű villamos teljesítménye, melynek értéke 212 kW.

Gazdaságossági értékelés

A geotermikus kiserőmű gyakorlati megvalósíthatóságát döntő mértékben annak gazdasági megtérülése határozza meg. A beruházás pénzügyi értékelését a dinamikus gazdaságossági modell segítségével végeztük el, amely figyelembe veszi a pénz időértékét a különböző időpontokban érkező pénzáramok összegzése során. A számítás alapjául szolgáló mutató a nettó jelenérték (net present value – NPV), amely az adott vizsgálati időtartam alatt jelentkező bevételek és kiadások jelenértékének előjelhelyes összegzését jelenti. A beruházás akkor térül meg a vizsgált időtartam alatt, ha a nettó jelenértéke pozitív. A vizsgált kiserőmű esetében a beruházási költség a jelenben jelentkezik, míg a későbbiekben a bevételek a termelt energia értékesítéséből származnak:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_{E,t} \cdot E_t}{(1+r)^t} - C_0$$

ahol NPV a nettó jelenérték [Ft], t az adott időszak sorszáma [-], n a vizsgált időszakok száma, r a diszkontráta [-], C_0 a beruházási költség [Ft], $C_{E,t}$ a villamos energia értékesítési egységára [Ft/kWh], E_t a termelt villamos energia mennyisége a t . évben [kWh]. A számítás az üzemeltetési és karbantartási költségek elhanyagolásával történt, azok várhatóan alacsony értéke miatt. Éves szinten megegyező pénz-

6. táblázat. 2015 januárjától érvényes villamos energia kötelező átvételi árak a KÁT rendszerben [7]

Időszak	Csúcs	Völgy	Mélyvölgy
20 MW vagy annál kisebb erőműben (kivéve: naperőmű) termelt	35,91	32,14	13,11

7. táblázat. Legnagyobb megengedhető beruházási költség a kívánt megtérülési idő eléréséhez

Kívánt megtérülési idő [év]	10	15	20	25	30
Megengedhető beruházási költség [M Ft]	405,1	544,5	653,8	739,4	806,5

áramokat feltételezve, valamint kihasználva az NPV = 0 megtérülési határt, a fenti egyenlet az alábbi könnyen kezelhető alakra hozható:

$$r \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right)^{-1} = \frac{C_E \cdot E}{C_o}$$

A fenti összefüggés legbizonytalanabb eleme a beruházási költség, így erre végeztük el a számítást. A diszkontráta a pénz időértékét fejezi ki, más megközelítésben elvárt hozam rátának is nevezhetjük, amely megadja, hogy a beruházó mekkora hozamot vár az adott befektetéstől. A gazdasági törvényszerűségek alapján értéke az azonos kockázatú befektetések esetén elérhető hozamnak felel meg, értékét a jelenlegi jellemzően alacsony kamatlábak mellett 5%-nak választottuk.

Az éves szinten termelt villamos energia mennyisége a rendszer névleges teljesítménye és a csúcskihasználási óraszám segítségével határozható meg. A kiserőmű folyamatos működésre képes, és az alacsony üzemeltetési költség miatt gazdaságos is az állandó üzem, leállítására csak a karbantartások ideje alatt van szükség, így magas, mintegy 8000 órás csúcskihasználás is elérhető. Az előző fejezetekben bemutatott legjobb megoldáshoz (R125) tartozó teljesítmény 212 kW, így éves szinten mintegy 1700 MWh/év villamosenergia-termelés várható.

A megújuló energián alapuló, geotermikus kiserőművek esetén lehetőség van a termelt energia kötelező átvételi rendszerben (KÁT) történő értékesítésére, amely támogatott, állandó átvételi árat garantál. A 2015. január 1-jétől érvényes tarifát a 6. táblázat tartalmazza. Az átlagos átvételi árat az egyes időszakokban érvényes áraknak az időszakok hosszával súlyozott átlaga jelenti, ennek értéke 30,93 Ft/kWh.

A kiserőmű tervezett élettartama 30 év, a befektetők többsége azonban ennél rövidebb idejű megtérülést vár, így a számítást néhány ennél rövidebb megtérülési időre is elvégeztük. Az eredményeket a 7. táblázat foglalja össze, amely megmutatja, hogy mekkora az a maximális beruházási költség, amellyel a kívánt idő alatt megtérül a befektetés.

A 800 millió Ft beruházási költség [8] reális értéknek tekinthető a rendszer méreteit figyelembe véve, amellyel a beruházás a műszaki élettartamán belül megtérül. Pályázati támogatással a megtérülési idő jelentősen csökkenthető, 50%-os támogatási arány esetén a megtérülési idő már 10 év alá csökken.

A gazdasági számítások során elhanyagoltuk a rendszer üzemeltetési, karbantartási költségeit, ezek alacsony értéke miatt, azonban ez

nem eredményez jelentős hibát. Ugyanígy figyelmen kívül hagytuk a gazdasági környezet változását is; a villamos energia árának növekedése például a megtérülési idő csökkenését eredményezi.

Összefoglalás

Célunk az volt, hogy olyan energiatermelő rendszert tervezzünk, amelynek segítségével a hazánkban nagy számban előforduló kimerült szénhidrogén-kutak mesterséges földhőrendszerként való használatával a kutak mélyében rejlő geotermikus energia hasznosítható. Mivel a kutak többsége lakóterülettől távol esik, ami a hő szállítását a nagyarányú hővesztesség miatt gazdaságtalanná teszi, ezért elsősorban villamos energia előállítása volt a kitűzött cél.

Többféle rendszerkialakítást és munkaközeget is megvizsgáltunk. Részletes számítást végeztünk szén-dioxid munkaközegre mind egy-, mind kétkörös rendszerkialakításra. A vizsgálatok eredményeképpen kiderült, hogy az egykörös rendszer jobb hatásfokkal képes üzemelni, azonban ezzel a munkaközeggel, a legtöbb figyelembevett gazdasági forgatókönyv esetén nem kifizetődő a beruházás. A versenyképesség javítása érdekében más munkaközegre (propán, R22, R125) is elvégeztük a vizsgálatot.

A számításokból kiderült, hogy az R125-ös közeg a legjobb választás, amellyel a Mining Support Kft. által kijelölt kút esetében az általunk tervezett erőmű 212 kW villamos teljesítményre képes. Önfogyasztásként csak a szivattyú fogyasztását vettük figyelembe. 8000 órás csúcskihasználási óraszám mellett az erőmű mintegy 1700 MWh villamos energiát képes termelni. Az erőmű beruházási költsége 800 millió Ft-ra tehető, amellyel a KÁT január elsejétől érvényes átvételi tarifái mellett a beruházás a műszaki élettartama alatt megtérül. Pályázati támogatással 50%-os támogatási arány esetén a beruházás akár 10 év alatt is megtérülhet.

Jegyzetek:

1. Organic Rankine Cycle

Hivatkozások

- [1] Mádlé Dr. Szőnyi Judit, A geotermikus energia, Grafon Kiadó, 2006.
- [2] Groniewsky Axel, „Geotermális lehetőségek Magyarországon,” Magyar Energetika, 2005/3.
- [3] Wen-Long Cheng, Tong-Tong Li, Yong-Le Nian és Kun Xi, „Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells,” Applied Energy, 2014.
- [4] Delft University of Technology, Cycle-Tempo, version 5.0, software.
- [5] T.P. van der Stelt, N.R. Nannan és P. Colonna, „The iPRSV equation of state, Fluid Phase Equilibria,” Elsevier, p. 330 24–35, 2012.
- [6] „Asimptote,” [Online]. Available: www.asimptote.nl. [Hozzáférés dátuma: 12. jan. 2015.].
- [7] „A megújuló energiaforrásból, illetve a hulladékból nyert energiával termelt villamos energiára vonatkozó kötelező átvételi árak,” Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, 2008-2014. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/hatosagi-arak-2/villamos-energia/kotelezo-atvetel.html>. [Hozzáférés dátuma: 12 jan. 2015.].
- [8] Fischer Anita, Hlatki Miklós, Mezősi András és Pató Zsuzsanna, Geotermikus villamosenergia-termelés lehetőségei Magyarországon, Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont, 2009.