

GIANONE JÁNOS
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

GIANONE JÁNOS
TDK DOLGOZAT

Geotermikus hőforrás egyidejű használata villamosenergia terme-
lésre és távhőszolgáltatásra

Konzulens:

Dr. Imre Attila

Egyetemi tanár

Budapest, 2022

© Gianone János, 2022.

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Gianone János* (PLZNTE), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a Tudományos Diákköri Konferencia dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2022 november 7.

Gianone János

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	vii
1. Bevezetés	1
2. Abstract.....	2
3. A hőforrás hasznosításának lehetőségei	3
3.1. Villamosenergia-termelés – szerves Rankine-ciklus technológiai bemutatása	3
3.1.1. Az ORC technológia felépítése	3
3.1.2. A geotermikus alapú áramtermelés egyéb berendezései	5
3.1.3. Munkaközeg	6
3.1.4. A moduláris ORC	8
3.1.5. Életciklus elemzés (LCA).....	8
3.1.6. Megvalósult geotermikus projektek	9
3.2. A hőforrás felhasználása távhőszolgáltatásban, valamint kapcsolt termelés: távhő és villamosenergia párhuzamos szolgáltatása	9
4. Magyarország geotermikus potenciáljának vizsgálata	12
4.1. Magyarország geológiai adottságai	12
4.2. A Magyarországon működő és működtetni kívánt magas hőmérsékletű geotermikus rendszerek	13
4.3. A telephely kiválasztása	14
5. A Villamosenergia-termelés előirányzata	16
5.1. Koncepció	16
5.2. A körfolyamat sarokpontjainak meghatározása.....	17
5.3. Különböző paraméterek telepítések, telephelyek megadása	21
5.4. A modell összeállítása Cycle-Tempo hősémaszámító környezetben	23
6. Összefoglalás, továbblépési javaslatok.....	25
7. Felhasznált források.....	26

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
h	fajlagos entalpia	kJ/kg
$\dot{m}$	tömegáram	kg/s
p	nyomás	bar
P	teljesítmény	kW
q	fajlagos hőmennyiség	kJ/kg
$\dot{Q}$	hőáram	kW
s	fajlagos entrópia	kJ/(kg·K)
t	hőmérséklet	°C
T	hőmérséklet	K
w	fajlagos munka	kJ/kg
x	fajlagos gőztartalom	1

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
η	hatásfok	1

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
'	kétfázisú közeg telített folyadék állapota
''	kétfázisú közeg telített gáz állapota
<i>be</i>	hőbevezetés esetén
<i>el</i>	hőelvonás esetén
<i>iz</i>	izentropikus
<i>K</i>	kompresszor
<i>max</i>	maximális érték
<i>min</i>	minimális érték
<i>net</i>	nettó
<i>ORC</i>	szerves Rankine-ciklusra vonatkozó értékek
<i>p</i>	szivattyú
<i>T</i>	turbina (vagy expander)
<i>th</i>	termikus

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a fenntarthatóság kiemelkedően fontos társadalmi és szakpolitikai elvárás, mely az energiaszektor elé komoly kihívásokat állít a villamosenergia-termelésben. Ugyanakkor a fenntarthatóság nehezen egyeztethető össze az ellátásbiztonsággal. Ma Magyarországon, mikor az energiatermelő egységek összehangolása és a fogyasztói igények kielégítése jelentős mértékben csak importból fedezhető, szükséges a hazai erőműportfólió bővítése. Cél a fenntartható energiatermelés oly módja, ahol a termelés kiszámítható, az ellátás állandó és a kibocsátás minimális. Az sem hátrányos, amennyiben a termelők elosztottan helyezkednek el a hálózat pontjain. Magyarországon a geotermikus energia kedvező adottságú energiaforrásnak számít a fent felsoroltak alapján, éppen ezért logikus bevonni a villamosenergia-termelésbe. Ugyanakkor a természetes hőforrást elsődlegesen hőigények kielégítésére célszerű és hatékonyabb használni, amennyiben arra van igény. Így tevődik össze a feladat, mely a fogyasztói igényeket is vizsgálva keresi az optimális kapcsolt termelési módot.

Magyarország „geotermikus nagyhatalom”, ennek ellenére elenyésző példa van a hőforrás hasznosítására, ennek megváltoztatás célja jelen kutatásnak is. A villamosenergiát szerves Rankine-cikluson (ORC) alapuló berendezéssel lehet megtermelni, mivel a hagyományos villamosenergia-termelésre alkalmatlan a geotermikus hő a közeg alacsony entalpiája miatt. Az elsődleges tervek alapján számos ilyen berendezést lehetne összekapcsolni, melyek egyben távhőrendszerként is tudnának üzemelni amellet, hogy saját villamos igényükkel párhuzamosan más fogyasztókat is képesek kiszolgálni. Az ily módon megalkotni kívánt rendszer más-más tulajdonsággal rendelkező kutakat tartalmazhat, ami miatt célszerű egy olyan környezet kialakítása, mely a bemeneti paraméterek alapján képes az egyes telephelyekre tervezendő erőművek sajátosságait megbecsülni. Az elemzés kifejezetten Magyarországra vonatkozik, ahol a területi vizsgálatok földtani adatokon, vagyis a termálvíz elérhetőségén, valamint a fogyasztási igényeken alapszanak. Fontos a hő és villamosenergia termelés arányának meghatározása optimumkereséssel, mely az egyes rendszercsoportok esetében eltérően alakulhat. A vizsgálat, valamint számítási metódus elkészítésének célja új geotermikus erőmű telepítésének előkészítése, mely távhőt és villamosenergiát szolgáltat párhuzamos üzemben.

2. ABSTRACT

Nowadays, sustainability is an important societal and policy requirement, which poses serious challenges to the energy sector in the field of electricity generation. Sustainability is difficult to reconcile with security of supply. Today, in Hungary, where the coordination of energy production units and the satisfaction of consumer demand can only be met by imports, it is necessary to expand the domestic power plant portfolio. The aim is to achieve sustainable energy production in a way where production is predictable, supply is stable, and emissions are minimal. Furthermore, it is beneficial that generators are distributed across the grid. In Hungary, geothermal energy is considered a favourable energy source for the above reasons, which is why it is logical to include it in electricity generation. At the same time, however, it is preferable and more efficient to use this natural heat source primarily to meet heating needs, if there is a demand for it. The main task is to find the optimum cogeneration method.

Hungary is a 'geothermal superpower', but there are still only a few examples of the use of this heat source, and this research is also aimed at changing this. Electricity can be generated using equipment based on the organic Rankine-cycle (ORC), as geothermal heat is unsuitable for conventional electricity generation due to the low enthalpy of the fluid. The primary plans are to interconnect several plants, which could also serve as a district heating system, in addition to serving other consumers and their own electricity demand parallelly. The system to be constructed in this way may include wells with different properties, which makes it useful to develop an environment that can estimate the characteristics of the power plants to be designed for each site based on the input parameters. The analysis is specific to Hungary, where spatial studies are based on geological data, i.e. the availability of thermal water and consumption needs. It is important to determine the ratio between heat and electricity production by searching for an optimum, which may vary from one system group to another. The aim of the study and the calculation methodology is to prepare the installation of a new geothermal power plant, which will supply district heat and electricity in parallel.

3. A HŐFORRÁS HASZNOSÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

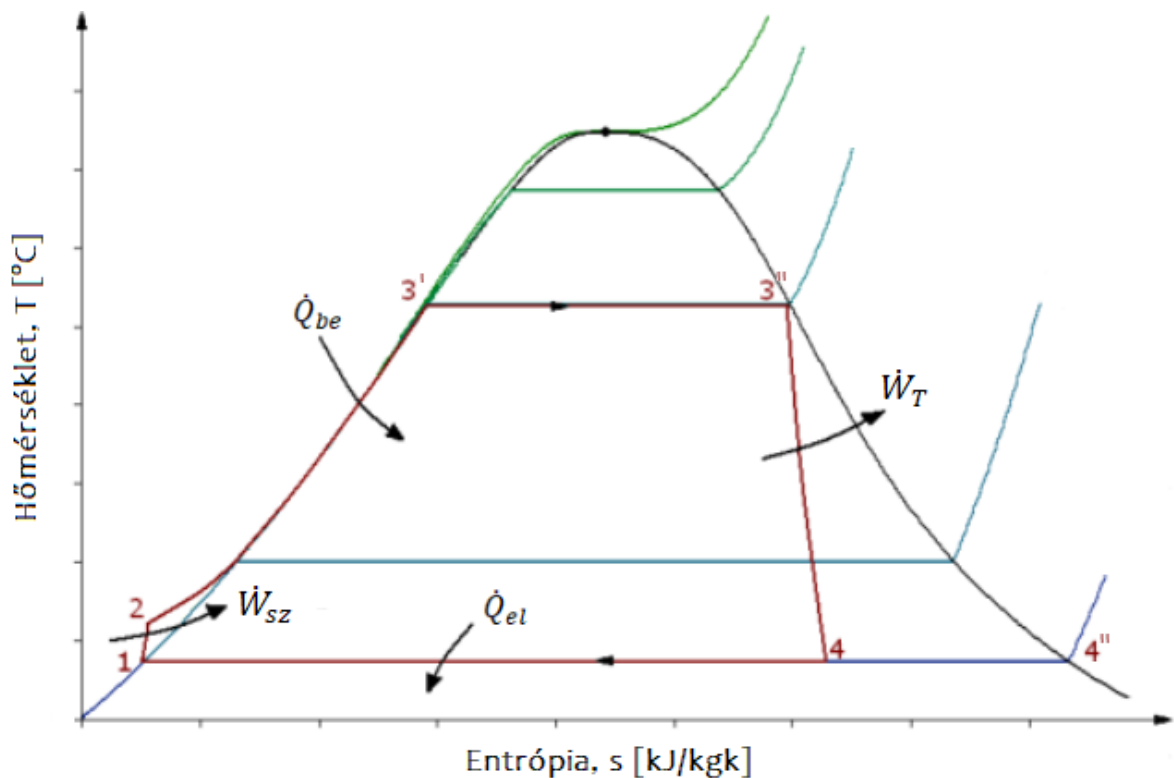
3.1. Villamosenergia-termelés – szerves Rankine-ciklus technológiai bemutatása

A szerves Rankine-körfolyamat (ORC) egy páratlan műszaki megoldás az alacsony és közepes (50–340 °C) hőmérsékletű, korlátozott kapacitású hőforrásokból történő villamos energia előállítására. Ezen alacsony hőmérsékletű és entalpiájú hőforrásokból szerves Rankine-cikluson alapuló erőművekkel lehet átalakítani a hőt villamos energiává. A hő forrása eltérő lehet: előfordulhat geotermikus kútból származó termálvíz, napenergiából származó hő, valamiféle hővisszanyerés alapú hő, akár biomassza, de még hulladékhő is. Ezen hőforrásokat ideális esetben alacsony hőmérsékletű hőt igénylő folyamatokhoz, akár az iparban, de legelterjedtebben távhőként vagy hévizes fürdőkben használják fel. Azonban gyakran az igények nem helyben jelentkeznek vagy a helyi igények kiszolgálásánál jóval nagyobb mennyiségű potenciál áll rendelkezésre. Ez esetben a hőforrást, célszerű úgy átalakítani és olyan terméket létrehozni belőle, amit aztán máshol is fel lehet használni. Energiaátalakítás során a hőből először valamilyen hőerőgéppel mechanikai energiát, majd abból generátorral villamosenergiát állítanak elő, aminek szállításához és kereskedéséhez létező infrastruktúra és piac áll rendelkezésre. Jellemzően a hőforrás minőségileg nem ad lehetőséget a klasszikus Rankine-ciklus használatára, vagyis a geotermikus (vagy más) hő hőmérséklete nem éri el azt a kritikus hőmérsékletet, amivel a célszerű lenne a tradicionális körfolyamatot alkalmazni. Így kerül előtérbe az ORC rendszer, melyben a hagyományos víz-gőz munkaközeg helyett olyan szerves anyagot használnak, melynek forráspontja a víz forráspontja alatt található.

3.1.1. AZ ORC TECHNOLÓGIA FELÉPÍTÉSE

A szerves Rankine-körfolyamat termodinamikai értelemben gyakorlatilag egyenértékű a Rankine-körfolyamattal, vagyis az adiabatikus kompresszió (1-2) után izobár hőbevezetés (2-3), majd adiabatikus expanzió (3-4) és végül izobár hőelvonás (4-1) történik. Emiatt a berendezés legfőbb felépítő elemei is szinte teljesen megegyeznek a hagyományos gőzkörfolyamatok berendezéseivel. Ugyanakkor túlhevítő nem található meg ezen rendszerekben, valamint a

turbinán sincsen megcsapolás. Az utóbbinak az az oka, hogy a munkaközeg jellegéből adódóan nincsen szükség a fajlagos gőztartalom csökkentésére általában, így a teljes tömegáram keresztüláramlik a turbinán, amit ebben az esetben jellemzően expandernek hívunk. Ugyanakkor előmelegítő ebben az esetben is gyakran előfordul, amit gyakran belső hőcserélő beépítésével oldanak meg. A belső hőcserélő a kondenzátor előtt helyezkedik el és akkor alkalmazható, ha az expanzió a száraz (gáz) mezőben ér véget. Ekkor az izobár hűtést a telített gőz fázist egy olyan hőcserélővel oldják meg, ami a kompresszor (szivattyú) utáni előmelegítést végzi, ez a belső hőcserélő.



1. ábra: ORC körfolyamat a T-s diagrammja [1]

Az ORC berendezések alapvetően tehát tartalmaznak egy hőcserélőt, mely általában csökötséges – köpenyes elrendezésű. Ennek feladata a hőforrás hőjének közlése közvetett módon a munkaközeg felé. A frissgőz mindig telített gőz fázisú. A hőcserélő után az expander van kötve, melyen a munkaközeg expandál, létrejön a tengelyteljesítmény amivel a generátort meg lehet forgatni, és ezen keresztül áramot lehet termelni. Ezután a közeget a kondenzátorba kell vezetni, ahol a szerves munkaközeg a hőelvonás hatására cseppfolyós fázisba kerül. A legutolsó, alapvetően szükséges eleme egy ORC-nek a szivattyú, melynek feladata a nyomásnövelés, kondenzációs nyomásról a hőbevezetés nyomására. Ezek mellett egy ilyen rendszert

is számtalan kiegészítéssel, szükség esetén belső hőcserélővel, különböző kapcsolásokkal, biztonsági és a különböző üzemvitel szempontjából fontos berendezéssel lehet felszerelni.

3.1.2. A GEOTERMIKUS ALAPÚ ÁRAMTERMELÉS EGYÉB BERENDEZÉSEI

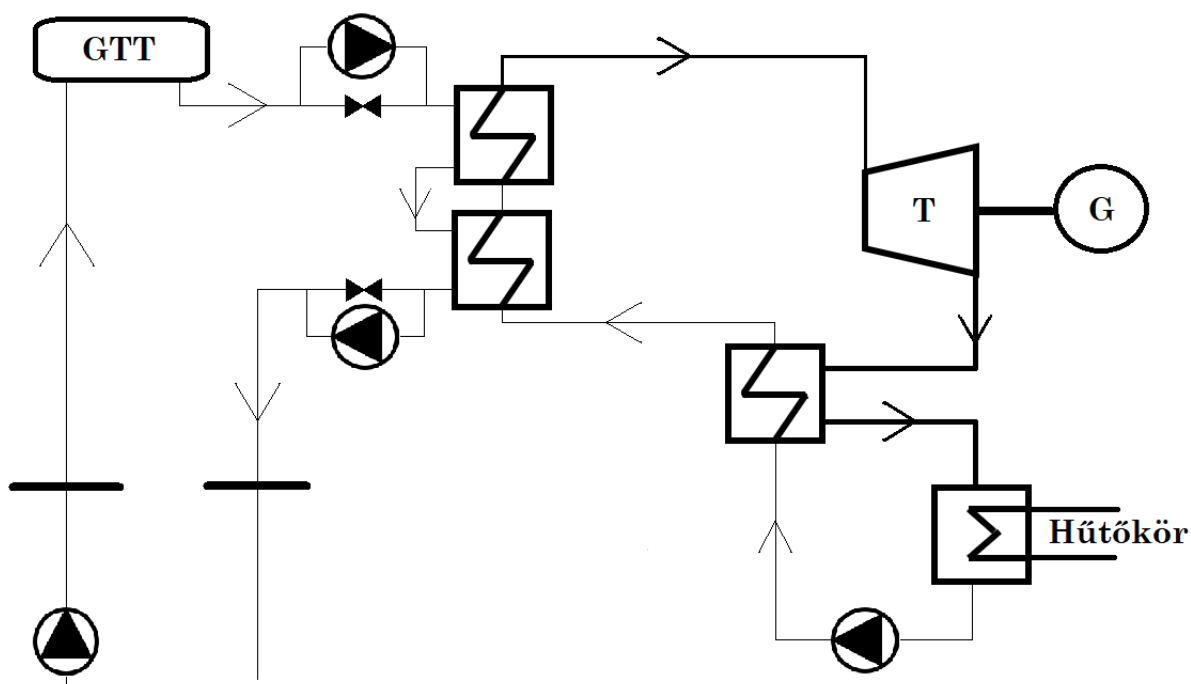
A szerves Rankine-ciklus két különböző hőmérsékletű közeg alkalmazásával képes áramot termelni, de a villamosenergia előállításához további rendszerek elhelyezése is szükségszerű. Ezen rendszereket két részre lehet bontani, egyrészt a hőforrás oldali – vagyis a geotermikus kútra közvetlen épített – rendszer, másrészt pedig a hűtőkör. Ezen felül természetesen a villamos alrendszer, valamint a szabályozási és biztonsági rendszerek.

A geotermikus kút vizét kitermelő szivattyú az egyik, ha nem a legfigyelemigényesebb berendezés mindenféle geotermikus rendszerben. A szivattyút nyomásnövelése hozza a felszínre a hasznosítandó termálvizet, ugyanakkor ez a víz nem tiszta: szennyeződések, gázok találhatók meg benne, ami a berendezést igénybe veszi. Emiatt nagyon fontos megfelelő minőségű szivattyút elhelyezni, hogy az élettartam ne csökkenjen. A szivattyú jellemzően 5-10 éves élettartammal rendelkezik, de a közegtől és a használat módjától nagyon függ a tönkremenetel. Egy-egy geotermikus rendszerben ezen (búvár)szivattyúkat a teljes élettartam alatt többször is cserélni kell. Azért is fontos megfelelően megválasztani ezt a szivattyút, mert jelentős áramfelvétellel rendelkezik, így nagyon fontos a megfelelő munkapontban járni, így ezzel rengeteg energiát megspórolni az évek során.

A víz felszínre hozása után a szennyeződéseket el kell választani, a gázokat le kell választani. Ezen lépés során ügyelni kell, hogy a leválasztott – sokszor üvegházhatású, illetve szennyező hatású – anyagok ne jussanak ki a környezetbe. Miután a gáztalanítás megtörtént, már be lehet vezetni a közeget a hőcserélőbe, ahol immár jó hatékonysággal adható le a hő. A visszasajtolás szintén szivattyúval történik az eredeti kúttól megfelelő távolságra (akár több kilométerre is, de jellemzően 1-2 km elegendő távolság).

A hűtőkör – ahogy a hagyományos erőműveknél, úgy itt is – lehet frissvíz- vagy levegőhűtésű, de akár ezek kombinációja is. A hűtési rendszereknél figyelni kell a környezeti paraméterek határértéken tartására, ezért célszerű egy frissvízhűtést is kiegészíteni levegőhűtésű rendszerrel.

A villamos alrendszer alatt a turbina után következő rendszereket értjük, vagyis ide tartozik a generátor és a hálózati kapcsolódáshoz szükséges minden villamos berendezés.



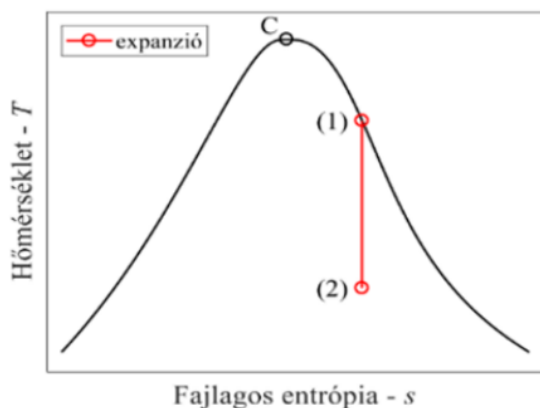
2. ábra: geotermikus forrásra épült ORC kapcsolása (belső hőcserélővel)

3.1.3. MUNKAKÖZEG

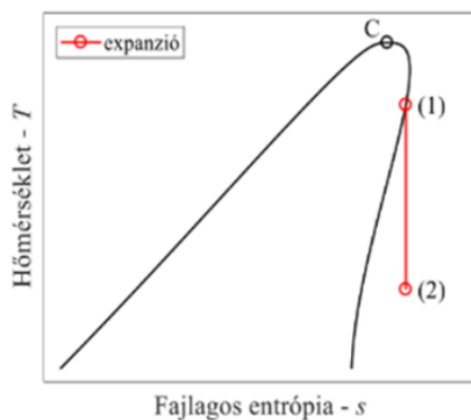
Az ORC elnevezésben a szerves jelző a munkaközeg típusára utal, ami ugyanakkor számos kivívást is jelent, mivel a szerves munkaközégek környezetükre gyakorolt hatása gyakran jelentősen eltér a víz-gőz körfolyamatban megszokottaktól. Ezen anyagok telítési görbéjének jellege nemcsak más alakú – amivel majd a munkaközeg kiválasztásánál lesz részletesen szó –, de ami lehetővé teszi az alacsony hőforrás használatát, az az alacsony elpárolgási hőmérséklet. Ez egy relatív fogalom, hiszen adott nyomáshoz tartozik egy adott szaturációs hőmérséklet. Viszont a víz-gőz munkaközeggel fenntarthatatlanul alacsony nyomáson kellene üzemelnie a rendszernek. A szerves közegeknél is figyelni kell ugyanakkor, hogy a kondenzátor nyomása ne legyen túlságosan alacsony.

A szerves folyadékot úgy választják ki, hogy az – a termodinamikai tulajdonságait tekintve – a lehető legjobban illeszkedjen a hőforráshoz, így mind a ciklus, mind az expander hatékonysága javítható. Ezen munkaközégek legtöbbször igen toxikus tulajdonságokkal rendelkeznek, emiatt szigorú szabályok és biztonsági előírások érvényesek használatukra. Ezenkívül figyelembe kell venni azt is, hogy a leszálló ágbéli adiabata vége belép-e a kétfázisú tartományba (száraz, nedves, vagy izentropikus munkaközeg), mert ekkor a nedvesség apró csep-

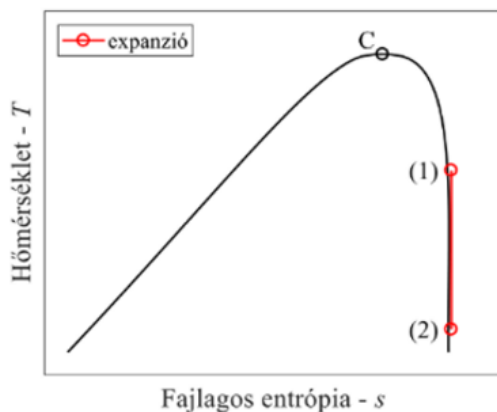
pek formájában jelentkeznek és könnyedén erodálhatja a turbinalapátokat (csepp-erózió). Az adiabatikus szakaszok a T-s diagrammon a következő képen alakulhatnak:



3. ábra: Nedves munkaközeg expanziója [2] [2]



4. ábra: Száraz munkaközeg expanziója [2] [2]



5. ábra: Izentropikus munkaközeg expanziója [2]

Az elmúlt években a Budapesti Műszaki Egyetem néhány kutatója ugyanakkor honosította a munkaközegek újszerű osztályozását, melyben a fázisgöriben elhelyezett karakterisztikus pontok alapján adhatók meg a munkaközegek típusai. Az eddigi 3 karakterisztikus pontot kiegészítették további 2-vel, így ezen pontok entrópiáit sorba téve jóval több fajta közeg állapítható meg. Ezzel a típusú osztályozási rendszerrel – melyet jelen dolgozatban is alkalmaztam – a munkaközeg kiválasztása optimalizálható. [3] Tipikus munkaközegnek számítanak az egyenesláncú alkánok (pl. propán, bután...), valamint a legtöbb hűtőrendszerben alkalmazott közeg is (pl. R134a, R-123).

3.1.4. A MODULÁRIS ORC

Manapság egyre több rendszerrel kapcsolatban lehet hallani moduláris egységek építéséről. Nincs ez másként az ORC-nél sem, hiszen ezen rendszerek gyakran kis teljesítmény leadására képesek, így nem mindig lehet a méretgazdaságossággal javítani a beruházás megtérülését. Ezzel szemben létezik, hogy kisebb egységeket egyben gyártanak le, így a gyártás meggyorsítása mellett, az erőmű összeszerelésekor is csak néhány blokkot kell illeszteni a hőforrásra. A kis beruházás hátránya ugyanakkor, hogy sokszor nagyon eltérő igényekkel találkoznak a fejlesztők. Ilyen kis egységek találhatók Nagyváradon is, ahol az összteljesítmény $50 \text{ kW}_{\text{el}}$, de van tehergépjárműhöz kötött rendszer is.

3.1.5. ÉLETCIKLUS ELEMZÉS (LCA)

Az életciklus elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) egy adott berendezés teljes életútja során felmerülő környezeti hatásokat vizsgálja. Először a berendezéshez szükséges nyersanyagok kitermelését és feldolgozását, a konkrét gyártási folyamatot, a szállítást majd a telepítést, a használatot, végül pedig a leszerelést, melyhez az újrahasznosítás, illetve a hulladék-elhelyezés tartozik. Az elemzés során figyelembe kell venni minden olyan hatást, mellyel a vizsgált berendezés kihat a környezetre.

A vizsgálatot különböző fázisokra szokás bontani, mely jelen esetben az építési fázis, üzemeltetési fázis, leszerelési fázis hármából áll, és ezek további alegységekre bonthatók. Ezen szakaszok elemzését segítik az előre meghatározott mérőszámok, melyek a kritikus területek feltérképezésében és a későbbi technológiai összehasonlításban is segítenek.

Egy 2013-as tanulmányban, melyet pekingi kutatók végeztek az alábbi mérőszámok kerültek meghatározásra az ORC berendezések életciklus elemzése során: [4]

GWP – globális felmelegedési potenciál

AP – savasodási potenciál

EP – eutrofikációs potenciál

HTP – humán toxicitás potenciál

SWP – szilárd hulladék potenciál

SAP – korom és por potenciál

3.1.6. MEGVALÓSULT GEOTERMIKUS PROJEKTEK

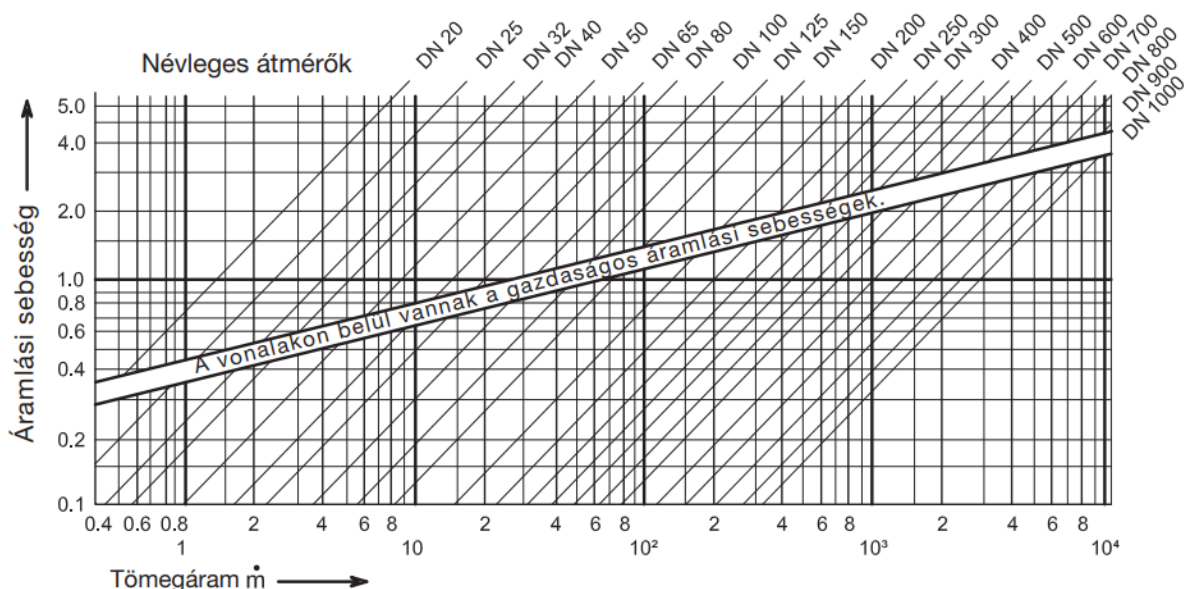
A világ legnagyobb szerves Rankine-ciklusú (ORC) geotermikus erőműve az új-zélandi Ngatamariki, amely 2013 óta működik. A négy párhuzamosan beépített egységet az Ormat gyártotta, és összesen 96 MW elektromos teljesítménnyel rendelkezik. Ugyanakkor jelenleg építés alatt áll az ennél jóval nagyobb beépített teljesítménnyel rendelkező Sarulla, amely Indonéziában található, és ha elkészül, akkor a három egysége összesen 150 MW-ot fog a hálózatra termelni. Ez utóbbi erőművet is a nevadai székhelyű Ormat Technologies Inc. gyártotta, mely nemzetközi cég a világon a legnagyobb geotermikus energiaforrásra épülő ORC berendezéseit tervezi és építi. Ebből világosan látszik, hogy komoly potenciál rejlik a berendezésben, ugyanakkor nem csak hatalmas méretekben, de kisebb egységekben is. Jelenleg Magyarországon mindössze egy ilyen erőmű, a Turai Geotermikus erőmű termel a hálózatra villamosenergiát. Ez az egy egység 3,35 MW_{el} beépített villamos teljesítménnyel rendelkezik, de felmerült már az egység bővítése. [5]

3.2. A hőforrás felhasználása távhőszolgáltatásban, valamint kapcsolt termelés: távhő és villamosenergia párhuzamos szolgáltatása

A geotermikus energia hasznosításának legoptimálisabb módja, amikor a hőt hasznosítják. Ez a hőhasznosítás történhet valamilyen ipari vagy mezőgazdasági folyamatban, hiszen ez esetekben nagy mennyiségű hő szükséges egy helyen. Azonban ahol ilyen alkalmazása nincsen a hőforrásnak, ott a távhőszolgáltatás továbbra is fennmarad, mint opció.

Bevett szokás, hogy geotermikus kutak hőjéhez kapcsolnak különböző technológiákat, de akár szolgáltatásokat is. Ipari folyamatok hőjének biztosítása mellett alkalmas üvegházak fűtésére, de kifejezetten a forrás lokációjához kötődnek például a termálfürdők. Ezek többnyire felemésztik a geotermikus kútból származó víz hőjének nagy részét, de van, hogy kisebb fogyasztói igényeket akarunk kiszolgálni. Ez esetben össze kell szedni a kút környezetében elegendő kisfogyasztót (intézményt, háztartást), amelyre érdemes a rendszert tervezni. Értelemszerűen, ha van kiépített távhőrendszer, akkor az tekinthető egy nagy fogyasztónak abban az értelemben, hogy nem kell a megvalósítás során a hálózat kiépítésével törődni. Ugyanakkor amennyiben a távhőrendszert ki kell építeni, olyankor a beruházás költsége és így a megtérülés ideje jelentősen eltérhet. Ráadásul meg kell állapítani azt az optimális távolságot, ameddig megéri kiépíteni. Ez gyakorlatilag a kút középpontjától vett távolság, mely meghatározza azt a kört, amelyen belül keresni lehet a fogyasztási igényt. Ha nincsen elegendő igény, akkor ér-

demes lehet a villamosenergia-termelés arányát növelni. A távhő kiterjesztése – viszonylag kicsi volumenben – ugyanis nem számít gazdaságosnak. A veszteségek – csősúrlódás, hőveszteség, extra szivattyú – ugyanis nagyon megnövekednek.



6. ábra: csőátmérő megállapítása a tömegáram és az áramlási sebesség grafikonja alapján [6]

A távhőszolgáltatásban úgy kalkuláltam, hogy bármilyen kútról is beszélünk a várható tömegáram igen alacsony lesz, 10-50 liter per másodperc között ingadozhat a térfogatáram. Alább átlagosan 20 l/s térfogatáramos vízhozammal számoltam. A kalkulációt szabvány szerint végeztem, az Isoplus katalógusa alapján. A 20 l/s-hoz rövid számolás után és táblázat segítségével a KRD50 típus lett kiválasztva csővezetéknek, így konkrét típusadatokkal lehet továbbhaladni. Valószínűsíthető, ha nem is ezt a típust választják ki a megvalósításhoz, akkor is közel azonos paramétereket ad a későbbiekhez, esetleges változtatásokhoz. Ahogy az ábrán is látszódik, a választott csőtípus duplacső, szigeteléssel ellátva, mely a tömegáram és az áramlási sebesség alapján lett kiválasztva.



7. ábra: KRD50 csőtípus [6]

A KRD50 típusú csővezeték esetében a belső (előremenő) és külső (környezeti) hőmérsékletek, valamint a hővezetési tényezőből kiszámítható, hogy megközelítőleg 20 W/m hővesztéssel kell számolni, így kilométerenként nem jelentős, mindössze 0,24 °C-os előremenő lehűlés várható. Ráadásul ez a minimális lehűlés visszahat a hővesztésre: kis mértékben tovább csökkenti azt is. Ami ugyanakkor kérdéses és befolyásolja a számítást, hogy a távhő milyen mélyen van földbe ásva, ha egyáltalán van erre lehetőség. Amennyiben nincs beásva, akkor a hővesztések jelentősen növekednek, ugyanakkor a beruházás méretét tekintve nem biztos, hogy megtérül a földbe fektetett távhőhálózat.

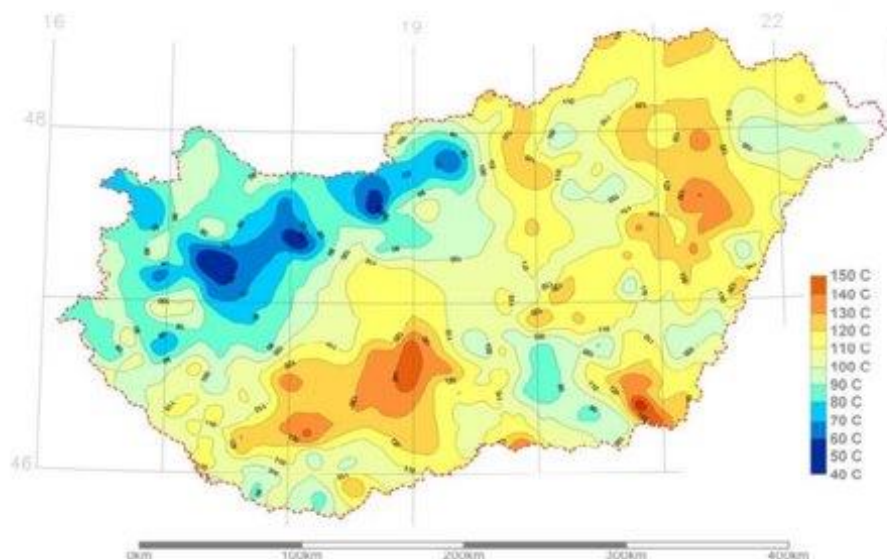
A mechanikai veszteségeket ugyancsak figyelembe kell venni a csőidomok következtében fellépő csősúrlódás miatt. Ez ugyan valamelyest növeli a hőmérsékletet, de a szivattyúzási munkát is. A csősúrlódás a távolság függésében növekszik, illetve szakaszonként – a hőtágulás miatt – kompenzátorokat kell elhelyezni, amelyek további nyomásesést okoznak. A pontos értéket a csősúrlódás okozta veszteségről, illetve az emiatt bekövetkező nyomásesésről csak konkrét helyszíni tervek alapján, a terep ismeretével lehet nyilatkozni. [6]

4. MAGYARORSZÁG GEOTERMIKUS POTENCIÁLJÁNAK VIZSGÁLATA

4.1. Magyarország geológiai adottságai

Rengetegszer lehet hallani, hogy Magyarország geotermikus nagyhatalom, ehhez képest, viszonylag alacsony ennek a potenciálnak a kihasználtsága. A geotermikus kutak szempontjából az egyik legfontosabb paraméter a hőmérsékleti gradiens, a másik pedig a kőzetek típusa, hővezető képessége. A hőmérsékleti gradiens meghatározza, hogy a földben lefele fúrva milyen gyorsan változik a hőmérséklet. A hőmérsékleti gradiens, valamint a kőzet hővezető képességének szorzataként határozható meg a hőáram. Jelentős szerepet tölt be a hőáram a geotermikus rendszereknél, hiszen minél nagyobb, annál kevesebbet kell lefűrni, a kútmélység csökkentésével pedig a költségek is jelentősen csökkenthetők.

A becslések szerint a geotermikus potenciálnak jelenleg mindössze 10%-a van kihasználva Magyarországon. A 2020 januárjában kiadott magyar energiastratégiában szerepelt, hogy a geotermikus energia kiaknázása a geológiai adottságok függvényében megtérülő, versenyképes technológia lehet, ugyanakkor megfelelő ösztönzők szükségesek lehetnek a piac serkentésére, ahogy az a napenergiánál is megfigyelhető volt. [7]



8. ábra: hőmérséklet 2 kilométer mélységben [8]

4.2. A Magyarországon működő és működtetni kívánt magas hőmérsékletű geotermikus rendszerek

Magyarországon jelenleg elenyésző olyan kút ismert, ahol megfelelő minőségi és mennyiségi tulajdonságokkal rendelkező termálvizet termelnek ki. Természetesen ezen kutak számának bővítése fontos és előremutató lenne, hiszen többek között a Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig is kiter a geotermikus energia hasznosítására. Erre az energiafüggettség csökkentése érdekében is nagy szükség volna, kiemelten a 2022 telén kitört, Ukrajnában zajló háború óta. A Zöld Táv hő Program megvalósítása során kitűzték a geotermikus forrás fűtési célú felhasználását a távhőszektor zöldítésére. Emellett kiemelten foglalkoznak az időjárástól független megújuló villamosenergia-termelés keretein belül a geotermikus energiával is. [7]

Jelenleg mindössze a Budapeستől 40 kilométerre lévő Tura városában termelnek villamosenergiát az országos hálózatra. Emellett van néhány nagyobb hozamú és megfelelő hőmérsékletű kút, melyek vizét hőforrásként hasznosítják. Ezen kutak hőteljesítményét, a felszínre hozott víz hőenergiájának időszerinti deriváltját, az ebből kinyert villamos energiát, a kutak vizének hőmérsékletét, valamint a maximális hozamot a lenti táblázatban lehet fellelni. Ezen felül a kutakhoz tartozó rezervoár típusa és a kútmélység is meg lett adva. Értelemszerűen ezen kutak esetében kútpárról lehet beszélni, hiszen visszasajtolás történik.

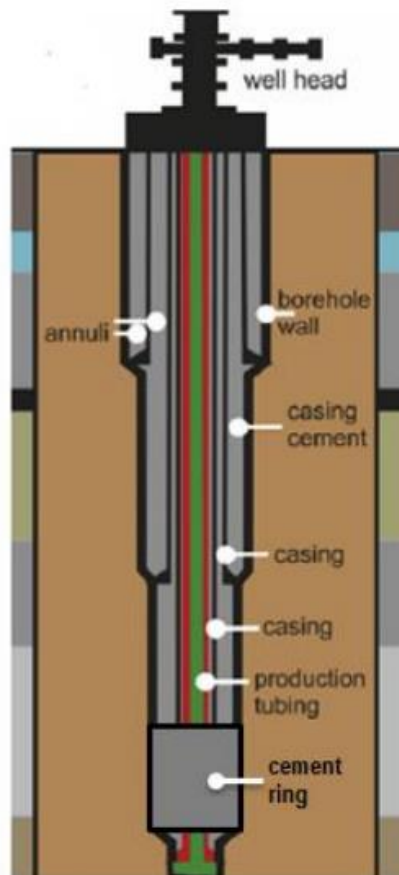
	Tura	Bőny	Miskolc
Víz hőmérséklete [°C]	125	105	105
Max. vízhozam [l/s]	100	150	150
Hőteljesítmény [MW _{th}]	7	52	55
Villamosteljesítmény [MW _{el}]	~3	-	-
Kútmélység [m]	1500-2000	2000-2500	1000-2000
Rezervoár típusa	karbonát	karbonát	karbonát

[9]

4.3. A telephely kiválasztása

A telephely kiválasztásakor az a cél, hogy megtaláljuk az olcsó kitermelési pont és a fogyasztási igények megfelelő optimumát. Vagyis amellet, hogy megfelelőek a körülmények a rendszer telepítésére, a telephely elhelyezkedése a fogyasztási igényeket is vegye figyelembe.

A geotermikus kút kitermelési pontjának meghatározásakor fontos figyelni arra, hogy a kitermelés közelében legyen kereslet a hőre, akár ipari, akár intézményi és lakossági távhőszolgáltatásként. Ugyanakkor mivel villamosenergia is értékesítésre kerül, így fontos, hogy megfelelő hálózati kapcsolódási pont is rendelkezésre álljon. A helyi villamosenergia-igények vizsgálata is fontos, mivel a projekt célja a helyi igények kiszolgálása és akár autonóm rendszer is lehetne így üzemeltetni, ugyanakkor a villamosenergiát nagyobb távolságokra is egyszerűen lehet továbbítani.



9. ábra: Egy geotermikus kúttá utólagosan átalakított kőolajkút sémája [10]

A kitermelés oldaláról történő telephely választásnak alapvetően a kút miatt van jelentősége. A kút fúrásának költségei jelentős szeletét teszik ki egy geotermikus beruházásnak, ezért érdemes lehet meglévő kútban, kútpárban gondolkozni. Van sikeres példa arra, hogy elhagyott olaj- és gázkutakat alakítanak át a föld hőjének kinyerésére. [10]

Amennyiben szükséges a kútfúrás, akkor nagyon fontos földtani adatok és vizsgálatok alapján dönteni, hiszen rengeteg minden múlik a jó helyszínválasztáson. A föld alatti tározókat rezervoároknak nevezik, ezek feltérképezése nagyon fontos, hogy a kút jó helyen találja el a forrását. Ezen vizsgálatokkal elérhető, hogy ne kelljen a szükségesnél mélyebbre lefúrni, valamint a visszasajtolás okozta kihülés mértéke is csökkenthető. Meg kell vizsgálni a közegek típusát, mert az nemcsak a rezervoárról ad fontos jellemzőket, de a kútfúrásakor is nagy jelentősége van, hogy porózus vagy karsztos típus.

A telephely kiválasztásakor érdemes ügyelni arra, hogy a jelenlegi szabályzás szerint a kitermelt vizet hőjének hasznosítása után nem lehet kiengedni a környezetbe, hanem szükséges a visszasajtolás. Erre egy másik kútban kerül sor, hogy a rezervoárba máshol térjen vissza a hidegebb víz, így ne hűtse ki a termelő kút vizét. Ezt a távolságot szintén a földtani vizsgálatok, a rezervoár határozza meg. Lényegében ez azt jelenti, meg kell tudni oldani a felszínen a kitermelt víz eljuttatását a két kút között, biztosítani kell a csővezetékét ahol megteszi ezt a távolságot.

5. A VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS ELŐIRÁNYZATA

5.1. Konceptió

Alapvető felvetés, hogy a párhuzamosan hőt és villamosenergiát termelő rendszert tervezésekor kettő részre lehet elkülöníteni. Jelen fejezet elsősorban a villamos energia termelésére koncentrál. A távhőellátás bevezetésével ugyanis a kisebb hőteljesítmény a tömegáram csökkenésében jelentkezik. Ennek megfelelően ahol lehetett, ott fajlagosított értékek kerültek kiszámításra.

A számolás első felét a FluidProp segítségével végeztem, melyben olyan összehasonlító modell elkészítése volt a cél, ahol a különböző lehetőségek paramétereit könnyen lehet egymáshoz viszonyítani. A bemenő, változtatható paraméterek a geotermikus hőforrás hőmérséklete és a hőelvonó közeg hőmérséklete. Első körben a körfolyamat tömegárama, illetve a hőforrás és hőelvonó közeg anyaga nem lett megadva, illetve kalkulálva, mivel alapvetően a termodinamikai folyamat fajlagos paramétereinek meghatározása volt a cél. Ezen adatok a hőcserélőkben végbemenő hőközlési folyamatokat, így a végső teljesítményt befolyásolják. Mindezek meghatározása azonban csak később, a számolás második felében, a Cycle-Tempo programmal készített modellenél kerül elő. Ugyanakkor már e számítás kialakításánál figyelembe lett véve a kompresszor (szivattyú) és a turbina (expander) hatásfoka, melyek a számolást kis mértékben befolyásolják.

A számolásokban a különböző bemeneti paraméterek alapján összesen 4 típusú telephely került meghatározásra, ugyanakkor ezen értékek változtatásával továbbiak létrehozása lehetséges. Minden telephelyen külön kiszámítható a választott munkaközegre a hősémához szükséges összes paraméter.

A kalkuláció során meghatározott karakterisztikus pontok paramétereinek meghatározása történik első körben. Ezen pontok jellemzően az egyes folyamatok végpontjaihoz, valamint az anyag szaturációs görbéjén jól vizualizálható (10. ábra: bután telítési görbéjére felvett ORC körfolyamat). A (3'') pont gyakorlatban a (3) pontnak felel meg, kitevők használatánál csak 3 pontként lesz hivatkozva. A (3') pont a hőbevezetés azon pontja, ahol az izobár vonal metszi a telítési görbe folyadék felét. A (4'') pont valóságban nem feltétlen része a körfolyamatnak

(csak akkor, ha az expanzió a kétfázisú részben ér véget), de azt a pontot jelöli, ahonnan a hőelvonás indulna, ha pontosan telített gáz fázisvonalról beszélünk e hőelvonás kiindulása-kor.

A karakterisztikus pontok közül ismert fajlagos gőztartalom az (1) és (3') pontokban 0%, a (3'') és a (4'') pontban 100%, míg a (2) pontról azt tudjuk, hogy csak folyadék fázisban van, a (4)-es pont, ha nem esik egybe (4'')-el akkor kétfázisú, vagy túltelített mezőben is lehet a munkaközeg típusától függően.

A hőmérsékleteket a hőelvonás, illetve hőbevezetés esetében a 5 fokos hőfokrést vettem fel alapértelmezetten, vagyis a hűlő és felmelegedő közeg között ekkora a minimális hőmérsékletkülönbség, de ez is egy változtatható paraméter, akár 2 fokos hőrésig is le lehetne menni megfelelő hőcserélő méretezéssel és választással. Ez alapján a geotermikus forrás hőmérséklete és a hőelvonó közeg hőmérséklete alapján meghatározhatóak a körfolyamat egyes pontjainak a hőmérsékletei a (2)-es és a (4)-es pontok kivételével.

5.2. A körfolyamat sarokpontjainak meghatározása

A számolás első lépéseként azoknak a pontoknak a nyomásértékei kerültek meghatározásra, melyek a telítési görbére esnek. Ezek az (1), (3'), (3'') és (4'') pontok, ahol a nyomás értéke a $p(T,q)$ függvény alapján lett meghatározva, vagyis az izotermák és a fázisgörbe alapján – melyen ismert a fajlagos gőztartalom – a két görbe metszése egyértelműen meghatározza az adott pontot. (2) pont nyomásáról tudni lehet, hogy megegyezik a (3') és a (3'') pontok nyomásával, hiszen a hőbevezetés állandó nyomáson, izobár módon történik. Természetesen a hőcserélőben minimális nyomásesés lép fel, de az jelen esetben elhanyagolhatónak tekinthető és majd csak a Cycle-Tempoban végzett körfolyamati szimulációnál lesz számításba véve. A (4) pont nyomását a kondenzátorban és a hőcserélőben szintén állandó nyomású hőelvonás alapján vettem fel, tehát eme pont nyomása az (1) és a (4'')-vel egyezik meg.

Az entalpia és entrópia értékei az (1), (3'), (3'') és (4'') pontokra szintén a hőmérsékletből és a fajlagos gőztartalomból lettek kiszámolva. Mivel a kompresszor (szivattyú) és a turbina (expander) hatásfoka figyelembe lett véve, így a (2) és (4) pontok entalpiájához először a reverzibilis pontok entalpiái – $h_{2,iz}$ és $h_{4,iz}$ – a nyomásból és entrópiából a $h(p,s)$ függvénnyel lettek meghatározva, hogy aztán a gépek hatásfokával korrigálva kijöjjön a valós (irreverzibilis) pontok entalpiája. Ez az alábbi függvények szerint valósult meg:

$$h_2 = \frac{(h_{2,iz} - h_1)}{\eta_K} + h_1 \quad (5.2.1.)$$

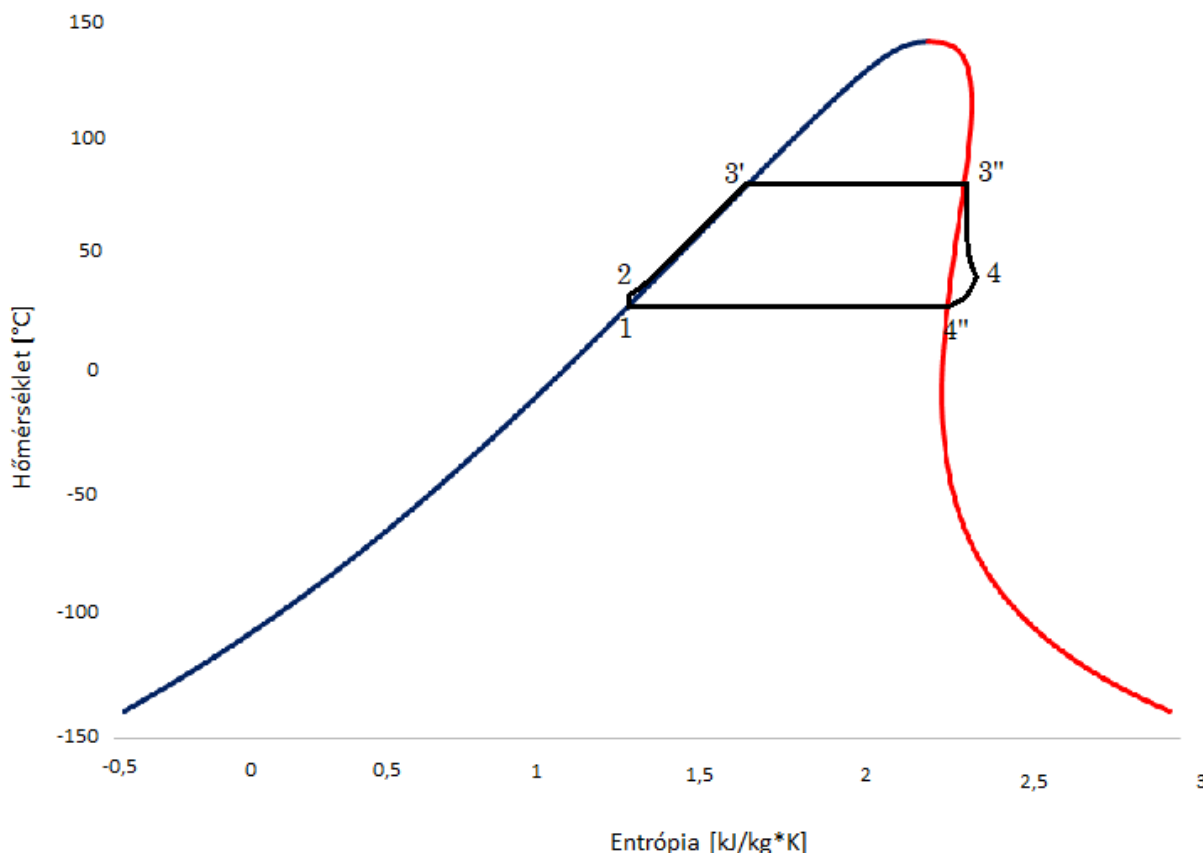
$$h_4 = (h_{4,iz} - h_3) \cdot \eta_T + h_3 \quad (5.2.2.)$$

Miután mindez ki lett számolva – vagyis az (1), (3'), (3'') és (4'') pontokra minden adott, valamint a (2) és (4) pontoknál adott a nyomás és az entalpia – a (2) és (4) pont hőmérsékletét és entrópiáját a nyomásból és az entalpiából ki lehet kalkulálni a T(ph) és s(ph) függvények segítségével.

Minden FluidProp-ban végzett számításhoz a munkaközeg a FreeStanMix-ből lett behívva. A FreeStanMix modell a PRSV állapotegyenletet valósítja meg, amely az egyik legpontosabb köbös állapotegyenlet a nem ideális gázok és folyadékok tulajdonságainak előrejelzésére. A hivatkozott munkaközegeknél különösen jó eredményeket ad a telítettségi tulajdonságok becslésére, továbbá kiemelkedő olyan folyadékok esetében, amelyekre a RefProp nem áll rendelkezésre, mivel a folyadék modellezéséhez csak egyetlen paraméterre van szükség.

Végző soron a (4) pont fajlagos gőztartalma került kiszámításra, az alábbi képlettel:

$$x = \frac{s_4 - s_1}{s_{4''} - s_1} \quad (5.2.3.)$$



10. ábra: bután telítési görbéjére felvett ORC körfolyamat

Természetesen ez csakis, akkor értelmezhető, ha a kétfázisú részben ér véget az expanzió. Erre külön vizsgálat került felállításra számolások során, így ha az expanzió nem a kétfázisú részben ér véget, azt is megjeleníti a program. Ennek előnye, hogy az adott hőmérsékletpár között a használt munkaközeg típusát jelöli. A munkaközeg újraszortírozásával nagy előrelépés történt a közeg optimális kiválasztásához, ezzel ugyanis az adott hőmérséklet-tartományban a használt anyag fázisgörbéjének a karakterisztikáját lehet megjeleníteni. A fázisgörbéhez való közelséget a kétfázisú részben az mutatja meg, mennyire közelít a szám (a fajlagos gőztartalom) a 100%-hoz, míg a gázhalmazállapotban ezt a (4) és a (4'') pontok hőmérsékletének különbsége jelzi. Ez a kettő típus a körfolyamati elemek összeállításánál is fontos lesz, hiszen utóbbi esetben mindenképpen célszerű belső hőcserélőt alkalmazni.

A számolás gyakorlatilag akárhány munkaközegre elvégezhető, a termodinamikai körfolyamat paraméterei és – a munkaközeg újraszortírozásának értelmében – az expanzió jellege alapján kiválasztható a megfelelő munkaközeg. A különböző munkaközegtípusokra kiszámolva megfigyelhető, hogy az adott hőmérsékletpár között a bután száraz, míg a propán

nedvesítő munkaközegként viselkedik, ezért az első esetben belső hőcserélő beépítése szükséges, míg a másodiknál ez elhagyható. [3]

freeStanMix; butane					
	t [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	x [-]
1	35,000	3,287	-349,172	-1,290	0%
2	35,477	11,368	-347,646	-1,290	-
3'	85,000	11,368	-209,727	-0,876	0%
3''	85,000	11,368	76,673	-0,077	100%
4	50,766	3,287	35,422	-0,045	-
4''	35,000	3,287	6,614	-0,136	100%

Ezzel szemben propán alkalmazása esetében ez az extra hőcserélő nem szükséges, mivel az expanzió a kétfázisú részben ér véget, 95%-os telítettséggel.

freeStanMix; Propane					
	t [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	x [-]
1	35,000	12,257	-337,077	-1,528	0%
2	37,425	34,616	-332,049	-1,527	-
3'	85,000	34,616	-150,227	-0,986	0%
3''	85,000	34,616	-0,974	-0,570	100%
4	35,000	12,257	-33,541	-0,543	95%
4''	35,000	12,257	-18,510	-0,494	100%

5.3. Különböző paraméterek telepítések, telephelyek megadása

A számítások kialakításánál figyelembe lett véve, hogy az eredeti projekt célja több kisebb termelőegység összekapcsolása. Ugyanis tervben volt, illetve hosszú távon továbbra is tervezik egy nagyjából 100 MW-os virtuális geotermikus erőmű létrehozását. Éppen ezért nagyon fontos, hogy a különböző erőművekre könnyen kiszámíthatók legyenek a várható termelés paraméterei. Ennek köszönhető az is, hogy könnyen lehet változtatni a pontos kialakítás, a kapcsolás, illetve a hőforrás- valamint a környezeti hőmérsékletek változtatásának függvényében a bemeneti paramétereket. Mint korábban említésre került, alapértelmezetten 4 telephely lett pontos paraméterekkel megadva, melyekből különböző összehasonlítások készültek.

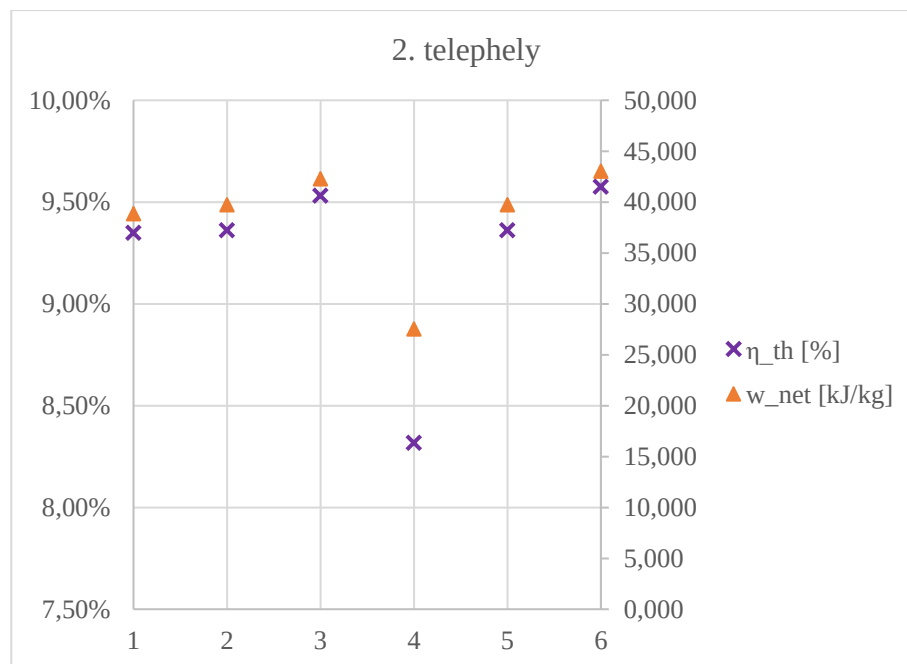
1. telephely						
	w_p [kJ/kg]	w_T [kJ/kg]	w_{net} [kJ/kg]	q_{be} [kJ/kg]	q_{el} [kJ/kg]	η_{th} [-]
Izopentán	1,187	40,047	38,860	415,627	376,767	9,35%
Bután	1,525	41,252	39,726	424,320	384,594	9,36%
Pentán	0,567	42,854	42,287	443,667	401,380	9,53%
Propán	5,028	32,567	27,539	331,075	303,536	8,32%
n-Hexán	0,229	43,260	43,031	449,369	406,338	9,58%

Fontos kiemelni, hogy pontos teljesítmények nem lettek meghatározva ennél a számításnál, mindössze a fajlagos értékek, aminek az az oka, hogy a pontos tömegáram nem csak a telephelyen megtalálható kúton múlik. Eredetileg a tömegáram is bemeneti paraméter lett volna, ugyanakkor azzal, hogy párhuzamos villamosenergia- és távhőszolgáltatást szeretnénk fenntartani, így az üzemviteltől függővé vált a tömegáram, tehát az igények kielégítésére lett optimalizálva a termelés, nem pedig a maximális hatásfokra. Ezek miatt a hőségében a fajlagos értékek használata sokkal célravezetőbb. Fontos, hogy minimális villamosenergiaigény mindig van, mivel ha magas a hőigény, akkor a távhőszolgáltatásban alkalmazott szivattyúk teljesítményfelvétele is magas.

3. telephely						
	w_p [kJ/kg]	w_T [kJ/kg]	w_{net} [kJ/kg]	q_{be} [kJ/kg]	q_{el} [kJ/kg]	η_{th} [-]
Izopentán	1,429	47,212	45,783	431,188	385,405	10,62%
Bután	2,017	48,203	46,186	436,305	390,120	10,59%
Pentán	0,767	50,505	49,738	459,890	410,152	10,82%
Propán	6,514	33,174	26,661	304,865	278,204	8,75%
n-Hexán	0,318	51,128	50,810	467,242	416,432	10,87%

Értelemszerűen az összhatásfok változni fog a pontos tömegáram függvényében, ezért is nagyon fontos, hogy minél inkább rugalmassá lehessen tenni a szabályozást. A komprimálást végző egységet, a szivattyút, valamint az expandert is úgy kell megválasztani, hogy képes legyen a szabályozást lekövetni.

A 2. telephely esetében a különböző munkaközegek használata esetén mutatott várható körfolyamati hatásfok és kinyerhető fajlagos munka látható.

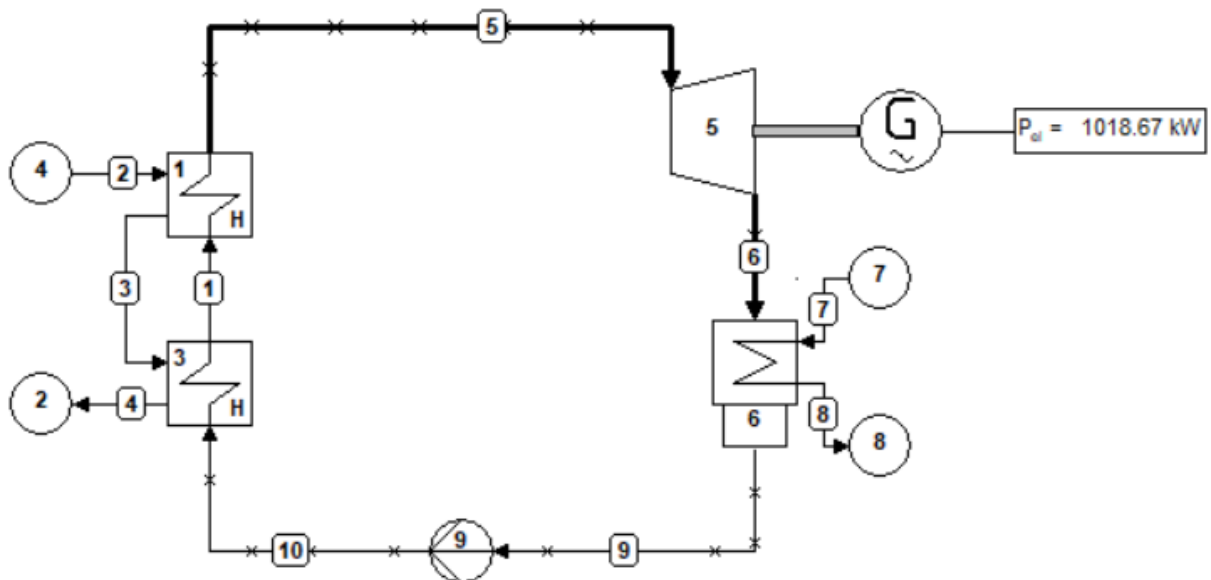


1. diagram: adott telephelyre kiszámított termikus hatásfok teljesítménymaximum

5.4. A modell összeállítása Cycle-Tempo hősémaszámító környezetben

A kiszámolt körfolyamati pontok és az azokból levont következtetések alapján a Cycle-Tempo program alapján lehet összeállítani a megfelelő modellt. Bár a FluidProp-ban végzett számolás célja az összehasonlítás, a modellezés során is lehet a többféle összeállítás tulajdonságaiból fakadó eltéréseket vizsgálni. Ugyanakkor nagy könnyebbséget jelent az modellezésben, hogy ismert a termodinamikai körfolyamat sarokpontjainak, valamint a berendezéseknek közel összes paramétere. Ez segíti a pontos berendezések összetételének meghatározását: az expanzió végpontjának helye szerint szükség van-e belső hőcserélőre vagy más kialakítás is jó. Emellett természetesen az értékek pontosabb bemeneteli adatainak meghatározásában is segíthet, valamint kiemelten az ellenőrzésben, a hibás számítások feltérképezésében.

A lenti modell a 4. telephely paramétereire választott propán munkaközeggel töltött rendszert mutat be. Ez esetben nem szükséges a belső hőcserélő alkalmazása, mivel az expanzió végpontja a kétfázisú mezőben 87%-os fajlagos gőztartalomú. A 4. telephelyre jellemző, hogy 60 literes másodpercenként 100 Celsius fokos termálvíziet használ, és a hőelvonás 10 Celsius fokon történik.



11. ábra: ORC propán munkaközeg alkalmazásával a 4. típusú telephelyre

A fenti példa ugyan csak egy a szimulált kimenetek közül, de az kiköthető, hogy minden egység beépített villamos teljesítménye 1 MW_{el} körüli. A távhőrendszer felállításával a tömeg-

áram megoszlik, így az éppen optimális arányú hő- és villamosenergia-termelési pont megtalálása után a tömegáramot kell szabályozni.

6. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBLÉPÉSI JAVASLATOK

A dolgozat széleskörűen mutatja be a magyarországi geotermikus energiatermelés lehetőségét. Ahhoz, hogy az energiastratégiában megfogalmazott irányokat követni lehessen – már ami a geotermikus energiatermelést illeti – nemcsak a potenciál ismerete szükséges. Ebben a tanulmány olyan irányban igyekszik előre lépni, hogy a további esettanulmányokban használható számítási eljárást dolgozott ki. A széleskörű technológiai elemzés alapvetően a villamos energia termelésére tér ki, a távhőszolgáltatást kevésbé taglalja, ennek, valamint a rendszer kiépítésének költségeit a következő lépésben pontosítani, illetve meghatározni szükséges. A pontos telephelyek meghatározása – a fogyasztói igények figyelembevételével – szakértő csapat kooperációjával történik, így a jelen dolgozat mögött álló projekt remélhetőleg ténylegesen a megvalósulás fázisába kerülhet. A termelés optimalizálása alapvetően a gazdasági környezettől függő, így – amellett, hogy fel kell készülni a várható munkapontokra – logikusabb annak biztosítása, hogy minden helyzetre legyen elképzelés a várható termelés alakulásáról.

Ugyanakkor a dolgozat szempontjából megfogalmazott kiemelkedő fontosságú tényezőket, a villamosenergia termelés módját és a mögötte lévő technológiát lefedte az elemzés, így arra is választ lehet kapni, hogy miért szükséges a termelés meghatározásához több variációval kiszámolni a lehetséges kimeneteleket.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Wikipedia. Rankine cycle - https://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle.
- [2] Imre Attila R. Energiaátalakítási folyamatok: 3. előadás: Körfolyamatok.
- [3] Imre Attila R., Kustán Réka, Groniewsky Axel, *Energies* 12 (10): 2028. Thermodynamic Selection of the Optimal Working Fluid for Organic Rankine Cycles (2019).
- [4] C. Liu et al. "The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment," *Energy*, vol. 56, pp. 144–154, (2013), doi: 10.1016/j.energy.2013.04.045.
- [5] *ORC World Map* [online]. Elérhető: <https://orc-world-map.org/> Utolsó elérés dátuma: 2022.08.09
- [6] *Isoplus. Merve csövek.* [online] Elérhető: https://www.isoplus.hu/fileadmin/data/downloads/documents/hungary/manuals/Merve_csovek.pdf. Utolsó elérés dátuma: 2022.10.09
- [7] Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig* (2020).
- [8] Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont. *Geotermikus villamosenergia-termelés lehetőségei Magyarországon* (2009).
- [9] *Mannvit. Tura – Geotermikus erőmű* [online]. Elérhető: <https://www.mannvit.hu/projektek/tura-geotermikus-eromu/>. Utolsó elérés dátuma: 2022.10.08
- [10] M. Shmeleva. "Geothermal Energy Production from Oil and Gas Wells", M.Sc. thesis KTH School of Industrial Engineering and Management Stockholm. (2018) [online] Elérhető: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1293872/FULLTEXT01.pdf>. Utolsó elérés dátuma: 2022.10.08