



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

MAYER MARTIN JÁNOS

Szerves Rankine-körfolyamat alkalmazási
lehetőségeinek vizsgálata megújuló
energiaforrások és hulladékhő hasznosítására

Konzulens:

Dr. Bihari Péter
egyetemi docens

Budapest, 2014

TARTALOMJEGYZÉK

Összefoglaló.....	3
Abstract.....	5
1. Bevezetés	6
1.1. Szerves Rankine-körfolyamat	6
1.2. Hőforrások.....	10
2. Modellalkotás.....	14
2.1. Szerves Rankine-körfolyamat modellje	15
2.2. Hőforrások modellje.....	20
3. Optimális kialakítás	29
3.1. Optimális elgőzölgetési hőmérséklet meghatározása	31
3.2. Részterheléses üzemvitel.....	34
4. Gazdaságossági szempontok.....	40
5. Szimulációs vizsgálati eredmények.....	48
5.1. Villamosenergia-termelés hatásfoka	48
5.2. Éves energiatermelés számítása	55
5.3. Kapcsolt hőtermelés kialakításának lehetőségei	58
5.4. Energiatárolás lehetősége	63
6. Összefoglalás, következtetések.....	67
Irodalomjegyzék.....	70
Függelék	73
1. Elgőzölgesi nyomás és hatásfok alakulása részterhelésen	73
2. Naphőerőművek hatásfokának változása	80

ÖSSZEFOGLALÓ

A szerves Rankine-körfolyamat (ORC) felépítése a hagyományos víz munkaközegű Rankine-ciklushoz hasonló, a szerves munkaközeg alkalmazása azonban annak eltérő termodinamikai tulajdonságai miatt alacsony hőmérsékletű hőforrások kihasználása esetén nagyobb hatásfokú villamosenergia-termelést és egyszerűbb kialakítást tesz lehetővé. A leggyakoribb hőforrások a napsugárzás, a geotermikus energia és a különféle ipari folyamatokból származó hulladék hő, így az ORC elterjedése a CO₂ mentes energiatermelés előmozdítását szolgálja.

Munkám során általános termodinamikai összefüggésekre alapozott modellt készítettem az ORC működésének leírására, amely megkönnyíti a rendszer jellemzőinek és az energiaátalakítás hatásfokának meghatározását. Bemutattam a különböző hőforrások eltérő jellegzetességeit, és ezek hatását is figyelembe vettem a modellezés során. Napenergia hasznosítás esetén a felhasznált napkollektor, geotermikus esetben a kút kialakítás, hulladék hő esetében pedig a mögöttes ipari folyamat bizonyos esetben igen eltérő lehet, így az elkészített modellnek a különböző kialakítások esetén, széles hőmérséklettartományban működőképesnek kell lennie. A modellek alapján Matlab segítségével szimulációs programot készítettem, amely széleskörű vizsgálatok elvégzését tette lehetővé.

A körfolyamatra és a hőforrásra vonatkozó modellek együttes alkalmazásával lehetőség nyílt a technológia több fontos paraméterének optimalizálására is. Legfontosabb ezek közül a szerves munkaközeg elgőzölgési hőmérséklete, melynek optimális értéke a rendelkezésre álló hőmennyiségtől is függ, így eltérő a rendszer különböző terhelési állapotaiban. Valós kialakítás esetén a rendszer teljesítménye és az elgőzölgés nyomása gazdaságosan nem változtatható egymástól függetlenül, így vizsgáltam azt is, hogy melyik terhelési állapotban célszerű optimális értékre méretezni a teljes működési idő alatt a maximális energiatermelés biztosításához.

A szimuláció segítségével megvizsgáltam a szerves Rankine-ciklust tartalmazó rendszerek hatásfokát is, melynek során az előzőekben meghatározott optimális kialakítást vettem figyelembe. A hatásfok jelentősen eltérő lehet a különböző üzemállapotokban, így a modell bemeneti adatainak a függvényében, többváltozós függvényként ábrázoltam, amely szemléletesen mutatja be a rendszer működését meghatározó legfontosabb tendenciákat. A hőforrás adatait éves szinten leíró adatbázis alapján idősoros adatként a rendszer egy adott időszakban várható teljesítménye is számítható, amely a termelt energia mennyiségének meghatározását is lehetővé teszi. A várható energiatermelés előrejelzése döntő fontosságú a

gazdasági értékelés során, mivel a vizsgált kiserőművek bevételei a termelt energia értékesítéséből származnak.

A dolgozatban a gazdasági számítások elvégzésének módját és a megtérülési időt leginkább befolyásoló tényezőket is bemutattam, amely a technológia műszaki jellemzőinek figyelembevétele mellett megmutatja, mennyire kifizetődő egy adott hőforrás villamosenergia-termelésre történő hasznosítása.

ABSTRACT

The organic Rankine-cycle (ORC) enables the electricity generation based on low temperature heat sources with a relatively good efficiency. The examined heat sources were solar radiation, geothermal heat and waste heat of different industrial processes. Models were created to describe the operation of the thermodynamic cycle and the heat sources and calculate the power, efficiency and other important characteristics of the ORC system. A simulation program performing a wide range of calculations and analyses was created in Matlab.

Based on simulation results the optimal value of the main operating parameters, e.g. the evaporation temperature of the organic working fluid were determined. Considering optimal operating conditions of the system electric power and efficiency of the system were also calculated in many different cases. Annual energy production of the ORC system can be calculated by using annual time series data of the heat source. Since selling energy can be accounted for the incomes of the investment describing energy production is very important in a payback calculation.

Several simple method of payback calculation were presented and main factors affecting the return time are highlighted. The results of the technical analyses supported by the economic considerations show us a comprehensive picture about the feasibility of the ORC systems.

1. BEVEZETÉS

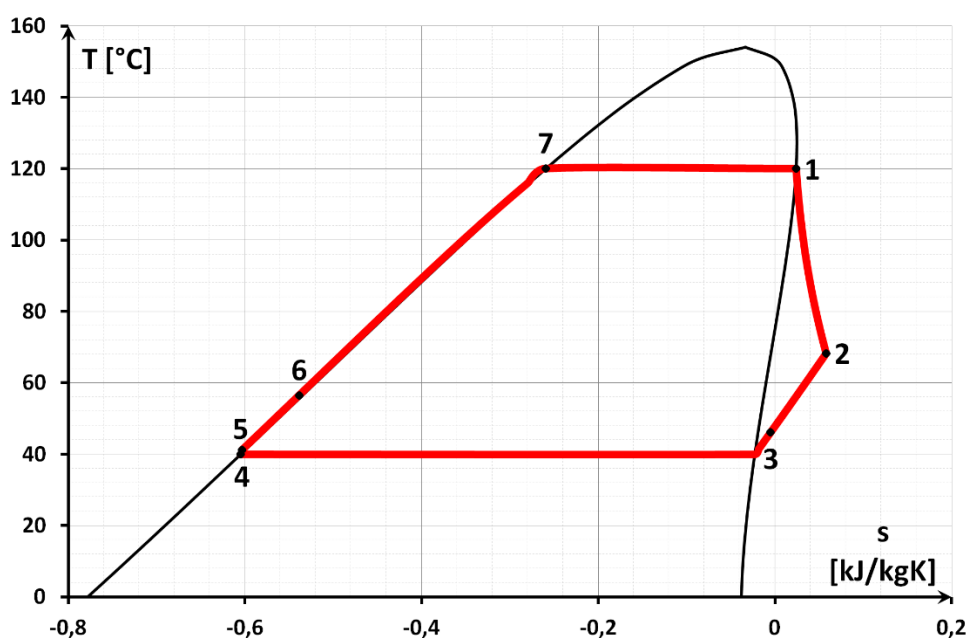
Napjainkban a hagyományos energiaforrások megújulókkal történő kiváltása már politikai szinten is egyre komolyabb célkitűzéssé válik. A fordulat legfőbb okai a fosszilis energiaforrások esetén a csökkenő készletekből fakadó növekvő árak, valamint a klímaváltozást okozó üvegházhatású gázok kibocsátása, a nukleáris energetikában pedig az atomerőművek biztonsági és hulladékkezelési kérdéskörben felmerülő aggályai. A megújuló alapú energiatermelés előmozdítását célozza az Európai Bizottság 20-20-20-as irányelve is, mely 2020-ig az üvegházhatású gáz kibocsátás 20%-os csökkentését, a megújuló részarány teljes energiatermelésen belüli 20%-ra növelését és az energiahatékonyság 20%-os növelését tűzi ki célul [1]. A megújuló hőforrások, és a hasonló kategóriába eső ipari hulladékhő kihasználása során azonban többnyire nem érhetőek el a hagyományos erőművekben megszokott magas hőmérsékletek, így az ezeken alapuló villamosenergia-termeléshez a korábbiaktól eltérő körfolyamatok alkalmazása szükséges. Dolgozatomban ezen alacsony hőmérsékletű hőforrásokból villamos energiát és esetlegesen kapcsoltan hőt előállító kiserőművek megvalósítási lehetőségeinek bemutatása, valamint átfogó műszaki és gazdasági vizsgálata és értékelése a célom.

Alacsony hőmérsékletű hőforrások hasznosítása esetén a Kalina-körfolyamat illetve a szerves Rankine-ciklus (ORC) alkalmazása jobb hatásfok és egyszerűbb kialakítás elérését teszi lehetővé a hagyományos Rankine-körfolyamathoz képest. A Kalina-körfolyamat két komponensű munkaközeget, általában ammónia és víz keveréket használ, amelynek fázisváltozása nem állandó, hanem változó hőmérsékleten történik, amely a kondenzátor és elgőzölögtető hőcserélőkben jobban illeszkedik a fűtő- illetve hűtőközeg általában szintén lineáris hőmérséklet lefutásához, így kedvezőbb hatásfok elérését teszi lehetővé. A kedvező termodinamikai kialakítás ellenére a körfolyamat gyakorlati elterjedését nagymértékben korlátozzák a hozzá kapcsolódó jelentős szabadalmi díjak, melyek igen költségessé teszik a technológia alkalmazását. Dolgozatomban ennek megfelelően a szerves Rankine-körfolyamat vizsgálatára helyezem a hangsúlyt, ahol nem lépnek fel hasonló szabadalmi problémák, így az ilyen rendszerek a gyakorlatban is jóval elterjedtebbek.

1.1. Szerves Rankine-körfolyamat

Az ORC és a hagyományos Rankine-ciklus közti legfontosabb eltérés, hogy előbbi valamilyen szerves anyagot használ munkaközegként a víz helyett. A körfolyamatban alkalmazott szerves

munkaközegek előnye a víznél alacsonyabb kritikus hőmérséklet és nyomás, így az alacsonyabb fázisváltási hőmérsékletek mellett is kedvezőbb nyomásszinteken zajlik a folyamat. Víz munkaközeg alkalmazásának legnagyobb akadálya alacsony frissgőzhőmérséklet esetén a turbinából kilépő gőz jelentős nedvességtartalma miatti erózió és veszteségek jelentkezése, amelyet atomerőművekben is csak hatásfokot csökkentő újrahevítéssel tudnak kezelni. ORC esetén ez a probléma nem jelentkezik a szerves közegek telítési görbéjének eltérő jellege miatt, melyben a telített gőzt jelző szakasz meredeksége pozitív, így egy telített gőz állapotból induló adiabatikus expanzió során a szerves munkaközeg nem a nedves, hanem a túlhevített gőz tartományba kerül. Az 1.1. ábrán egy R245fa (pentafluorpropán) munkaközegű ORC hőmérséklet-entrópia diagramja látható, melyen jól megfigyelhető a fent bemutatott jelenség.

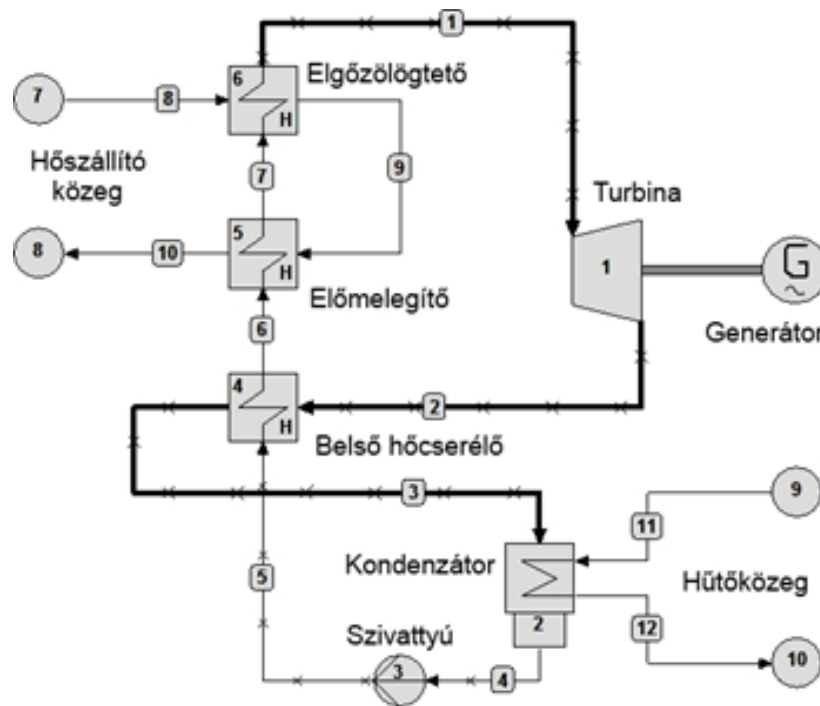


1.1. ábra: Szerves Rankine-körfolyamat jellemző T-s diagramja

A 1.2. ábrán egy szerves Rankine-körfolyamat általános kapcsolási rajza látható, melyen a csövek számozása a fenti T-s diagram sorszámainak felel meg.

A körfolyamat során a munkaközeg valamilyen hőhordozó közeg segítségével egy előmelegítő és előgőzöltető hőcserélőben telített gőz állapotba juttatjuk, amely általában egy kevés fokozatú akciós turbinán expandál. A körfolyamatban jellemzően nem történik túlhevítés, mivel erre a nedves gőz probléma miatt nincs szükség, az alacsony hőmérséklet határok miatt a túlhevítés hőmérséklete eleve korlátozott. Gazdasági szempontból sem indokolt, hiszen a hatásfokot csak kis mértékben javítja, mivel túlhevítés esetén az expanzió végpontja is magasabb hőmérsékletre kerül, a gőz jellemzően kis hőátadási tényezője

miatt viszont jelentős túlhevítő felületet igényel, amely növeli a beruházási költségeket. A turbinából telített gőz lép ki, amelynek a kondenzátornyomáson magasabb a hőmérséklete a kondenzációs hőmérsékletnél, így hőtartalma egy belső hőcserélőben felhasználható a már lekondenzált közeg előmelegítésére, ezáltal javítva a körfolyamat hatásfokát. A szerves anyag a kondenzátorban visszatér folyadék állapotba, majd szivattyú keringteti vissza a kívánt elgőzölgési nyomáson a belső hőcserélőbe, majd előmelegítőbe.



1.2. ábra: Szerves Rankine-körfolyamat kapcsolási rajza

Az alkalmazott szerves munkaközeg megválasztása nagymértékben befolyásolja a körfolyamat jellemzőit, így igen fontos szempont a tervezés során. Lényeges, hogy a munkaközeg hőmérséklete normál üzem mellett a tranziens folyamatok és üzemzavari helyzetek esetében is a megengedhető tartományon belül maradjon, melynek alsó határát a közeg befagyása, felső határát pedig a kémiai stabilitás elvesztése és a közeg bomlása jelenti. ORC folyamatok általában szubkritikus nyomásszinten zajlanak, így olyan szerves közeget kell választani, amelynek kritikus hőmérséklete meghaladja a kívánt elgőzölgési nyomást. A kritikus és az elgőzölgési hőmérséklet viszonya általában befolyásolja az előmelegítéshez és elgőzölgtetéshez szükséges hő arányát is, adott elgőzölgési hőmérséklet mellett a magasabb kritikus értékkel rendelkező közeg esetén nagyobb az állandó hőmérsékletű elgőzölgtetés részaránya. Ez előnyös a körfolyamati hatásfok szempontjából, hiszen magasabb a hőbevitel átlaghőmérséklete, azonban a hőhordozó közeg kisebb mértékű lehűtését teszi lehetővé, így csökkentve a belőle kinyert energiát. Gyakorlati alkalmazásokban a rendelkezésre álló hő minél

nagyobb mértékű hasznosítása a fontosabb szempont, azért általában olyan munkaközeget választanak, amelynek kritikus hőmérséklete csak kicsivel magasabb a tervezett elgőzölgési hőmérsékletnél.

A munkaközeg választás során figyelembe kell venni annak különböző anyagjellemzőit is: a nagy fajhő, párolgáshő és sűrűség csökkenti a szükséges közeg fajlagos mennyiségét, míg a nagy hővezetési tényező azonos körülmények mellett magasabb hőátadási tényezőt és kisebb hőcserélő felületet jelent. A munkaközeg környezeti hatásainak értékelésére a hűtőgépeknél és hőszivattyúknál szokványos mérőszámok, az ózon lebontó képesség (ODP – Ozone Depletion Potential) illetve a globális felmelegedésre gyakorolt hatás (GWP – Global Warming Potential) használatosak, bár a környezeti hatások zárt rendszer esetében csak annak sérülése vagy szivárgás esetén érvényesülnek. Mindezek mellett a biztonságra is ügyelni kell, a munkaközeg ne legyen túlzottan mérgező és gyúlékony. A gyakorlatban legnagyobb arányban használt munkaközeg az R245fa jelű pentafluorpropán, amely 154 °C kritikus hőmérsékletével a legtöbb kis hőmérsékletű hőforrás alkalmazása esetén megfelelő [2]. Az 1.1. táblázat összefoglalja az általam vizsgált fontosabb, ORC rendszerekben jól használható munkaközégeket, feltüntetve azok kritikus pontra vonatkozó hőmérsékletét és nyomását is. A szerves közegeket kritikus hőmérséklet szerint rendeztem növekvő sorrendbe, hiszen a választás során ez használható kezdeti támpontként.

1.1. táblázat: Vizsgált ORC munkaközégek

Szerves Rankine-körfolyamat lehetséges munkaközégei				
Jelölés	Név	Összetétel	Kritikus	
			Hőmérséklet	Nyomás
R125	Pentafluoretán	C_2HF_5	66,25 °C	36,3 bar
R22	Klór-difluor-metán	$CHClF_2$	96,05 °C	49,8 bar
-	Propán	C_3H_8	96,67 °C	42,5 bar
R245fa	Pentafluorpropán	$C_3H_3F_5$	154,05 °C	36,4 bar
-	Pentán	C_5H_{12}	196,55 °C	33,7 bar
-	Aceton	C_3H_6O	234,95 °C	47,0 bar
PP5	Perfluordekalin	$C_{10}F_{18}$	291,85 °C	17,9 bar
-	Oktán	C_8H_{18}	295,61 °C	24,9 bar
-	Toluol	C_7H_8	318,65 °C	41,1 bar

1.2. Hőforrások

A termodinamikai körfolyamatok hatásfoka alapvetően függ a hőközlés és hőelvonás hőmérsékletétől, adott hőmérséklet határok közt elérhető legnagyobb hatásfokot a Carnot-körfolyamat hatásfoka jelenti:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{el}}{T_{be}} \quad (1.1)$$

A Carnot-körfolyamat nem valósítható meg, így az (1.1) szerinti hatásfok az adott határok közt elérhető maximum, melynél a megvalósított körfolyamat hatásfoka mindig alacsonyabb. A szerves Rankine-körfolyamat alacsony hőmérsékleten jelentkező kedvező hatásfoka tehát csak egy viszonylagosan jó hatásfokot jelent, amely megközelíti az adott hőmérsékleteken elérhető elméleti határt, a hagyományos erőművekben megszokott magas hőmérsékletű körfolyamatok hatásfokától mégis messze elmarad. Az alacsony hatásfok miatt csak olyan hőforrások hasznosíthatóak gazdaságosan, amelyek olcsón, alacsony változó költséggel állnak rendelkezésre. Az ORC rendszerekhez a gyártók általánosan a napenergia, a geotermikus energia, az ipari hulladékhő és a biomassa alapú hőforrások használatát javasolják [3].

A napsugárzás villamosenergia-termelésre történő hasznosításának két alapvető módja van, a közvetlen energiaátalakítás napelemek segítségével, illetve a közvetett energiaátalakítás naphőerőművekben. A két módszer közül a napelemes az elterjedtebb, a világszinten létesített napelemes rendszerek összesített beépített kapacitása közel egy évtizedes dinamikus fejlődést követően 2013 végére meghaladta a 138 GW-ot [4]. A nagy teljesítményű naphőerőművekben a napsugárzás koncentrálásával biztosítják a jobb hatásfok eléréséhez szükséges magasabb hőmérsékletet, erre utal a technológia elterjedt rövidítése is: CSP (Concentrated Solar Power). A CSP erőműveknek négy alapvető típusa különíthető el: a parabolavályús kollektort, lineáris Fresnel-tükrös kollektort használó rendszerek, a naptornyok és a naptányérok [5], melyek együttes beépített teljesítménye 2013 elején világszinten 2500 MW-ot tett ki [6], és a növekedés napjainkban is töretlenül folytatódik [7]. A nagy teljesítményű, koncentrátoros naperőművek gyakran elég magas hőmérsékleten működnek ahhoz, hogy víz munkaközegű Rankine-ciklus is alkalmazható legyen, azonban kisebb egység teljesítmény vagy koncentrátor nélküli napkollektor alkalmazása esetén egyértelműen ORC-re van szükség.

A napsugárzás hővé alakítására szolgáló napkollektoroknak több különböző típusa ismert, melyek különböző hőmérsékletek elérését teszik lehetővé. Nem koncentrátoros kollektorok közül az elérhető maximális hőmérséklet szerint növekvő sorrendben a síkkollektort, a vákuumsöves kollektort és a vákuumos síkkollektort vizsgáltam, míg a koncentrátoros

kollektorok közül a parabolavályús kollektort. A koncentrátoros kollektorok használatával az alacsonyabb hőveszteségek miatt jóval magasabb hőmérséklet érhető el, azonban ezek csak a direkt napsugárzás hasznosítására képesek, mivel a tükrök csak egy meghatározott irányból érkező fény fókuszálására képesek. A napkollektoros hőforrás fontos jellegzetessége, hogy a napsugárzás változását követve a rendelkezésre álló hő mennyisége is folyamatosan változik, így az ORC rendszernek is az éjszakai teljes leállás és egy nappali maximális teljesítmény közt kell napi szinten ingadoznia. Hőtároló alkalmazásával, vagy más hőforrást is hasznosító kombinált rendszerek esetén ez ingadozó üzemállapot csökkenthető vagy akár teljesen megszüntethető, ez azonban többletköltséget jelent a létesítés során.

A geotermikus energia hasznosítása szempontjából a kutak két legfontosabb jellemzője a felszínre jövő fluidum hőmérséklete és tömegárama. Alacsony hőmérsékletű kutak esetén a hőtermelés az elterjedtebb megoldás, a villamosenergia-termelés magasabb hőmérsékletek esetén válik egyre gazdaságosabbá. Magyarországon több példa is van geotermikus hőforráson alapuló távhőrendszerekre, és bár több kutatás folyik villamosenergia-termelés megvalósítására is, működő kiserőműről még nincs tudomásom. Gazdaságossági szempontból fontos kérdés, hogy a beruházás során egy meglévő kutat tudunk-e hasznosítani, hiszen új kút fűrése jelentősen megnöveli a beruházási költségeket. A kitermelt földgázmezőkön, főként az Alföld déli területén számos geotermikus hőforrásként felhasználható kút található, ám ezek elhelyezkedése adott, amit figyelembe kell venni hasznosítási lehetőségek mérlegelése során. Hőellátásra történő felhasználáshoz megfelelő mennyiségű hőigényre van szükség a kút közelében, míg a villamosenergia-termelés lakott területektől távoli kutaknál is megvalósítható.

A geotermikus kutak kialakítása és a villamosenergia-termelési módok is igen eltérőek lehetnek. Bizonyos kutak esetében a geotermikus fluidum magától a felszínre tör, ennek hiányában a felszínről kell folyadékot juttatni a kútba, amely felmelegedve tér vissza a felszínre, az ilyen megoldásokat nevezzük EGS (enhanced geothermal system) rendszereknek [8]. A kút kiapadásának elkerülésére, annak érdekében, hogy a hőforrás ténylegesen megújuló legyen, minden esetben szükség van a felszínre jutó fluidum visszasajtolására, amely jelentős villamosenergia-igénye miatt nagyban hozzájárul a kiserőmű önfogyasztásához. Elterjedt kialakítás az olyan két kutas rendszer, amelyben a visszasajtoló kútban föld alá juttatott fluidum a kőzetek repedéseiben áramolva és felmelegedve jut el a távolabb elhelyezkedő termelőkútig, melyen keresztül a felszínre érkezik. Ilyen rendszerekben gyakori megoldás a rétegrepesztés, amellyel a fluidum és a kőzetek közti hőátadó felület, így a kinyert hő mennyisége jelentősen megnövelhető. A kutak optimális kialakítása nagyrészt földtani és földtudományi kérdés, így

dolgozatomban ennek vizsgálatába nem mélyedek bele, hanem a felszíni energiaátalakító rendszer vizsgálatát végzem el. A felszíni rendszer szempontjából a legfontosabb paraméterek a felszínre érkező fluidum tömegárama és hőmérséklete.

A felszíni villamosenergia-termelő technológia megvalósítására is több lehetőség van, melyek alkalmazhatósága alapvetően a kút hőmérsékletétől illetve entalpiájától függ. Legegyszerűbben a legmagasabb entalpiájú kutak hasznosíthatók, melyekből száraz gőz tör a felszínre, ami esetleges tisztítás után közvetlenül a turbinára vezethető. Alacsonyabb entalpia esetén a fluidum fojtás után nedves gőzként érkezik a felszínre, melynek folyadéktartalmát szeparátorral leválasztják, majd a telített gőzt juttatják a turbinára (single flash rendszer). Ennek továbbfejlesztett, jobb hatásfokú változata a double flash rendszer, melyben a leválasztott folyadékot újabb fojtással alacsonyabb nyomáson ismét nedves gőz állapotba juttatják, melyből egy második szeparátorral további száraz gőz választható le. A fenti megoldásokkal magasabb hatásfokú villamosenergia-termelés valósítható meg az ORC rendszerekhez képest, ám a hazai adottságok nem teszik lehetővé ilyen magas hőmérsékletű kutak gazdaságos kialakítását. A hazai alacsonyabb hőmérsékletű kutakból a fluidum folyadék formában jön a felszínre, majd hőcserélőben adja át hőtartalmát a szerves Rankine-körfolyamat munkaközegének (kétkörös rendszer, binary plant), dolgozatomban az ilyen rendszerek részletes vizsgálatát végzem el.

A geotermikus hőforrások jellemzője a napenergiával szemben, hogy a kutak működése, tehát a felszínre érkező fluidum hőmérséklete és tömegárama az időjárástól függetlenül, egész évben közel állandó, így az ezekre települő ORC rendszer is folyamatosan állandósult állapotban működhet. A körfolyamatban a hőelvonás természetesen ezekben az esetekben is víz vagy levegő segítségével történik, melynek hőmérséklete főként léghűtés esetében napi és éves szinten is ingadozik, így változó kondenzátor nyomást eredményez, ennek azonban jóval kisebb hatása van a körfolyamat üzemére nézve a bevitt hő mennyiségének ingadozásánál.

Az ipari hulladékhő különféle ipari folyamatok során keletkező magasabb hőmérsékletű anyagáramokat jelent, amelyek hőtartalmának az ipari művelet szempontjából már nincs szerepe. Jó például szolgálnak erre a finomítóknál magas hőmérsékleten keletkező termékek, melyek hőtartalmára a tárolás és értékesítés során már nincs szükség. A hulladékhő hasznosítása során minden esetben mérlegelni kell, hogy az adott hőmennyiség nem használható-e fel egy másik anyagáram egyébként is szükséges előmelegítésére, mert az ilyen módszerrel elérhető tüzelőanyag megtakarítás gazdasági szempontból általában kedvezőbb a villamosenergia-termelés megvalósításánál.

A hulladékhőforrások esetén a hőhordozó közeg tömegárama és hőmérséklete a mögöttes ipari folyamat működésétől függ. A jelentős hulladékhőt előállító technológiai folyamatok általában folyamatos üzemben, állandó, szabályozott paraméterekkel üzemelnek, így a rendelkezésre álló hő mennyisége is állandó, az ORC rendszer a geotermikus hőforráshoz hasonlóan itt is állandósult állapotban működhet. Fontos eltérés azonban a geotermikus hőforrásokhoz képest, hogy itt egyrészt nincs szükség a közeg jelentős önfogyasztást okozó visszasajtolására, valamint a hűtés megoldása is egyszerűbb, mivel az ipari folyamathoz a legtöbb esetben már tartozik valamilyen hűtőrendszer.

A biomassa ORC rendszerben történő hasznosítását alapvetően korlátozza, hogy a tüzelőanyag általában nem elhanyagolható költsége miatt nem érvényesül az a bevezetőben említett feltétel, miszerint a hőforrásnak alacsony változó költséggel kell rendelkezésre állnia. Az alacsony hatásfok miatt a biomassa alapon termelt villamos energia változó költségéből származó egységtartaléka általában jóval magasabb, mint más erőművek esetében, így a legkisebb változó költség elve alapján a hálózatra csatlakozó kiserőműnek általában nem érdemes termelnie. A biomassa tüzelőanyagok égetése során általában a víz munkaközegű Rankine-körfolyamat alkalmazásához elegendően magas hőmérséklet is elérhető, amely a szélesebb hőmérséklet határok miatt jobb hatásfokú energiatermelést tesz lehetővé az ORC rendszerekhez képest.

Szerves Rankine-körfolyamat alkalmazása tisztán biomassa hőforrás esetén ennek megfelelően akkor indokolt, ha a gyenge minőségű, mezőgazdasági hulladékból származó tüzelőanyag csak alacsony égési hőmérsékletet tesz lehetővé, valamint ennek megfelelően az ára is kellően olcsó. Másik lehetséges alkalmazási terület szigetüzemű rendszer esetében lehet, ahol hálózati csatlakozás hiányában a kiserőmű működése szempontjából lényegtelen a villamos energia piaci ára, valamint a kis teljesítmény nem teszi gazdaságossá egy hagyományos Rankine-ciklus létesítését. A biomassa kiegészítő hőforrásként történő alkalmazása szintén gazdaságos lehet, főként napenergia hasznosítása mellett a kiserőmű alacsony rendelkezésre állásának javítása érdekében. A dolgozatomban ennek megfelelően nem foglalkozom tisztán biomasszán alapuló ORC rendszerekkel, azonban a kiegészítő hőforrásként történő hasznosításának lehetőségét mindig szem előtt tartom.

2. MODELLALKOTÁS

A szerves Rankine-körfolyamat elterjedése napjainkban zajlik, Magyarországon még nem áll rendelkezésre ilyen rendszer, mely lehetővé tenné, hogy méréseket és kísérleteket végezhessünk rajta. A technológia vizsgálatának a hazai lehetőségek közt legcélravezetőbb módja a rendszert leíró modelleken alapuló számítógépes szimulációs elemzések készítése. A modell feladata a rendszer leíró paraméterek ismeretében meghatározni a bemeneti és kimeneti adatok közti kapcsolatot, melyek megválasztása fontos feladat a modellezés során. A modell kimenetei azok a jellemzők, amelyekre a vizsgálatok során kíváncsiak vagyunk, ez általában a kiserőmű által előállított villamos teljesítmény, az energiaátalakítás hatásfoka, kapcsolt energiatermelés esetén a kiadott hőteljesítmény, valamint hosszabb távú vizsgálatoknál az ezek integráljaként számítható energia mennyisége. Bemeneti adat lehet minden olyan fizikai jellemző, amely a vizsgált kimenetek értékét befolyásolja, általában azonban csak azokat érdemes figyelembe venni, amelyek a legnagyobb hatást gyakorolják az eredményekre. Mindenképpen célszerű az olyan bemenetek elhanyagolása, amelyek vagy nem ismertek és nem is mérhetőek kellő pontossággal, vagy az eredményekre gyakorolt hatásukhoz mérten a modell túlzott elbonyolítását okozná a figyelembe vételük. A rendszert leíró paraméterek közé tartoznak az egyes berendezések jellemzői, melyek állandóak vagy valamilyen egyszerű, ismert összefüggés szerint változnak az egyes üzemállapotokban. Több adat felhasználásával pontosabb modell készíthető, azonban így a kapott eredmények érvényességi köre is csökken, az eredmények csak egy adott jól definiált rendszerre vonatkoznak, és nem terjeszthetők ki általánosabb esetekre.

Összetett és bonyolult modellek pontosabb eredményekhez vezetnek, azonban ezzel párhuzamosan növekszik a szimuláció elvégzésének számításigénye is, amely a program futásidejének növekedését is jelenti. A mai modern, nagy teljesítményű számítógépek már jóval több lehetőséget kínálnak a néhány évtizeddel korábbi helyzethez képest, azonban bizonyos bonyolult, numerikus és iterációs számítást is igénylő modellek esetében még manapság is könnyen szembesülhetünk a számítás túlzott időidényének problémájával. A modellalkotás bemutatott összetett szempontrendszerének megfelelően dolgozatomban én sem a legpontosabb, hanem a lehetőség szerint egyszerűbb, de céljaimnak megfelelő pontosságú modellek létrehozására törekedtem. Mivel a vizsgálatokat nem egy konkrét, megvalósult, vagy megvalósítani tervezett rendszerre végzem, hanem a technológiai lehetőségeinek általános felmérése a célom, a kiserőművek minél kevesebb paraméterrel történő leírására törekedtem. A

következő fejezetekben bemutatom azokat az alapvető módszereket és összefüggéseket, amelyek segítségével a rendszer egyes elemeinek modelljét elkészítettem, valamint a bemenetnek és kimenetnek választott adatokat és a szükséges leíró paramétereket. Az energiaátalakító rendszer működését az ORC körfolyamat modellje írja le, mely minden vizsgált esetben azonos, míg a hőforrások modellje a körfolyamati modell bemenő adatainak számítására szolgál a hőforrással kapcsolatban rendelkezésre álló adatok alapján, és természetesen eltérő felépítésű a különböző hőforrások esetén.

2.1. Szerves Rankine-körfolyamat modellje

A szerves Rankine-körfolyamat modelljének elkészítésénél a korábban bemutatott, 1.2. ábra szerinti kialakítást vettem figyelembe. A modellt Cycle-Tempo, Excel valamint Matlab segítségével is elkészítettem, mivel az egyes programok használatának eltérő előnyei és hátrányai jelentkeztek a számítások elvégzése során. Az elkészített modell felépítése, a felhasznált feltételezések és közelítések, a bemenő adatok valamint a berendezéseket leíró paraméterek mindhárom esetben azonosak voltak, így elsőként ezeket mutatom be.

A körfolyamat modelljének legfontosabb bemenő adatai a munkaközeg neve, tömegárama, valamint az elgőzölögtetési és a kondenzátornyomás. A nyomásértékek helyett az elgőzölögtetés és a kondenzáció hőmérséklete is megadható, hiszen a telített folyadék állapot miatt a nyomás- és hőmérsékletértékek közt egyértelmű kapcsolat áll fenn. A legtöbb esetben célszerűbb a hőmérsékletek használata, mivel a hőforrás és a környezet adatai alapján ezek határozhatóak meg közvetlenül, valamint az elérhető hatásfokot is a hőmérséklethatárok befolyásolják, míg a nyomásértékek a viszonylag ismeretlen szerves munkaközegek esetén kevés praktikus információt hordoznak. A tömegáram helyett bármilyen más extenzív állapotjelző is megadható, mely általában a körfolyamatba bevitt hőteljesítmény vagy a kívánt villamos teljesítmény. Amennyiben a körfolyamatban túlhevítés is történik, akkor további adatként a túlhevítés mértékét vagy a frissgőz hőmérsékletét is meg kell adni, ezek hiányában a modell telített frissgőz paraméterekkel számol.

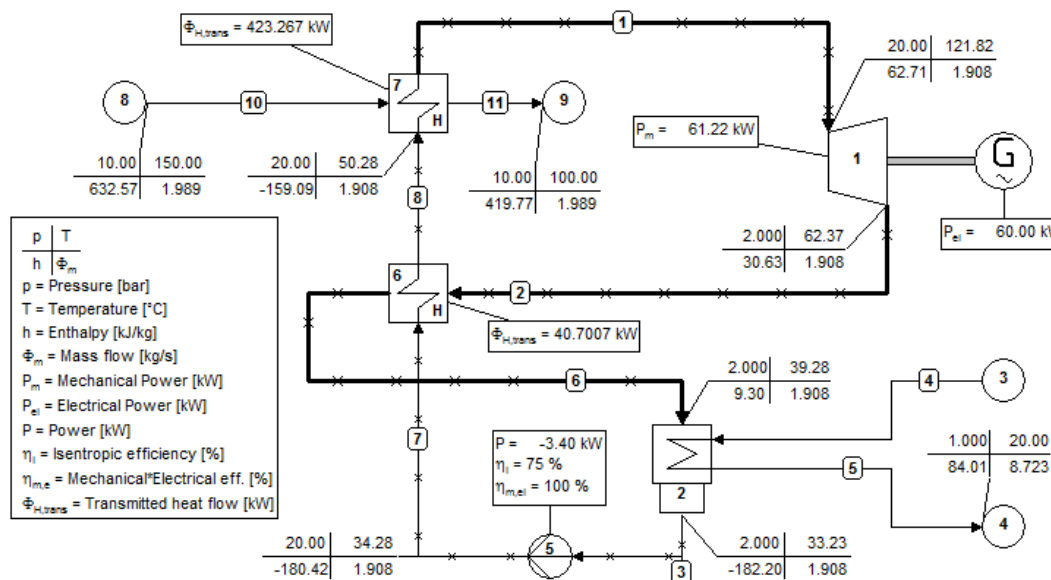
A modell számításai a körfolyamat számos fontos paraméterét meghatározzák, ezek önkényesen meghatározott része képzí a modell kimenő adatait, ahol a fő kiválasztási szempont az, hogy mire vagyunk kíváncsiak a vizsgálat eredményeként, így ezek köre a vizsgálatok jellegétől függően eltér. Jellemző kimenő adatok a villamos teljesítmény, az energiaátalakítás hatásfoka és a leadott hőteljesítmény, amely fontos a hűtőközeg mennyiségének meghatározásához illetve ellennyomású kapcsolt hőtermelés esetén a kiadott hőteljesítményt

jelenti. A hatásfok általában a különböző lehetőségek és üzemállapotok összehasonlítására szolgál, míg a teljesítmény integráljaként az adott idő alatt megtermelt energia számítható.

A rendszert leírok paramétereket illetően minél kevesebb adat használatára törekedtem, hogy az eredmények ne csak egy részletekig pontosan definiált rendszerre legyenek érvényesek, hanem bizonyos határok között általánosan kiterjeszthetők legyenek. A számításához szükséges paraméterek a forgógépek, tehát a turbina, a generátor és a szivattyú hatásfokai, valamint a hőcserélőkben szükséges minimális hőfokrések értéke. A hőcserélők hőmérsékletviszonyainak leírása hatásosság segítségével is történhet, azonban az ORC esetén gyakran előforduló alacsony hőmérsékletkülönbségek esetén egy állandó értékre választott hatásosság sok esetben megengedhetetlenül alacsony hőfokrést eredményezne, ezért nem ezt a módszer választottam. A belső hőcserélőben megszabott minimális hőfokrés a körfolyamat modell számításánál is szükséges, míg az elgőzölögtetőre és kondenzátorra érvényes adatok a hőforrás és hűtőrendszerre vonatkozó modellekkel történő összekapcsolásra szolgál. A modell lehetőséget biztosít csövekben és hőcserélőkben jelentkező nyomás- és hőveszteségek figyelembevételére is, a számítások során azonban ezeket elhanyagoltam, mivel értékük a rendszer pontos kialakításának ismerete nélkül nehezen becsülhető. Helytelenül felvett értékek ronthatják a modell pontosságát, miközben mégis a pontosság hamis illúzióját keltik, így célszerűbbnek tartottam az elhanyagolást, és az ebből fakadó hiba észben tartását. A különféle figyelembe nem vett veszteségek kompenzálására a forgógépek, főként a turbina hatásfokát a reálisan elérhető értéknél valamivel alacsonyabbra választottam, így a kiadott teljesítményre a valóságoshoz közeli értéket kaphatunk.

A kondenzátornyomást alapvetően az határozza meg, hogy a hűtőrendszer segítségével milyen hőmérsékleten valósítható meg a hőelvonás adott környezeti levegő- vagy víz hőmérséklet mellett, így a modellt a hűtőkörre vonatkozó résszel is bővítettem. A számításához ismernünk kell a hűtőközeg belépő hőmérsékletét, melynél általában a környezeti hőmérsékletet vehetjük alapul. A hűtőközeg felmelegedését az elvont hő ismeretében annak tömegárama alapján határozhatjuk meg, vagy megadhatunk egy kívánt felmelegedést, amiből az ehhez szükséges tömegáramot számíthatjuk. A kondenzáció hőmérséklete a hűtőközeg kilépő hőmérséklete és a kondenzátorban szükséges minimális hőfokrés alapján meghatározható. Az alapvető összefüggések frissvíz- illetve léghűtés alkalmazásakor is megegyeznek, de eltérő a két közeg fajhője, valamint léghűtés esetén a hőátadáshoz szükséges minimális hőfokrést célszerű magasabbnak választani.

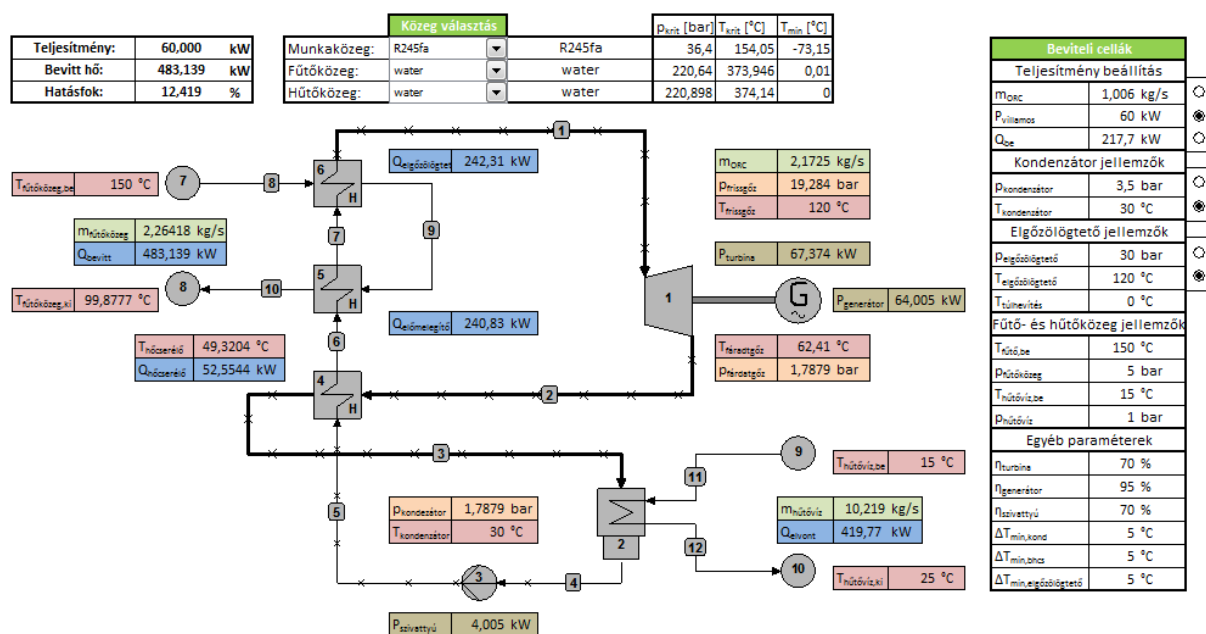
A modell készítése során a fenti jellemzők közti kapcsolatot a hőtanból megismert általános egyenletek és összefüggések alapján, entalpia szemléletű számítási mód szerint végeztem, így az összefüggések részletes bemutatásától eltekintek. A következő bekezdésekben a három különböző programban készített modellek előnyeit, hátrányait és egyéb sajátosságait mutatom be, rámutatva legcélszerűbb alkalmazási területükre is.



2.1. ábra: Szerves Rankine-körfolyamat modellje Cycle-Tempo programban

A Cycle-Tempo egy hőkörfolyamatok modellezésére szolgáló program, amely összetett erőművi rendszerek vizsgálatát is lehetővé teszi. A modell elkészítése során a körfolyamatot felépítő egyes berendezéseket a program grafikus felületén helyeztem el és kapcsoltam össze a szükséges csövekkel, majd minden berendezésben megadtam a számítás elvégzéséhez szükséges paramétereket. A program futtatás során iterációs, numerikus számítást végez, amely minden pontban kiszámolja a munkaközeg állapotjelzőit valamint tetszőleges további, ezekből származtatható adatokat. A program előnye, hogy tartalmazza a hőtani számítási modellt, így a rendszer felépítésén és a paraméterek megadásán túl nincs egyéb teendőnk az eredmények számításához. Előnyös tulajdonság a modell könnyű alakíthatósága, hiszen az elkészített körfolyamatot könnyedén átalakíthatjuk vagy bővíthetjük további elemek hozzáadásával. A programban számos beépített szerves munkaközeg közül választhatunk, így ORC is könnyedén modellezhető vele. A Cycle-Tempo hátránya, hogy T-s diagramot csak víz munkaközeg esetén tud készíteni, szerves munkaközeg esetén csak az adatok Excelbe történő exportálása nyújt megoldást. További kellemetlenség, hogy az iterációs számítás hierarchikus felépítése miatt a program nem képes telítési hőmérséklet alapján a hozzá tartozó nyomás számítására, így az elgőzölögtetőben és kondenzátorban hőmérséklet helyett minden esetben a nyomás megadására

van szükség. Összetett vizsgálatok elvégzése szempontjából nehézséget jelentett, hogy nem volt egyszerű lehetőség a modell többszöri, eltérő paraméterekkel történő automatikus futtatására, így az adatokat minden esetben kézzel kellett megváltoztatni. A program külső forrásokkal történő nehézkes kommunikációja miatt a körfolyamat modelljének a hőforrásokra vonatkozó modellel történő hatékony összekapcsolására sem volt mód. A Cycle-Tempo programban készített modell a 2.1. ábrán látható.



2.2. ábra: Szerves Rankine-körfolyamat modellje Excel programban

A modell Excelben történő elkészítéséhez szükségem volt egy olyan bővítményre, amely tartalmazza a munkaközeg állapotjelzői közti összefüggéseket, erre a célra azt a FluidProp nevezetű programot használtam, amelyre a Cycle-Tempo is épül. Ennek előnye, hogy ugyanaz a széles szerves munkaközeg választék Excelben is elérhetővé vált, valamint a beépített függvények segítségével szinte bármely két ismert állapotjelző alapján egyszerűen meghatározható a közeg minden további állapotjelzője. A modell Excelben történő elkészítése hosszadalmas feladat, mivel a számítás alapjául szolgáló teljes hőtani összefüggérendszer meg kell adni a táblázatokban, valamint az eredmények átlátható megjelenítése és a szemléltető T-s és T-Q diagramok elkészítése is a mi feladatunk. A modell egyszeri elkészítése után azonban a cellák újraszámolásával gyorsan és egyszerűen vizsgálhatóak a különböző munkaközegek lehetőségei és a bemenetek változtatásának hatásai. Hátrány a modell nehézkes változtathatósága, mivel egy elem hozzáadása vagy megváltoztatása, esetleg csak más bemenetek alkalmazása a körfolyamat modelljében megköveteli a teljes számítási mód újragondolását és átalakítását. ORC esetében általánosan és szinte kizárólagosan elterjedt a

bevezetőben bemutatott kialakítás, egy jól kialakított modell esetén nincs szükség későbbi változtatásokra, így az ebből adódó nehézségek sem jelentkeztek. A 2.2. ábrán az Excelben készült modell egy részlete látható.

Az Excel modell előnye az átlátható grafikus felületből fakadó könnyű használhatóság, a bemeneti mezők értelemszerű kitöltésével a modell és a technológia ismeretével nem rendelkezők is használható eredményt kapnak. A cellák újraszámolása során az eredmények mellett a T-s és T-Q diagramok is azonnal frissülnek, így minden kis változtatás hatása könnyen áttekinthető rajtuk. Az Excelben és a Cycle-Tempóban készült modellek eredményeinek összehasonlítását is elvégeztem, és azonos bemenő adatok esetén mindkét modell a kijelzett tizedesjegyek pontosságáig azonos eredményt adott. A két modell alapvetően eltérő számítási módja miatt ezt mindenképpen jó eredménynek tartom, mely alátámasztja az elkészített modellek pontosságát.

A Matlab segítségével készített program felépítésében és a számítási összefüggések tekintetében egyaránt az excelel modellhez hasonló, és a munkaközeg állapotjelzőit ez esetben is a FluidProp segítségével határoztam meg. Excelben már adódott bizonyos lehetőség a program különböző bemenetekkel történő többszöri automatikus futtatására, összetett vizsgálatok esetén ezek általában még nehézkesnek és időigényesnek bizonyultak. Matlabban a számítási modell egyszerű ciklusba illesztésével a kívánt vizsgálatok könnyedén és gyorsan elvégezhetőek, az eredmények rendezett formában összefoglalhatóak és diagramban ábrázolhatóak. A Matlab modellhez grafikus felületet nem készítettem.

A három elkészített modellt eltérő előnyeik és hátrányaik miatt más-más célra használtam munkám során. Cycle-Tempóban a modell könnyű alakíthatóságát használtam ki, és a rendszer oly mértékű megváltoztatásának hatásait vizsgáltam, amelyre a többi programban a modellek jelentős átalakítása nélkül már nem volt lehetőség. Excelben a grafikus megjelenítés és az egyszerű kezelhetőség előnyeire támaszkodtam, így a bemenetek változtatásának lehetséges határait és főbb hatásait elsőként mindig ennek segítségével elemeztem. A Matlab modell a számítás sokszori elvégzésén alapuló szimulációs vizsgálatok és összetettebb optimalizálási feladatok elvégzésére szolgált.

A fent bemutatottak a rendszer működésének tervezési állapotban történő leírására szolgálnak, egy adott rendszer névlegestől eltérő, részterhelési üzemállapotainak vizsgálatához további megfontolások szükségesek. A modellben a rendszert leíró paraméterekként a forgógépek hatásfokát és a hőcserélőkben szükséges minimális hőfokrást választottuk, így részterhelés esetén ezek esetleges változását is át kell gondolni. A turbina és szivattyú hatásfoka

általában tervezési állapotban maximális, és értéke ennél kisebb illetve nagyobb teljesítmények esetén is csökken. A hőcserélőkben és csövekben fellépő nyomás- és hőveszteségek részterhelésen alacsonyabbak a névleges állapothoz képest, így ezek hatása jó közelítéssel kompenzálja a forgógépek hatásfokának csökkenését. A hőcserélőkben részterhelés esetén fajlagosan nagyobb felület szolgál egységnyi hő átadására, azonban az alacsonyabb áramlási sebességek miatt a hőátadási tényező is csökken, így a minimális hőfokrés részterhelés esetén sem változik jelentősen. Az előbbi megfontolások alapján tehát a részterhelés vizsgálatakor nem vettem figyelembe a rendszert leíró paraméterek megváltozását, hanem a tervezési állapotban megadott állandó értékekkel számoltam.

Részterhelés esetén azonban feltétlenül figyelembe kell venni, hogy egy adott hidraulikai rendszerben keringő közeg tömegárama és adott pontokon érvényes nyomásértékek közt határozott összefüggés áll fent, amelyet bizonyos pontokon szabályozó szelepek segítségével befolyásolhatunk. A részterhelésű működés jellemzői tehát az ORC rendszer szabályozási módjától is függ, így ennek megvalósítási lehetőségeit is figyelembe kell venni. A szabályozással és részterheléssel üzemmel kapcsolatos részletesebb modellt és megfontolásokat a 3. fejezetben mutatom be, mivel a kérdéskör szorosan kapcsolódik annak tartalmához.

2.2. Hőforrások modellje

A következőkben az egyes hőforrásokat leíró, a modellek számára bemeneti adatként szolgáló adatokat, valamint az ezek és körfolyamati modell bemenetei közt fennálló összefüggéseket mutatom be. A körfolyamat az előmelegítő és előgőzöltető hőcserélőben kapcsolódik a hőforráshoz, így az ott átadott hő és az előgőzölés hőmérséklete a modell hőforrástól függő bemenetei. A hőforrás jellege napenergia és geotermikus energia hasznosítása esetén igen nagymértékben eltér, így mindkét esetre külön modellt készítek és mutatok be. A hulladék hő modellezési szempontból a geotermikushoz hasonló hőforrásnak tekinthető, így annak esetében csak a fontosabb eltéréseket emelem ki.

Napenergia hasznosítása esetén alapvetően két adat, a sugárzás intenzitása valamint a külső levegő hőmérséklete jelenti a modell bemeneteit. A napsugárzás hővé alakítása napkollektorok segítségével történik, melyek közül munkám során több típust is vizsgállok és bemutatok. A napkollektorokban áramló közeg a beeső napsugárzás hatására melegszik fel, a közeg által felvett hőmennyiség és a kollektor felületét érő teljes sugárzási energia közt a kollektor hatásfoka teremt kapcsolatot. A kollektorban abszorbernek nevezzük a sugárzást elnyelő felületet, amely felmelegedve adja át a hőt a kollektorban áramló közegnek. A kollektor

veszteségei két alapvető részre bonthatóak, az optikai és hőveszteségre. Az optikai veszteség arányos a beeső sugárzással és főként a kollektor borításának fényvisszaveréséből és -elnyeléséből ered. A hőveszteségek a felmelegedett abszorber felület környezet felé történő konvektív és sugárzásos hőleadásból tevődnek össze, melyek értéke a sugárzástól nem, csak az abszorber hőmérsékletétől függ. A konvektív hőtranszport az abszorber és a környezet közti hőátbocsátási tényező csökkentésével korlátozható, melynek módja több rétegű borítás alkalmazása, vagy vákuum létesítése a borításon belül, vagy annak egyes rétegei közt. A sugárzásos hőátadás szelektív borítás segítségével csökkenthető, melynek transzmissziós tényezője függ a sugárzás hullámhosszától, a beérkező sugárzásra jellemző alacsony hullámhossztartományban értéke magas, míg az abszorber által kisugárzott infravörös tartományban lehetőség szerint minél alacsonyabb. Mindkét típusú hőveszteség hatékonyan csökkenthető az abszorber felületének csökkentésével, ezt a módszert alkalmazzák a koncentrátoros kollektoroknál [9].

A fenti veszteségek figyelembevételével a kollektorra a (2.1) szerinti energiamegmaradási egyenlet írható fel. Az egyenletben a hőveszteségeket egy közös, konvektív és sugárzásos hőtranszportot egyaránt tartalmazó hőátadási tényező segítségével írtam le.

$$\rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot A \cdot C \cdot S = \dot{m}_{hh} \cdot c_{hh} \cdot (T_{ki} - T_{be}) + A \cdot U_{teljes} \cdot (T_a - T_k) \quad (2.1)$$

Az egyenlet bal oldalán az abszorber által felvett hőteljesítmény látható, ahol ρ az esetleges tükrök reflexiós tényezője [-], τ a borítás eredő transzmissziós tényezője [-], α az abszorber abszorpciós tényezője [-], A az abszorber felülete [m^2], C a koncentrátsági fok [-], mely a kollektor teljes sugárzásra merőleges felületének és az abszorber felületnek hányadosa, S pedig a sugárzás intenzitása [W/m^2]. A jobb oldali első tag a kollektorban áramoltatott közegnek átadott hőteljesítmény, ahol $\dot{m}_{hh}$ a hőhordozó közeg tömegárama [kg/s], c_{hh} a fajhője [$\text{J}/(\text{kgK})$], T_{be} a kollektorba belépő, T_{ki} pedig a kilépő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]. Az utolsó tag a hőveszteségeket írja le, ahol U_{teljes} a konvektív és sugárzásos hőátvitelt is tartalmazó hőátbocsátási tényező [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], T_a az abszorber, T_k pedig a külső levegő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$], melyek különbsége a továbbiakban $\Delta T = T_a - T_k$ [$^{\circ}\text{C}$].

A teljes hőátbocsátási tényező több tagból tevődik össze, melyek közül a természetes áramlás esetén érvényes hőátadási tényező valamint a sugárzási hőátadási tényező is függenek az abszorber és a környezet közti hőmérsékletkülönbségtől. A hőátbocsátási tényező hőmérsékletfüggésének pontos meghatározására a kollektor felépítésének részletes ismerete nélkül nincs mód, tapasztalatok szerint azonban értéke jó közelítéssel lineárisan növekszik a hőmérsékletkülönbség emelkedésével: $U_{teljes}(\Delta T) = U_0 + u_T \cdot \Delta T$. A hőátbocsátási tényező

hőmérsékletfüggésének figyelembevételével, valamint az egyenlet mindkét oldalát osztva a kollektorra jutó napsugárzás $A \cdot C \cdot S$ értékű teljesítményével és a szükséges további átalakítások elvégzésével a (2.1) összefüggés a (2.2) szerinti alakra hozható [10].

$$\frac{\dot{m}_{hh} \cdot c_{hh} \cdot (T_{ki} - T_{be})}{A \cdot C \cdot S} = \rho \cdot \tau \cdot \alpha - \frac{U_0 \cdot \Delta T}{C \cdot S} - \frac{u_T \cdot \Delta T^2}{C \cdot S} \quad (2.2)$$

Az egyenlet bal oldalán a kollektorban áramló közegnek átadott hő és a teljes sugárzási teljesítmény hányadosa szerepel, amely a kollektor hatásfokát jelenti. Az egyenlet jobb oldalán a konstansokat összevonva az alábbi összefüggésre jutunk:

$$\eta_{koll} = K_0(\theta) \cdot \eta_o - a_1 \cdot \frac{\Delta T}{S} - a_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{S} \quad (2.3)$$

ahol θ a sugárzás felületi normálistól számított beesési szöge $[\circ]$, K_0 a beesési szögtől függő korrekciós paraméter $[-]$, η_o az optikai hatásfok $[-]$, a_1 az elsőrendű $[W/(m^2K)]$, a_2 pedig a másodrendű $[W/(m^2K^2)]$ hőveszteségi tényező. Az optikai hatásfok a kollektorra jellemző állandó érték, mely kifejezi, hogy a merőlegesen beérkező sugárzás mekkora része nyelődik el az abszorberen, a korrekciós tényező pedig az eltérő beesési szögből fakadó nagyobb visszaverődés hatásával csökkenti ennek értékét. A korrekciós tényező számítása leggyakrabban az alábbi összefüggés alapján történik:

$$K_0(\theta) = 1 - \operatorname{tg}^p\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.4)$$

ahol p a gyártók által megadott paraméter $[-]$. Az általam vizsgált kollektorok esetében K_0 értéke nagyjából 60° felett kezd el jelentősen csökkenni, ilyen magas beesési szög azonban a gyakorlatban csak a reggeli és esti órákban fordul elő, amikor a sugárzás egyébként is gyenge, és a rá merőleges kollektor felület is lecsökken [11]. A beesési szög hatását a modellben nem vettem figyelembe, hanem állandó optikai hatásfokkal számoltam. A (2.3) egy szabványos egyenlet, melynek paramétereit a napkollektor gyártók nem a fent bemutatott analitikus módszerből kiindulva, hanem mért adatokra történő paraméter illesztéssel határozzák meg, majd értéküket feltűntetik a kollektor adatlapján [10].

A kollektor hatásfokának számítása során lényeges a (2.3) egyenletben szereplő ΔT hőmérsékletkülönbség meghatározási módja, amelyhez ismernünk kell az abszorber hőmérsékletét. A kollektorban a hőhordozó közeg és az abszorber közt a kényszeráramlás miatt magas a hőátadási tényező, így az alacsony hőfokrés mellett megvalósuló hőátadás miatt az abszorber hőmérsékletét közelíthetjük a hőhordozó közeg hőmérsékletével. Koncentrátoros kollektor esetén a beérkező sugárzáshoz mérten jelentősen kisebb abszorber felület miatt jelentősebb hőfokrés is kialakulhat, ám a hatásfok csekélyebb hőfokfüggése miatt itt sem jelent

nagy hibát ennek elhanyagolása. A hőhordozó közeg a kollektoron áramolva hőt vesz fel, hőmérséklete monoton nő, így a hőmérsékletkülönbség értéke is változó a cső mentén.

Koncentrált paraméterű modell alkalmazása esetén ΔT változását elhanyagoljuk, az abszorber hőmérsékletét állandónak tekintjük, mely praktikusán a hőhordozó közeg be- és kilépő hőmérsékletének átlaga. A megközelítés előnye a számítás egyszerűsége, hiszen az átlagos hőmérsékletkülönbség alapján a kollektor átlagos hatásfoka a (2.3) egyenletbe történő egyszeri behelyettesítéssel meghatározható. A koncentrált paraméterű modell abban az esetben tekinthető kielégítő pontosságúnak, ha a kollektorban áramló közeg felmelegedése alacsony, tehát be- és kilépő hőmérséklete közel áll egymáshoz.

Elosztott paraméterű modell használata lehetőséget biztosít a hőmérséklet és a kollektor hatásfok folyamatos változásának figyelembevételére a cső hossza mentén. Kihasználva, hogy állandó külső hőmérséklet mellett a közeg hőmérsékletének változása megegyezik a hőmérsékletkülönbség megváltozásával, a közeg felmelegedésére az alábbi differenciálegyenlet írható fel:

$$\dot{m}_{hsz} \cdot c_{hsz} \cdot d(\Delta T) = S \cdot C \cdot \eta_{koll}(\Delta T, S) \cdot D \cdot dx \quad (2.5)$$

ahol D az abszorber lemez szélessége [m], x pedig a hosszirányú koordináta. A kollektor hatásfokát (2.3) szerint behelyettesítve szétválasztható változójú differenciálegyenletet kapunk, mely az alábbi módon oldható meg:

$$\dot{m}_{hsz} \cdot c_{hsz} \cdot \int_{\Delta T_{be}}^{\Delta T_{ki}} \frac{1}{K_0 \cdot \eta_o - \frac{a_1}{S} \cdot \Delta T - \frac{a_2}{S} \cdot \Delta T^2} d(\Delta T) = S \cdot C \cdot D \cdot \int_0^L dx \quad (2.6)$$

ahol L az abszorber hossza [m], ΔT_{be} a belépéskor, ΔT_{ki} pedig a kilépéskor érvényes hőmérsékletkülönbség [°C]. Jelöljük a továbbiakban a bal oldalon található integrált I -vel [°C], amely adott kollektor esetén függ az integrálási határt jelentő hőmérsékletkülönbségektől valamint a sugárzás intenzitásától. Az abszorber hosszának és szélességének a szorzata annak felületét jelenti, ezek alapján az előző egyenlet megoldásaként az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\dot{m}_{hsz} \cdot c_{hsz} \cdot I(S, \Delta T_{be}, \Delta T_{ki}) = S \cdot C \cdot A \quad (2.7)$$

I értéke számítógépes szimuláció során kiszámítható a fenti integrál numerikus elvégzésével, de meghatározható az integrálhoz tartozó primitív függvény alapján is, az alábbi formában:

$$I = \int_{\Delta T_{be}}^{\Delta T_{ki}} \frac{1}{K_0 \cdot \eta_o - \frac{a_1}{S} \cdot \Delta T - \frac{a_2}{S} \cdot \Delta T^2} d(\Delta T) = \left[\frac{2 \cdot S \cdot \operatorname{arth} \left(\frac{a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot \Delta T}{\sqrt{4 \cdot \eta_o \cdot a_2 \cdot S + a_1^2}} \right)}{\sqrt{4 \cdot \eta_o \cdot a_2 \cdot S + a_1^2}} \right]_{\Delta T_{be}}^{\Delta T_{ki}} \quad (2.8)$$

I értékének ismeretében meghatározható a kollektor átlagos hatásfoka:

$$\bar{\eta}_{koll} = \frac{T_{ki} - T_{be}}{I(S, \Delta T_{be}, \Delta T_{ki})} \quad (2.9)$$

A számítások során az abszorber felület helyett általában a kollektor teljes felületére vonatkoztatunk, így az $A_{koll} = C \cdot A$ összefüggés okán a koncentrátsági fok is eltűnik a képletből, és a napkollektor fontosabb üzemi jellemzői közti összefüggés az alábbi alakot ölti:

$$\dot{m}_{hsz} \cdot c_{hsz} \cdot (T_{ki} - T_{be}) = S \cdot A_{koll} \cdot \bar{\eta}_{koll}(S, \Delta T_{be}, \Delta T_{ki}) \quad (2.10)$$

Egy adott típusú kollektor esetén annak átlagos hatásfoka függ a sugárzástól és a be- illetve kilépéskori hőmérsékletkülönbségtől, melyek ismeretében a koncentrált paraméterű modell alkalmazásakor az átlagos hőmérsékletkülönbséggel számolva a (2.3) egyenlet, elosztott paraméterű modell esetén pedig a (2.8-9) egyenletek alapján számolható. A sugárzás, a külső hőmérséklet, a hőhordozó anyag belépési és elvárt kilépési hőmérséklete valamint fajhője általában ismertek, egy rendszer tervezésekor tehát a kollektor felület meghatározása történik a kívánt tömegáram alapján, részterhelés esetén pedig a felmelegíthető közeg tömegáramának számítása adott felületű kollektor esetén, mindkét esetben a (2.10) egyenlet megfelelő átrendezésével.

Vizsgálataim során a négy legfontosabb napkollektor típus alkalmazási lehetőségeit tekintettem át. A síkkollektorok esetében a sík felületek miatt magas az optikai hatásfok, a kollektor hatásfoka azonban a hőmérséklet növekedésével meredeken csökken a jelentős, főként konvektív hőveszteségek miatt. A hőhordozó közeg egy, a sík abszorber felület alatt többször visszafordulva párhuzamos szakaszokban futó csőben áramlik, így a lemez belső hővezetése miatt a hőmérséklet-eloszlás nem felel meg az elosztott paraméterű modellben feltételezettnek, míg a jellemzően alacsony hőmérsékletváltozás miatt a koncentrált paraméterű modell jól használható. A kollektor hatásfokát a gyártók az adatlapon a (2.3) egyenletben szereplő három paraméter formájában és gyakran grafikusán is közlésteszik [12][13].

A vákuumcsöves kollektorokban az abszorber egy vákuumcsőben helyezkedik el, mely jelentősen csökkenti a hőveszteségeket, a görbült felület miatt azonban az optikai hatásfok is lecsökken. Az abszorber mentén a hőhordozó közeg egy U alakú csőben áramlik, vagy bizonyos esetekben egy hőcsövet vezetnek végig az abszorberen, így az elosztott paraméterű modell itt sem pontos. A vákuumcsövek nem helyezhetőek el szorosan egymás mellé, így a csöveket elkerülő sugárzás összegyűjtésére gyakran alkalmaznak kettős parabola koncentrátor (CPC – Compound Parabolic Concentrator) tükröket. A koncentrátsági fok értéke általában ilyenkor is kettőnél alacsonyabb, így a kollektor még a nem koncentrátoros kollektorok sajátosságait

tükrözi, tehát nem szükséges a napkövetés alkalmazása, valamint a szórt sugárzás is kihasználható. A hatásfokot a vákuumcsöves kollektorok adatlapja is a síkkollektorokhoz hasonló módon tartalmazza [14].

Az SRB cég UHV (Ultra High Vacuum) technológián alapuló napkollektora egyesíti a fent említett kollektorok előnyös tulajdonságait [15]. A kollektor kialakítása síkkollektorokhoz hasonló, azonban a konvektív hőveszteségek csökkentésére az abszorber és a borítás között vákuum található, fenntartását nanotechnológián alapuló getter szivattyú biztosítja, így a jó szigetelőképeség a kollektor teljes élettartama során megmarad. A kollektor kialakítástól függően hengeres tükröket is tartalmazhat, amelyek kis koncentrátsági fok mellett (2-4) megnövelik a kollektor által összegyűjtött hőmennyiséget. A kollektorban a közeg több párhuzamos csőben azonos irányban áramlik, így a bemutatott elosztott paraméterű modell jól leírja a kollektor viszonyait. A hatásfok meghatározásához rendelkezésre állnak adatok a (2.3) egyenlet paraméterei [16] formájában és grafikusán egyaránt [17].

A koncentrátoros napkollektorok közül a parabolavályús kollektor használható legjobban ORC rendszerekhez [18]. A parabola profilú tükrök csökkentik a kollektor optikai hatásfokát, a hőveszteségek azonban a nagy koncentrátsági fok miatt alacsonyak, így a kollektor hatásfoka még magas hőmérsékleten sem romlik jelentősen. A koncentrátoros napkollektor alkalmazásának hátránya a napkövetés szükségessége, valamint a szórt sugárzás hasznosításának hiánya, amelynek részaránya pedig viszonylag magas a hazai jellemzők mellett. A hőhordozó közeg áramlása a parabolavályú fókuszpontjában elhelyezkedő hosszú csőben történik, így itt is pontos az elosztott paraméterű modell. A hatásfok meghatározásához a SEGS (Solar Energy Generating System) naphőerőmű kollektorain végzett mérés eredményeit vettem alapul [19]. A hatásfokot leíró egyenlet némileg eltér a (2.3) egyenlettől, mivel az optikai hatásfok hőmérsékletkülönbségtől való függését is tartalmazza az alábbiak szerint:

$$\eta_{koll} = K_0 \cdot (\eta_o - a_0 \cdot \Delta T) - a_1 \cdot \frac{\Delta T}{S} - a_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{S} \quad (2.11)$$

ahol a_0 az optikai hatásfok csökkenését leíró állandó [$1/^\circ\text{C}$]. A számítás szempontjából ez lényeges eltérést nem jelent, a bemutatott képletek kis módosítással erre a hatásfok formulára is alkalmazhatóak. Fontos megjegyezni, hogy a fenti összefüggések 400°C hőmérsékletig érvényesek, hiszen a hőhordozó olaj bomlása miatt magasabb hőmérsékleten nem tudtak méréseket végezni.

Geotermikus hőforrások modellezése során bemeneti adatként a kútból felszínre érkező fluidum tömegárama és hőmérséklete áll rendelkezésre, így míg napenergia esetén egy teljes kollektor modellt kellett kidolgozni ezek meghatározására, itt közvetlenül felhasználhatóak a számításához. A geotermikus kutak működésének leírására is készíthető részletes modell, ez azonban jelentős geológiai háttértudást igényel, és ilyen modellekre elsődlegesen a kutak tervezése és létesítése során van szükség. Az energiaátalakítás lehetőségeinek vizsgálata során elegendő a tömegáram és kútfej hőmérséklet ismerete, melyek a kút kialakításától függetlenül ismertnek és időben állandónak tekinthetők.

A napkollektorok esetében a kollektorban áramló közeg be- és kilépő hőmérsékletétől egyaránt függ a kollektor működése és az előállított hő mennyisége, ezzel szemben geotermikus kút esetén a visszasajtolás hőmérsékletének nincs számottevő hatása a hőforrás működésére. A körfolyamatnak átadott hőteljesítményt az határozza meg, hogy az adott tömegáramú és hőmérsékletű fluidumot milyen mértékben tudjuk lehűteni az előgőzölgető és előmelegítő hőcserélőkben. A hőhasznosítás arányát, mely tágabb értelemben a hőforrás kihasználási hatásfokának tekinthető, a fluidum ténylegesen elvont hőteljesítmény és az elvonható elméleti maximális hőteljesítmény hányadosaként definiálhatjuk az alábbiak szerint:

$$\eta_{HH} = \frac{Q_{valós}}{Q_{max}} = \frac{h_{kút} - h_{vissza}}{h_{kút} - h_{ref}} \quad (2.12)$$

ahol $h_{kút}$ a kútból kilépő fluidum entalpiája [kJ/kg], h_{vissza} a visszasajtolt fluidum entalpiája [kJ/kg], h_{ref} pedig a referencia hőmérséklet [kJ/kg]. A referencia entalpia praktikusán a fluidum környezeti hőmérsékleten vett entalpiája, hiszen a környezeti hőmérsékletig történő hűlés során beszélhetünk hőhasznosításról, a fluidum további lehűtése már csak energia befektetésével valósítható meg. A viszonyítási hőmérséklet pontos értékének nincs komoly jelentősége, mivel a vizsgálatok során nem a hőhasznosítási arány számértéke, hanem változásainak jellege és mértéke lesz mérvadó. A geotermikus fluidum a vizsgált hazai adottságok mellett általában folyadék állapotban jut a felszínre, így entalpiája egy állandónak tekinthető fajhő és hőmérsékletének szorzataként adható meg, így a hőhasznosítás aránya megfelelő hőmérsékletek arányaként is kifejezhető:

$$\eta_{HH} = \frac{T_{kút} - T_{vissza}}{T_{kút} - T_{ref}} \quad (2.13)$$

Geotermikus hőforrás hasznosításánál nagy jelentősége van a fluidum visszasajtolására szolgáló szivattyú villamos teljesítményigényének, amely jelentősen növeli a kiserőmű

önfogyasztását, így elhanyagolására nincs lehetőség. A visszasajtolás teljesítményigényének számításához a közeg tömegárama mellett ismernünk kell a szivattyú által létrehozni kívánt, visszasajtoláshoz szükséges nyomáskülönbséget is. A szükséges nyomásemelkedés a fluidum keringése során fellépő nyomásemelkedések összegeként számítható, ennek elméleti meghatározása azonban csak egy geológiai tényezőt is figyelembe vevő kútmodell segítségével lehetséges, ennek hiányában számításaimat gyakorlati példákból származó tapasztalati adatok alapján végzem.

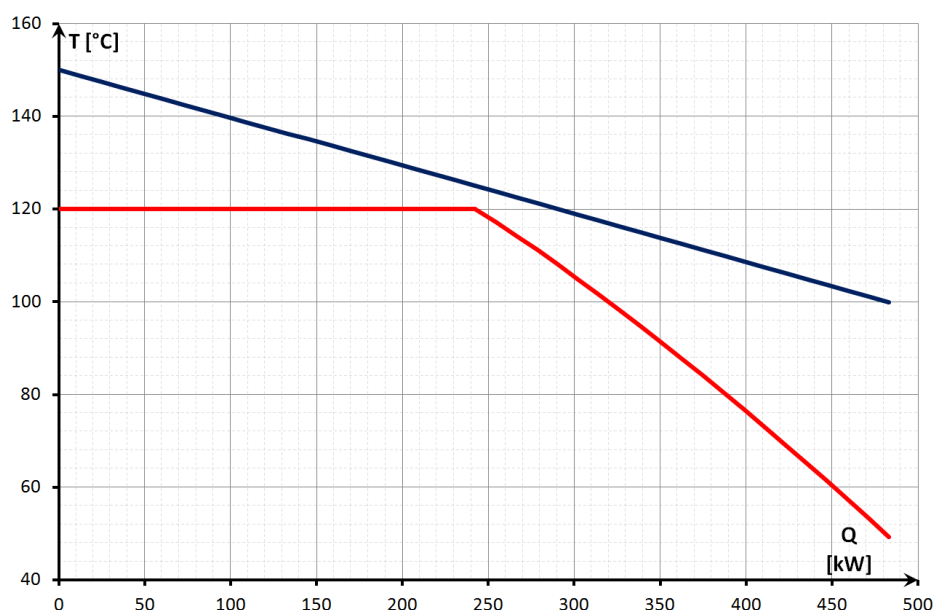
A hulladék hőforrások modellezése során bemeneti adatként a geotermikus kutakhoz hasonlóan általában szintén a hőhordozó közeg tömegárama és hőmérséklete áll rendelkezésre, így a fenti megfontolások kis különbségekkel itt is érvényesek. Míg a geotermikus fluidum legtöbb esetben víz, a hulladékhőt hordozó közeg ettől eltérő anyag is lehet, mely esetben fontos a termodinamikai tulajdonságainak ismerete. A hőhordozó közeg folyadék helyett bizonyos esetekben gőz állapotban áll rendelkezésre, ilyenkor a hőmérséklet mellett a nyomását is ismernünk kell a lehűlési görbe meghatározásához. A közeg hőhasznosítás utáni hőmérsékletére általában itt sincs megkötés, így cél annak minél nagyobb mértékű lehűtése, melyet kifejező hasznosítási arányt a korábbiakban bemutatott (2.12-13) egyenletek szerint számolhatjuk.

A teljes ORC kiserőmű modellje a hőforrásra és a körfolyamatra vonatkozó modellek összekapcsolásával készíthető el. A kapcsolódási pont a két modell közt az előmelegítő és előgőzöltető hőcserélő, így a modellek az arra felírható egyenletek alapján egyesíthetőek. Az előgőzöltetőben a hőmérséklet-lefutásokat egy megengedhető legkisebb hőfokrás segítségével számoltam tiszta ellenáramú közegvezetést feltételezve, a hőcserélő ennek megfelelően felvett T-Q diagramja a 2.3. ábrán látható. A legkisebb hőfokrás az előgőzöltés kezdőpontjában lép fel, ennek alapján számolható a hőcserélőből kilépő hőhordozó közeg hőmérséklete a belépő hőmérséklet ismeretében, állandó fajhőt feltételezve az alábbiak szerint:

$$T_{hh,h} = T_{hh,m} - [T_{hh,m} - (T_{elg} + \Delta T_{elg,min})] \cdot \frac{q_{be}}{q_{elg}} \quad (2.14)$$

ahol $T_{hh,h}$ a hőhordozó közeg hidegági, $T_{hh,m}$ pedig a melegági hőmérséklete [°C], T_{elg} az előgőzöltés hőmérséklete [°C], $\Delta T_{elg,min}$ a minimális hőfokrás nagysága [°C], q_{be} a munkaközegnek átadott teljes, q_{elg} pedig az ezen belül előgőzöltésre fordított fajlagos hőmennyiség [kJ/kg]. A hőcserélőbe belépő közeg itt megegyezik a kollektorból illetve kútból kilépő közeggel, így a korábban használt ki és be indexek helyett mostantól az egyértelműbb h és m indexeket használom a hideg- és melegági jellemzőkre utalva. A hőhordozó közeg állandónak tekintett fajhője a legtöbb vizsgált esetben jó közelítés a viszonylag szűk

hőmérséklettartomány miatt, amennyiben ez mégsem áll fenn, a (2.14) egyenletbe a hőmérsékletek helyett az adott állapothoz tartozó entalpiákat helyettesítve végezhető el a számítás.



2.3. ábra: Előmelegítő-elgőzöltető hőcserélő T-Q diagramja

Geotermikus és hulladék hőforrás esetén a melegági hőmérséklet közvetlenül rendelkezésre áll, így az elgőzöltési hőmérséklet megválasztása után a (2.14) összefüggés szerint számítható a lehűlés mértéke. Napkollektor esetében a melegági hőmérséklet is szabadon választható jellemző, melyet számításaim során az elgőzöltési hőmérséklethez viszonyítva adok meg a hőcserélő belépő oldali hőmérsékletkülönbségének formájában. A hőhordozó és a munkaközeg tömegárama közti viszonyt az előmelegítőre és elgőzöltetőre felírt hőmérlegegyenlet alapján számíthatjuk.

3. OPTIMÁLIS KIALAKÍTÁS

Egy adott hőforrás hasznosítási lehetőségeinek értékelésekor csak a hőforrás jellemzői állnak rendelkezésünkre, az erre illesztett szerves Rankine-körfolyamat paramétereit bizonyos határokon belül szabadon megválaszthatjuk. A kiserőmű üzeme, hatásfoka és gazdaságossága szempontjából több jellemző értékének is döntő jelentősége van, így a vizsgálatok előtt mindenképpen szükséges ezek áttekintése és az optimális üzemhez tartozó értékük meghatározása, hiszen egy rosszul megtervezett rendszer elemzésének igen csekély a gyakorlati haszna. ORC rendszerek tekintetében a napjainkban is viszonylag alacsony elterjedtség miatt még nem áll rendelkezésre annyi gyakorlati tapasztalat és tudásanyag, mint a hagyományos erőművi körfolyamatok tekintetében, így a rendszer optimalizálására sincsenek kizárólagos és bevett módszerek. Az ORC sok tekintetben hasonlít a hagyományos Rankine-ciklusra, így az onnan vett analógiák számos esetben itt is jó támpontot nyújtanak, bizonyos paraméterek tekintetében azonban az általam vizsgált rendszerek sajátosságai a megszokottól eltérő optimalizálási szempontot követeltek.

A szerves Rankine-körfolyamat működését meghatározó legfontosabb jellemzők az elgőzölgés és a kondenzáció hőmérséklete valamint a munkaközeg fajtája. A munkaközeg megválasztása a körfolyamat minden más jellemzőjére hatással van, így a legjobb munkaközeg kiválasztásának nincs egyszerűbb módja annál, mint a különböző közegek kipróbálása, és a szimulációs eredmények összehasonlítása. Támpontként a bevezetőben már bemutatott munkaközeg választási szempontok vehetőek figyelembe, melyek alapján általában azok a közegek a megfelelőek, melyek kritikus hőmérséklete csak kis mértékben haladja meg a kívánt elgőzölgési hőmérsékletet. Minél közelebb van egymáshoz az elgőzölgési és kritikus hőmérséklet, annál kisebb lesz az elgőzölgtetés hőigénye a teljes hőbevitelen belül, amely a (2.14) egyenlet szerint a hőhordozó közeg nagyobb mértékű lehűtését, és így a hőforrás jobb kihasználását teszi lehetővé.

A kondenzáció hőmérsékletét a körfolyamat szempontjából érdemes minél alacsonyabb értéken tartani, mivel ez eredményezi a legjobb hatásfokot. A kondenzátorban elérhető hőmérséklet alsó határa természetesen a külső hőmérséklet, illetve a hűtőközeg belépő hőmérséklete, célunk ennek a minél jobb megközelítése, a kondenzáció hőmérsékletének megválasztása tehát a hűtőrendszer optimalizálásával tehető meg. A kondenzátor és a külső hőmérséklet különbségét a hűtőközeg felmelegedése és a kilépésnél kialakuló hőfokrés összege határozza meg, így ezek csökkentésére kell törekedni. A hűtőközeg felmelegedése a

tömegáramának növelésével mérsékelhető, ez azonban többlet szivattyúzási vagy ventilátor teljesítményt igényel, valamint üzemeltetési költségnövekményt abban az esetben, ha a hűtővíz csak egy bizonyos áron áll rendelkezésre. A hőfokrés csökkentésének egyik módja a kondenzátor felületének növelése, amely azonban többlet beruházási költséget eredményez. Másik módszer az eredő hőátbocsátási tényező növelése, mely a közeg áramlási sebességének növelésével érhető el, ez azonban növeli a nyomásvesztést és a keringtetési teljesítményigényt, valamint a nagyobb gépek szükségessége miatt a beruházási költségekre is hatással van.

A kondenzáció hőmérséklete tehát csak egy igen összetett szempontrendszer alapján optimalizálható, amely tartalmazza a kiserőmű teljesítményének és önfogyasztásának változását, üzemelés során keletkező változó költségeket valamint beruházási költségnövekményt, melyek együttes minimalizálásához ezek egymásba történő átszámíthatóságát is biztosítani kell. A kondenzátor hőmérséklete mindamelllett nincs akkora hatással a rendszer üzemére, hogy a technológia egy ilyen általános érvényű vizsgálata során, mely dolgozatom célja, érdemes legyen egy átfogó optimalizálási eljárást kidolgozni. A hűtőrendszer az ORC és a hagyományos gőzerőművek esetében is igen hasonló kialakítású, így számításaim során az erre vonatkozó adatokat a gőzerőművektől vett tapasztalati adatok alapján vettem fel.

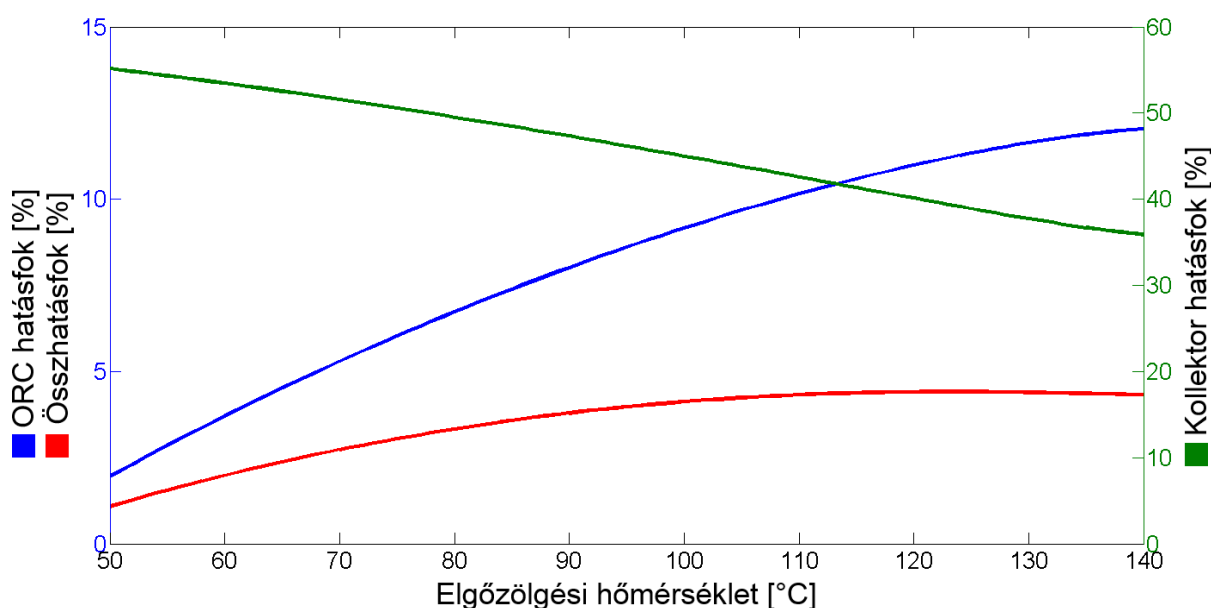
Az elgőzölögtetés hőmérsékletének jó megválasztása igen nagy hatással van az ORC rendszer hatásfokára, így ebben az esetben elkerülhetetlen az optimális érték megkeresése. Hagyományos gőzerőművekben az elgőzölögtetés hőmérsékletét és nyomását általában a szerkezeti anyagok és a kazán kialakításának figyelembevételével választják meg törekedve a minél magasabb érték elérésére. A modern, jó hatásfokú gőzerőművek általában szuperkritikus vagy ultra-szuperkritikus nyomásszinten üzemelnek, mivel így magasabb lesz a hőbevitel átlaghőmérséklete és a körfolyamat hatásfoka. ORC rendszerek esetén az elgőzölögtetés hőmérséklet megválasztása alapvetően eltérő módszer alapján történik, mivel az összhatásfok maximuma nem a lehető legmagasabb, hanem egy optimális hőmérséklethez tartozik. A következőkben részletesen is bemutatom az optimális érték meghatározásának szempontjait és módját, valamint az elkészített modellek segítségével ennek változásait is a különböző bemenő adatok esetén. Az erre vonatkozó optimalizálási eljárást a modelljeimbe is beépítettem, így a további vizsgálatokat már az optimális értékek figyelembevételével végeztem el.

3.1. Optimális elgőzöltetési hőmérséklet meghatározása

Szerves Rankine-körfolyamat esetében is igaz, hogy a körfolyamati hatásfok értéke annál magasabb, minél tágabb hőmérséklet határok közt zajlik a folyamat, tehát minél magasabb az elgőzöltetés hatásfoka. A teljes rendszer vizsgálatakor figyelembe kell venni a hőforrást is, amely adott körülmények közt alacsonyabb elgőzöltési hőmérséklet esetén képes nagyobb hőteljesítményt átadni a körfolyamatnak. Az előállított villamos teljesítmény a fenti két mennyiség szorzataként áll elő, így a rendszer összhatásfoka a hőforrás és a körfolyamat hatásfokának a szorzataként számítható:

$$\eta_{\text{össz}} = \eta_{\text{hőforrás}} \cdot \eta_{\text{ORC}} \quad (3.1)$$

ahol $\eta_{\text{össz}}$ a teljes rendszer, $\eta_{\text{hőforrás}}$ a hőforrás, η_{ORC} pedig a szerves Rankine-ciklus hatásfoka [-]. A hőforrás hatásfoka napsugárzás hasznosítása esetén a kollektor hatásfokát jelenti a (2.3) illetve (2.9) egyenlet szerint, míg geotermikus vagy hulladék hő forrás esetén a hőhasznosítás arányát a (2.12) egyenlet alapján. Az elgőzöltési hőmérséklet optimalizálásának célfüggvénye az összhatásfok maximalizálása.

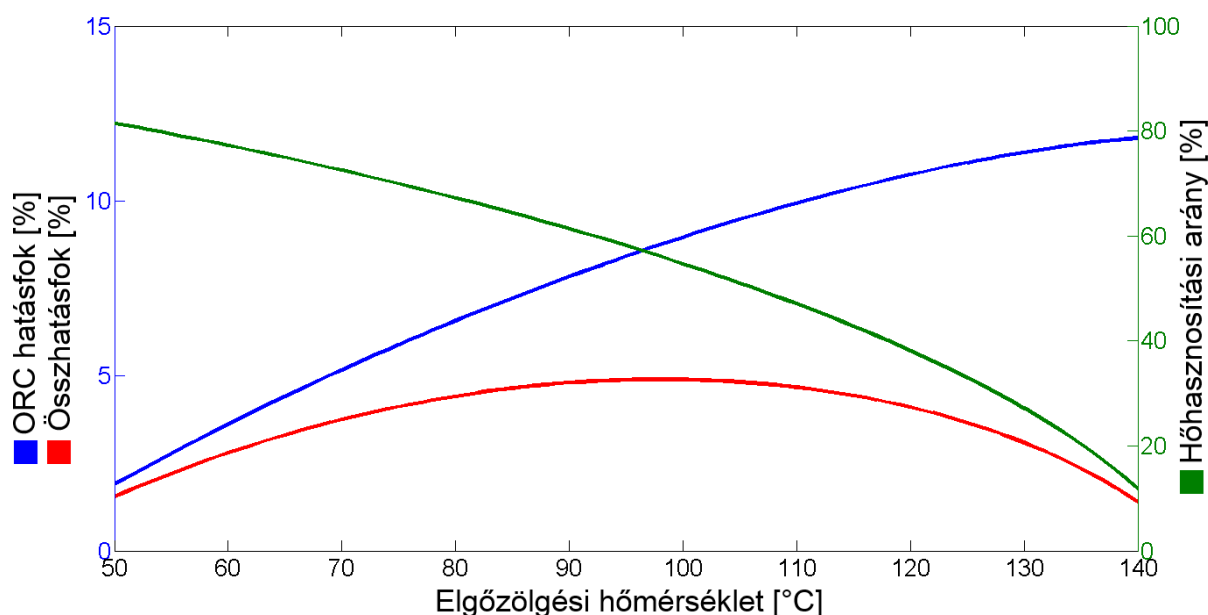


3.1. ábra: Hatásfokok alakulása az elgőzöltési hőmérséklet függvényében napkollektoros ORC rendszerénél

Napkollektoros ORC rendszer esetében az egyes hatásfokok a 3.1. ábrának megfelelően alakulnak, melyen jól látható a körfolyamat hatásfokának növekedése és a kollektor hatásfokának csökkenése az elgőzöltési hőmérséklet növelésével, mely maximumot eredményez a kettő szorzataként kiadódó összhatásfokban. A számítás során az előző fejezetben leírtaknak megfelelően a kollektorból kilépő közeg hőmérsékletét a mindenkori

elgőzlgési hőmérsékletéhez rögzítettem, köztük 20 °C hőmérsékletkülönbséget vettem figyelembe.

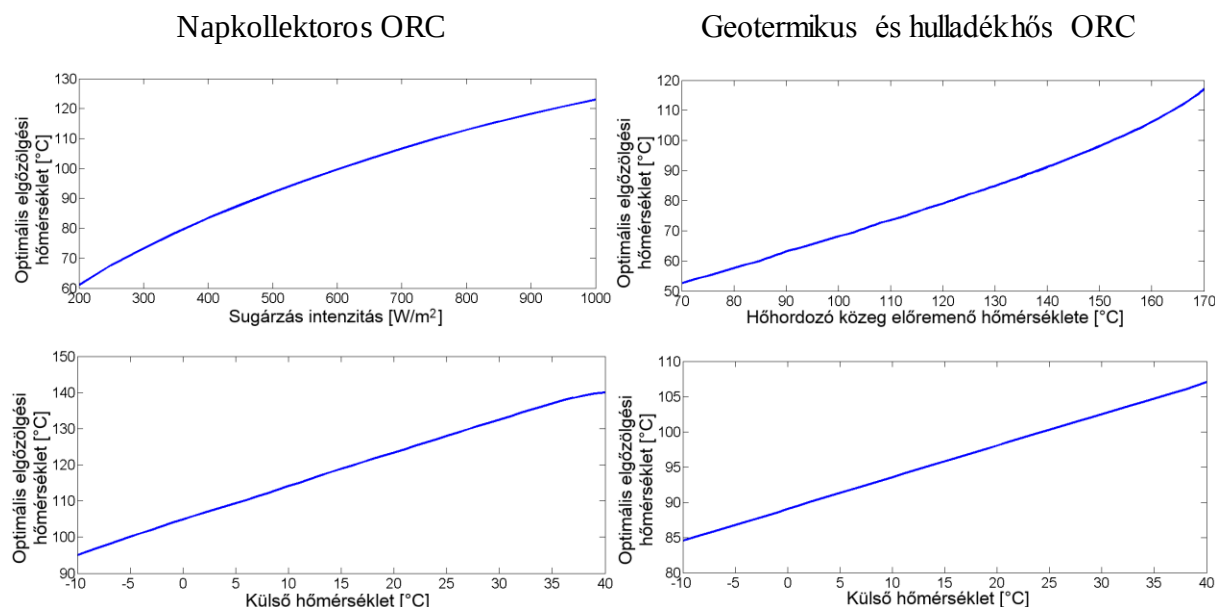
A fenti ábra vákuumsöves kollektorra és R245fa munkaközegű ORC-re vonatkozik, a rendszert leíró részletes paramétereket az 1. függelék F1.1. táblázata tartalmazza. Síkkollektor esetén a magasabb hőveszteségi tényezők miatt a kollektor hatásfoka meredekebben csökken, és bár a jobb optikai hatásfok miatt magasabb értékről indul, alacsonyabb lesz az optimális elgőzlgési hőmérséklet. A vákuumos síkkollektor hatásfoka a jobb szigetelés miatt lassabban csökken, az elgőzlgési hőmérséklet optimuma a magasabb értékek felé tolódik, így ebben az esetben a 154 °C kritikus hőmérsékletű R245fa helyett toluolt használtam, mely 318,65 °C kritikus hőmérsékletével jóval magasabb értékek elérését is lehetővé tette. A koncentrátoros, parabolavályús kollektor esetén az alacsony hőveszteségek miatt a hatásfok folyamatosan növekedett a vizsgált tartományban, az optimális elgőzlgési hőmérsékletet ekkor a munkaközeg kritikus hőmérséklete által megszabott legnagyobb megengedhető hőmérséklet jelenti.



3.2. ábra: Hatásfokok és a hőhasznosítás arányának változása az elgőzlgési hőmérséklet függvényében geotermikus vagy hulladékhő hőforrás esetén

Hulladékhő és geotermikus hőforrás esetén a kollektor hatásfoka helyett a hőhasznosítás részarányát tekintve a 3.2. ábrán is a fentiekhez hasonló tendenciát láthatunk, ugyanúgy megtalálható az összhatásfok maximuma egy optimális elgőzlgési hőmérsékletnél, csak az egyes görbék alakja tér el bizonyos mértékben. A számítás során 150 °C hőhordozó közeg belépő hőmérsékletet és 245fa munkaközegű ORC rendszert vettem figyelembe, a hőhasznosítás arányát pedig 20 °C-os külső hőmérsékletig történő lehűtéshez viszonyítva

számoltam, a rendszer adatait az 1. függelék F1.3. táblázata tartalmazza. Az optimális elgőzölgesi hőmérséklet a maximális villamos teljesítmény előállítására vonatkozik, tehát arra az esetre, amikor a hőcserélőből kilépő, lehűlt hőhordozó közeg hőtartalmát a továbbiakban már nem hasznosítjuk. A gyakorlatban elterjedt a kapcsolt hőtermelés kialakítása, melynek során egy további hőcserélőben a hőhordozó közeg megmaradt hőtartalma is hasznosításra kerül. Ilyen esetben nem cél a hőhasznosítási arány növelése, hiszen alacsonyabb érték esetén magasabb hőmérsékleten valósulhat meg a kapcsolt hőkiadás, így ilyenkor az elgőzölgesi hőmérsékletet célszerű a villamosenergia-termelés szerinti optimális értéknél magasabbra választani. A hőkiadást is figyelembe vevő optimum meghatározásához a műszaki paraméterek mellett a kielégíteni kívánt hőigény elvárt hőmérséklete és a szükséges hőmennyiség, valamint a gazdasági szempontok ismerete is szükséges, így azt csak egyes konkrét esetekre vonatkoztatva tudjuk meghatározni.



3.3. ábra: Optimális elgőzölgesi nyomás változása különböző hőforrások esetében, az egyes bemeneti adatok változása esetén

Mindkét fenti esetben látható, hogy az összhatásfokot jelző görbe a maximuma környezetében lapos, így az optimális elgőzölgesi hőmérséklettől való kisebb mértékű eltérés nem okoz jelentős csökkenést a teljesítményben. A napkollektor hatásfoka függ a napsugárzástól, a hőhasznosítás aránya a hőhordozó közeg előremenő hőmérsékletétől, illetve mindkettőtől, valamint a kondenzátornyomáson keresztül a körfolyamat hatásfoka is függ a külső hőmérséklettől, így ezek megváltozása az optimális elgőzölgesi nyomás változását is maga után vonja. A többi paramétert állandó értéken tartva, csak a vizsgált értéket változtatva külön diagramon ábrázoltam az egyes jellemzők hatását a különböző hőforrások esetén, ezek

láthatóak a 3.3. ábrán. A külső hőmérséklet változásánál a kondenzátor hőmérséklet változásával is számoltam, megtartva közöttük a korábbihoz hasonló $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletkülönbséget, mely léghűtés esetén helytálló közelítés, hiszen a vízhűtés esetén a hűtővíz hőmérséklete nem egyezik meg minden pillanatban a külső hőmérséklettel. Geotermikus illetve hulladékhő hőforrás esetén bemeneti adatként jelenik meg a hőhordozó közeg tömegárama is, ez azonban nem befolyásolja az optimális elgőzölگési hőmérsékletet, ezt ennek megfelelően nem is ábrázoltam.

Adott bemeneti adatok esetén az elgőzölگési nyomás megválasztása egyértelműen meghatározza a körfolyamat fajlagos hőbevitelét, amelyből a teljes közölt hőmennyiség alapján kiszámítható a szerves munkaközeg tömegárama. Az elgőzölگési nyomás csak a tervezési állapotban független a tömegáramtól, egy megvalósított kiserőmű esetén a kettő kapcsolatát az adott hidraulikai rendszer viszonyai és az alkalmazott szabályozási megoldások határozzák meg.

3.2. Részterheléses üzemvitel

Az optimális kialakítás tehát csak tervezési állapotban érhető el, részterhelésen a rendszer szükségszerűen az optimálistól eltérő állapotban üzemel, ennek mértékét és hatásait ez a fejezet tartalmazza. A munkaközeg tömegárama és az elgőzölگési nyomás egymástól független változtatásának lehetőségét a turbina tiszta mennyiségi szabályozása teremtené meg, ez azonban csak elvi lehetőség, a valóságban fűvókacsoportos beavatkozással közelíthető, amelynek alkalmazása azonban ORC rendszerek esetén nem gazdaságos. Mennyiségi szabályozás nélkül a turbina gőznyelését a turbina előtti és utáni nyomás, hőmérséklet, valamint a turbina típusa és kialakítása határozza meg. A tömegáram szabályozásának lehetséges módja a fojtásos szabályozás kialakítása, mely lehetőséget biztosít arra, hogy egy szabályozó szelep beiktatásával az elgőzölگés nyomását a turbina belépő nyomásánál magasabb értéken tartsuk. A 3.1-2. ábrán láthattuk, hogy a hőforrás hatásfoka és kihasználhatósága romlik magasabb elgőzölگési hőmérséklet esetén, így annak mesterséges megemlése egyértelműen szükségtelen és az alacsony hőmérséklettartományhoz viszonyítva jelentős fojtási veszteség miatt jelentősen rontja a rendszer hatásfokát.

A fűvókacsoportos és fojtásos szabályozás kizárásával egy lehetőségünk maradt, a csúszónyomású szabályozás alkalmazása, amely tulajdonképpen azt jelenti, hogy nem építünk be semmilyen szabályozási megoldást a turbina elé. Ebben az esetben a turbina előtti nyomás megegyezik az elgőzölگés nyomásával, és a tömegáramtól való függését a gőznyelést leíró

összefüggés határozza meg. Hagyományos erőművi gőzturbinák esetén a gőznyelés jól leírható a Stodola-féle összefüggéssel:

$$\dot{m}_G = k \cdot \frac{p_{be}}{\sqrt{T_{be}}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_{ki}}{p_{be}}\right)^2} \quad (3.2)$$

ahol $\dot{m}_G$ a gőz tömegárama [kg/s], p_{be} és p_{ki} a turbina előtti és utáni nyomás [bar], T_{be} a turbina előtti gőzhőmérséklet [°C], k pedig a turbinára jellemző állandó, mely a tervezési állapot adatai alapján határozható meg. A Stodola-összefüggés alkalmazási feltételei közt szerepel, hogy a turbinában nem történik hangsebesség feletti áramlás, így általában több fokozatú, reakciós turbinák leírására alkalmas. ORC rendszerekben, főleg kis teljesítményen általában egyfokozatú, gyakran radiális turbinát alkalmaznak, amelyben az egyetlen fokozatra jutó jelentős nyomásesés miatt hangsebesség feletti áramlás alakul ki. Akciós turbinafokozatok jellemzésére az alábbi egyenlet szolgál:

$$\dot{m}_G = k \cdot \frac{p_{be}}{\sqrt{T_{be}}} \cdot \Psi(\varepsilon) \quad (3.3)$$

ahol $\varepsilon = p_{ki}/p_{be}$ a nyomásviszony, Ψ pedig ettől az alábbi módon függ:

$$\Psi = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^\kappa} - \varepsilon^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (3.4)$$

ahol κ a gőz adiabatikus kitevője. A kritikus nyomásviszony az az érték, amelynél a hangsebességű áramlás kialakul, és az alábbi képlettel számítható:

$$\varepsilon_{krit} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.5)$$

Amennyiben a nyomásviszony a kritikus értéknél alacsonyabb, a kilépő nyomás további csökkenése már nem eredményezi a sebesség, és így a tömegáram további növekedését, tehát a (3.46) egyenletben Ψ értékét az ε_{krit} behelyettesítésével kell számolni [20]. A túlhevített gőzre jellemző $\kappa = 1,33$ értékkel számolva $\varepsilon_{krit} = 0,54$, melyből $\Psi_{max} = 0,57$. Az általam vizsgált rendszerekre jellemző nyomásértékek alapján egyfokozatú turbina esetén a nyomásviszony minden megvalósítható terhelési szinten a kritikus alatt van, így minden üzemállapotban kialakul a hangsebesség feletti áramlás, a tömegáram tehát csak a turbinába belépő gőz paramétereitől függ. A jellemzően magas nyomásviszonyok esetén a (3.2) egyenlet utolsó gyökös tényezője is közelíthető 1-gyel, így a Stodola-összefüggéssel leírható turbinák is hasonlóan viselkednek.

A munkaközeg tömegárama a (3.3) egyenlet alapján áramlási szempontból egyedül az elgőzölgés hőmérsékletétől és egy tetszőlegesen megválasztható állandótól függ, így a bemenő

adatok függvényében az elgőzölgesi hőmérséklet valós alakulása is ábrázolható. Az erre vonatkozó diagramokat nagy számuk miatt dolgozatomban törzsszövegébe nem illeszttem be, mivel azonban nagyban segítik a jelenségek megértését és számos fontos információ leolvasható róluk, az 1. függelékben megjelenítem ezeket. A függelék az elgőzölgesi hőmérséklet optimális és valós lefutásán kívül az ezekhez tartozó maximális és valós hatásfokot ábrázoló diagramokat is tartalmazza, melyeken látható, hogy a részterhelés miatt előálló nem optimális üzemelés során mennyivel alacsonyabb a villamosenergia-termelés hatásfoka az adott bemenetekhez tartozó elvileg elérhető legnagyobb értéknél.

Nem koncentrátoros naphőerőművek közül egy vákuumcsöves kollektort tartalmazó rendszerre végeztem el a számításokat, az eredmények és jelenségek azonban hagyományos és vákuumos síkkollektor esetén is hasonlóak. A sugárzás csökkenésének hatására az elgőzölgesi hőmérséklete szinte az optimális értékkel megegyező módon csökken (F1.1. ábra), így a csúszónyomású szabályozás önmagában garantálja, hogy a rendszer minden sugárzási szinten az optimális állapot közelében, a maximálisnál alig alacsonyabb hatásfokkal működjön (F1.2. ábra). A külső hőmérséklet változásának hatására az elgőzölgesi hőmérséklet a valóságban az optimálisnál kisebb mértékben változik (F1.3. ábra), így a tervezési külső hőmérsékletnél magasabb és alacsonyabb értékek esetén a hatásfok észrevehetően elmarad az elméleti maximumtól (F1.4. ábra).

A koncentrátoros kollektort használó naphőerőmű esetén a tendenciák némileg eltérőek, aminek forrása, hogy itt az elgőzölgesi hőmérsékletet általában nem a hatásfokból fakadó optimum, hanem a munkaközegre megengedhető maximális hőmérséklet szabja meg. A sugárzás csökkenésével az alacsony értékektől eltekintve a legjobb hatásfokot eredményező elgőzölgesi hőmérséklet a maximálisan megengedhető állandó érték, míg a valós hőmérséklet a bevitt hő mennyiségének változásából adódóan folyamatosan változik (F1.5. ábra), így a valós hatásfok részterhelésen jóval elmarad az elvi maximumtól (F1.6. ábra). A külső hőmérséklet hatása itt is az előző fejezetben leírtakhoz hasonló (F1.7-8. ábra).

A geotermikus vagy hulladékhő hőforráson alapuló kiserőművek esetén a hőhordozó közeg hőmérsékletének változásakor a valós elgőzölgesi hőmérséklet közel az optimálisnak megfelelően alakul (F1.9. ábra), így a hatásfok a bemenő hőmérséklet széles tartományban történő változása esetén is az elméleti maximummal egyezik meg (F1.10. ábra). A külső hőmérséklet változása a (3.3) egyenletnek megfelelően a gőz tömegáramát és a valós elgőzölgesi hőmérsékletet egyáltalán nem befolyásolja, míg optimális állapotban az alacsonyabb külső hőmérséklethez alacsonyabb elgőzölgesi hőmérséklet tartozna (F1.11. ábra),

így a hatásfok magas és alacsony hőmérsékletek esetén elmarad az elméleti maximumtól (F1.12. ábra). A hőhordozó közeg tömegáramának változása pont ellentétes eredménnyel jár: az elméleti elgőzölgési hőmérséklet nem függ a tömegáramtól, a fejlesztett gőz mennyisége, és emiatt a valós elgőzölgési nyomás azonban igen (F1.13. ábra), így a tervezési értéknél magasabb és alacsonyabb tömegáram egyaránt a hatásfok csökkenését eredményezi (F1.14. ábra). A bemutatott jelenségek tanulsága, hogy geotermikus és hulladékhő hőforrás esetén az ORC méretezésénél a hőhordozó közeg tömegárama a meghatározó szempont, mivel ugyanazon rendszer különböző hőmérsékletű hőhordozó közegek esetén is képes az elméleti maximális hatásfok közelében működni.

A rendszer tervezési állapota az a pont, ahol az elgőzölgési nyomást az optimális értékre választhatjuk, így az ennek megfelelő üzemállapotban a kiserőmű az elméleti maximális hatásfokán képes működni, minden egyéb pontban azonban csak annál alacsonyabb értéken. A tervezési állapotot úgy kell megválasztani, hogy a rendszer a teljes élettartama során lehetőség szerint a legtöbb energiát termelje, tehát a hatásfoka a gyakorlatban előforduló üzemállapotok együttesében minél közelebb legyen az elméleti maximumhoz. Napkollektoros ORC rendszerek a napsugárzás folyamatos változása miatt teljes élettartamuk alatt részterhelésen üzemelnek, így lényeges a tervezési állapothoz tartozó sugárzás helyes megválasztása, melyre vizsgálataim alapján 600 W/m^2 az esetek többségében megfelelő érték. Koncentrátoros napkollektoros naperőmű esetén a tervezési szempontok némileg eltérőek, mivel figyelembe kell venni, hogy az elgőzölgési hőmérséklet semmilyen üzemállapotban sem haladhatja meg a munkaközegre megengedett maximális értéket. Az 1. függelék diagramjai alapján látható, hogy az elgőzölgési hőmérséklet a sugárzás és a külső hőmérséklet növelésével egyaránt növekszik, így ezek előforduló legnagyobb értékére kell az ellenőrzést elvégezni. Geotermikus és hulladékhő hasznosítása esetén a hőforrás általában állandó jellemzőkkel áll rendelkezésre, így a rendszer is állandósult állapotban működhet, ilyenkor természetesen erre érdemes méretezni.

A fenti megfontolások során a villamos energia termelés maximalizálására törekedtünk, a teljes kiserőmű gazdaságosságát azonban további tényezők is meghatározzák. Alacsonyabb elgőzölgési hőmérséklet esetén a hőforrás oldalán, magasabb hőmérsékletnél pedig a körfolyamban lép fel nagyobb veszteség, melyek közt fontos különbség, hogy míg a hőforrás vesztesége külön beavatkozás nélkül jelentkezik, a körfolyamat veszteségét a hűtőrendszeren keresztül el kell vonni. A kiserőmű költségoptimuma szempontjából az elgőzölgési hőmérsékletet érdemes az eddigiekben bemutatott optimumnál valamivel magasabbra

választani, mivel így alacsonyabb lesz a körfolyamat hűtésigénye és az ehhez kapcsolódó költség is.

Az ORC részterhelésű üzeme szempontjából nagy jelentősége van az előmelegítő-elgőzöltető hőcserélő kialakításának is. Az 1. függelékben szereplő diagramok alapján látható, hogy a körfolyamat elgőzöltési hőmérséklete és nyomása, főként naphőerőművi rendszereknél folyamatosan és jelentős mértékben változik az üzemelés során. Az elgőzöltési hőmérséklet változása minden munkaközeg esetében maga után vonja az előmelegítéshez és elgőzöltetéshez szükséges hő részarányának megváltozását is, hiszen a magasabb hőmérsékletre történő melegítés több hőt igényel, a párologáshő azonban alacsonyabb értékű. A hőigények arányának változása azt eredményezi, hogy az elgőzöltés kezdőpontja a különböző üzemállapotokban vándorol az előmelegítő-elgőzöltető hőcserélő felületén.

Előmelegítés során, főleg az alkalmazott munkaközegek jellemzően alacsony hővezetési tényezőjének kompenzálására magas áramlási sebesség szükséges egy kielégítő hőátadási tényező eléréséhez, amely a munkaközegnek egy hőcserélő csőterében történő áramoltatásával érhető el. Az elgőzöltéshez már nem szükséges magas áramlási sebesség, a munkaközeget egy gőzfejlesztő hőcserélő köpenyterében elgőzöltetve a kilépő telített gőz is könnyedén biztosítható. Az eltérő követelmények miatt tehát célszerű lenne az előmelegítő és elgőzöltető térbeli elkülönítése, az elgőzöltés kezdetének elmozdulása miatt azonban bizonyos esetekben az elgőzöltés már az előmelegítő csövekben elkezdődhet, máskor pedig aláhűtött folyadék jut az elgőzöltetőbe. Az ebből fakadó problémák elkerülhetőek egyetlen hőcserélő alkalmazásával, melynek csőterében történik az előmelegítés és elgőzöltetés is, ekkor azonban a keletkező gőz jelentős áramlási sebessége miatti nyomásvesztések jelentenek problémát. A turbinára jutó közeg telített gőz állapot biztosítása megoldható egy, a hőcserélő után beiktatott szeparátorral, ez azonban a leválasztott nedvesség visszavezetése miatt rontja a körfolyamat hatásfokát, illetve bizonyos mértékű túlhevítés megvalósításával, amely azonban a nyomásvesztés további növekedéséhez vezet. A fenti példán is látható, hogy a részterheléses üzem a hatásfok csökkenése mellett bizonyos üzemviteli kérdések szempontjából is hátrányos, így célszerű lenne a kiserőmű folyamatos állandósult állapotban történő üzemeltetése. Geotermikus és hulladékhő hőforrás esetén ez legtöbbször könnyedén megvalósítható, naphőerőműveknél azonban csak a kollektor és a körfolyamat közé beiktatott hőtároló segítségével van erre lehetőség.

A részterheléses üzemvitelt döntően befolyásolják a kiserőmű szabályozási megoldásai, így röviden ezeket is összefoglalom. A csúszónyomású turbinaszabályozás egyértelmű előnyeit az

1. függelék táblázatai is alátámasztják, így további számításaim során minden esetben ezt veszem figyelembe. A körfolyamat működtetéséhez így egyetlen szabályozási körre van szükség, amely biztosítja a szivattyú által keringtetett tömegáram és a turbina gőznyelésének egyenlőségét. A szabályozó beavatkozási pontja minden esetben a szivattyú fordulatszáma vagy a szivattyú után beiktatott szabályozó szelep helyzete, a szabályozott jellemző pedig köpenytéri elgőzölögtetés esetén az elgőzölögtető folyadékszintje, csőtéri elgőzölögtetés esetén pedig a kilépő hőmérséklet vagy fajlagos gőztartalom lehet.

A kiadott villamos teljesítmény szabályozására a bevitt hőmennyiségen keresztül van lehetőség a hőhordozó közeg tömegáramának változtatásával. A rendelkezésre álló maximális hőmennyiség általában adott, így az időjárásfüggő megújuló energiaforrásokhoz hasonlóan csak leszabályozásra van lehetőség, amely az esetek többségében gazdasági szempontból kedvezőtlen. Tároló alkalmazása esetén lehetőség nyílik a turbina teljesítményszabályozására, mely által a kiserőmű a VER szabályozásához hozzájárulva bizonyos többlet bevételekre is szert tehet, illetve szigetüzemű rendszer villamos oldali energiatárolók nélküli létesítését is lehetővé teszi.

A hűtőrendszer üzemeltetése szabályozás nélkül is megvalósítható, hiszen a kondenzátornyomás a rendelkezésre álló hűtőközeg hőmérséklete és tömegárama alapján magától beáll az egyensúlyi állapotba. Az optimális működés biztosítása szempontjából azonban célszerű lehet a hűtőközeg tömegáramának vagy felmelegedésének szabályozása, melyek közül én utóbbit feltételeztem dolgozatomban, tehát a hűtőközeg felmelegedésének mértékét állandónak tekintettem. A bemutatott szabályozási körökön kívül még további vezérlések, védelmi működések valamint nyomás- és hőmérséklet határoló beavatkozások is szükségesek a rendszer biztonságos üzeméhez, melyeket azonban nem részletezek, mivel nincsenek kihatással a rendszer üzemére.

4. GAZDASÁGOSSÁGI SZEMPONTOK

Az energetikai beruházások értékelésénél a gazdaságosság elsődleges szempont, mivel az esetleges műszaki akadályok elhárulta után ezen múlik a beruházás megvalósíthatósága. Az energiatermelő rendszereket jelentős tőkeigény jellemzi, különösen igaz ez az általam vizsgált megújuló energiaforrásokon alapuló kiserőművekre, ahol a hőforrás ingyenes rendelkezésre állása révén a kiadások döntő részét a kezdeti beruházási költség alkotja. Gazdasági szempontból fontos jellegzetesség az előállított termékek, a villamos energia és a hő speciális volta, hiszen ezek sajátosságai és árazási módjai jelentősen eltérnek más hagyományos termékektől. Villamos energia esetén akár a nagy távolságú szállítás is alacsony veszteségek mellett megoldható, nagy mennyiségű tárolásra azonban még nincsenek gazdaságos módszerek, így az ára elsődlegesen az előállítás idejétől és rugalmasságától, nem annak helyétől függ. A termelt hő ezzel ellentétben csak viszonylag kis távolságon szállítható, így értékesíthetőségét a kiserőmű környezetében rendelkezésre álló hőigény határozza meg, a napi szintű tárolhatóság miatt a termelés időbelisége csak másodlagos szempont.

A beruházások gazdaságosságának értékelésére statikus és dinamikus gazdasági számítások készíthetők. A statikus számítások elhanyagolják az időbeli hatásokat és egy átlagos időszak adatai alapján számolnak, ennél fogva egyszerűen elvégezhetők, míg a dinamikus módszerek az egyes pénzáramok időbeliségét figyelembe véve pontosabb, de összetettebb számításokat eredményeznek. Bizonyos keretek között mindkét módszer alkalmas és használatos is az energetikai beruházások értékelésére, az általam vizsgált rendszerek leírására azonban a dinamikus gazdasági modellt tartom alkalmasabbnak, ezért munkám során ennek alapján végeztem számításokat. A beruházások sajátosságaiból adódóan megengedhető egyszerűsítések és elhanyagolások segítségével a dinamikus számítás is könnyen kezelhető alakra hozható, mely szemléletesen fejezi ki a megtérülést befolyásoló különböző tényezők hatását.

A dinamikus gazdaságossági modell lényege, hogy figyelembe veszi a különböző kiadásokat és bevételeket, majd ezeket a pénz időértékét számításba véve összegzi. Alapvető összefüggése a nettó jelenérték számítás, amely a beruházás teljes időtartama alatt összegzi a jelentkező pénzáramok jelenértékét az alábbiak szerint:

$$NPV = \sum_{t=0}^n PV_t = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4.1)$$

ahol NPV a nettó jelenérték (net present value) [Ft], t az adott időszak sorszáma [-], n a vizsgált időszakok száma [-], PV_t a t . időszakban jelentkező pénzáramok jelenértéke [Ft], C_t a nettó pénzmozgás a t . időszakban [Ft], r pedig a diszkontráta [-]. A vizsgálati időszakok hosszát tulajdonképpen tetszőlegesen megválaszthatjuk, célszerű azonban figyelembe venni a pénzáramlások időszakosságát és periodicitását, mivel időszakonként megegyező nettó pénzáramok esetén a számítási összefüggés jelentősen egyszerűsíthető. A számítást általában éves szinten végzik, amely esetünkben is megfelelő, hiszen a kiserőmű várhatóan hosszú megtérülési ideje mellett elegendő felbontást eredményez.

A pénz időértékét kifejező diszkontráta tulajdonképpen a befektetéshez tartozó elvart hozamráta, amely kifejezi, hogy egy időszak alatt mekkora hozamot várunk a befektetéstől, meghatározása pedig több különböző értelmezés alapján is történhet. Az elvart hozam függ a beruházás kockázatától, magasabb kockázat esetén magasabb hozamot várhatunk, így a befektetés kockázatának ismeretében a diszkontráta az azonos kockázatú befektetési alternatívák jellemző hozamrátajával azonosnak tekinthető. Másik értelmezés szerint a tőke alternatívaköltségét jelenti, tehát a vizsgált lehetőségen kívüli második legjobb befektetési alternatíva hozamával egyezik meg, ekkor a nettó jelenérték azt mutatja meg, hogy mennyivel kedvezőbb a vizsgált befektetés a következő alternatívánál. A diszkontrátát megfeleltethetjük a kamatlábnak is, minthogy befektetési alternatívaként a pénz banki lekötésére minden esetben lehetőség van. Amennyiben a beruházás banki hitelre támaszkodva valósul meg, a pénz időértékét a felvett hitel kamata határozza meg, így azzal célszerű számolni.

Az általam vizsgált, megújuló energiaforrásokat hasznosító kiserőművek jellemzője a magas beruházási költség, amely a rendszerek viszonylag kis teljesítményéből és méretéből fakadó rövid létesítési idő miatt egy egyszeri kiadásnak tekinthető a 0. évben. A kiserőmű bevételei az értékesített energiából származnak, így az éves bevételeket az adott évben termelt villamos és esetlegesen hőenergia és ezek átvételi árának szorzata adja meg. Az üzemeltetési költséget döntően a karbantartási költség jelenti, amely a termelt energiától függetlenül, éves szinten állandó kiadást jelent. A költségek megoszlásának figyelembe vételével a nettó jelenérték számítása az alábbi módon történhet:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{c_{E,t} \cdot E_t + c_{Q,t} \cdot Q_t - C_{ü,t}}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4.2)$$

ahol C_0 a beruházási költség [Ft], $c_{E,t}$ a villamos energia értékesítési egységköltsége a t . évben [Ft/kWh], E_t a termelt villamos energia mennyisége a t . évben [kWh], $c_{Q,t}$ a hő értékesítési egységköltsége a t . évben [Ft/kJ], Q_t a termelt hőmennyiség a t . évben [kJ], $C_{ü,t}$ az üzemeltetési

költség a t . évben [Ft]. A karbantartások és ellenőrzések általában éves rendszerességgel szükségesek, így az üzemeltetési költséget is minden évben azonosnak tekintetem, feltételezve, hogy a rendszeres megelőző karbantartások hatására semmilyen váratlan költség nem lép fel a rendszer élettartama során. A kiserőmű teljesítményét befolyásoló környezeti jellemzők éves periodicitással változnak, így a megtermelt villamos energia és hő mennyisége is minden évben állandónak tekinthető. Az energia átvételi ára a több évtizedes működési idő alatt igen nagy mértékben változhat, ennek irányára és nagyságára azonban nem készíthetők megbízható előrejelzések, a megújuló alapú energia támogatott átvételi ára azonban bizonyos mértékű árgaranciát is jelent, így ezeket is állandónak tekinthetjük. Éves szinten megegyező pénzáramokat feltételezve a befektetés nettó jelenértéke az alábbi összefüggéssel is számítható:

$$NPV = (c_E \cdot E + c_Q \cdot Q - C_{\ddot{u}}) \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r \cdot (1 + r)^n} \right) - C_0 \quad (4.3)$$

A nettó jelenérték számítása során az elvart hozamot a pénz időértékét kifejező diszkontráta segítségével figyelembe vettük, így a megtérülés határállapotát a nulla NPV fejezi ki: pozitív értéke a vártnál nagyobb hozamot jelent, így negatív érték esetén a befektetés nem térül meg az elvart hozammal. A megtérülési határra vonatkozó $NPV = 0$ összefüggést felhasználva kapcsolatot teremthetünk a (4.2) és (4.3) egyenletek jobb oldalán szereplő összefüggések közt. A (4.3) egyenlettel egyszerűbb és átláthatóbb a számítás menete, amennyiben azonban a levezetése során tett feltétel, az éves bevételek állandósága nem teljesül, a (4.2) egyenlet használandó. A gazdaságossági számításokat ennek megfelelően többféleképpen is elvégezhetjük, annak megfelelően, hogy melyik mennyiségek ismertek, és mire vagyunk kíváncsiak az egyenletben.

A gyakorlatban használt egyik legelterjedtebb mutató a megtérülési idő, amelyet n jelöl a fenti egyenletekben, és számításához ismernünk kell a beruházási költséget, az éves bevételeket és az elvart hozamrátát. Értékét a (4.3) egyenlet alapján közvetlenül is kifejezhetjük, míg a (4.2) egyenlet használatával addig kell végeznünk az összegzést, amíg az NPV előjelet nem vált, és az ehhez tartozó év jelenti a megtérülés idejét. Egy energetikai beruházást alapvetően akkor érdemes megvalósítani, ha a megtérülési idő rövidebb a kiserőmű tervezett élettartamánál, amely alatt azt az időszakot értem, amíg a rendszer a főbb berendezések meghibásodása vagy a karbantartásigény jelentős megnövekedése nélkül képes üzemelni. Az általam vizsgált kiserőművek élettartama az energetikai gépek és rendszerek többségéhez hasonlóan viszonylag hosszú, több évtizedre tehető, a befektetők többsége azonban a 10 évnél lassabban megtérülő befektetésektől már erősen ódzkodik, így a beruházás tényleges megvalósításához általában nem elegendő az élettartamon belüli megtérülés. A hosszú távú befektetésektől való általános

főelem mindamellett érthető, mivel a számítások során tett előrejelzések, feltételezések és közelítések az időtáv növekedésével egyre pontatlanabbak, így a hosszú távú befektetések kockázata általánosan nagyobb, mint a rövidebbeké. Magasabb kockázat esetén az elvárt hozam is növekszik, így a megtérülési idő számításánál néhány lépéses iteráció alkalmazása is indokolt lehet, melynek során az első lépésben számolt megtérülési idő alapján módosítjuk a diszkontrátát az adott időtávra érvényes elvárt hozamnak megfelelően.

A befektetések gazdaságossági értékelésére szolgáló másik elterjedt mutató a belső megtérülési ráta, amely azt a diszkontrátát jelenti, melynek esetében egy adott időtartamra számított nettó jelenérték éppen nulla. A belső megtérülési rátára ilyenkor az r helyett az IRR (internal rate of return) jelölést használjuk. Számítása a beruházási költség és a bevételek, és a vizsgált időszak hosszának ismeretében a (4.2) és (4.3) egyenlet alapján is történhet, explicit módon azonban egyikből sem fejezhető ki, meghatározásához mindkét esetben iteráció szükséges, amely azonban napjaink számítógépes lehetőségei mellett nem jelent komoly nehézséget. A vizsgált időszak n hosszának alapvetően a rendszer tervezett élettartamát érdemes választani, de az előző bekezdésben említett gyorsabb megtérülési elvárások miatt az IRR rövidebb időszakra, a befektetés elvárt megtérülési idejére is számítható. Egy beruházást akkor érdemes megvalósítani, ha a belső megtérülési rátára számított érték eléri vagy meghaladja a befektető adott időtávra vonatkozó elvárt hozamrátáját.

Amennyiben a befektetőnek konkrét elvárásai vannak a megtérülési idő és a hozam tekintetében, tehát n és r ismert, akkor a beruházási költség és a várható éves bevételek közti kapcsolat is meghatározó, és bármelyik ismeretében a másik számítható. A (4.3) egyenlet átalakításával kifejezhető az éves bevételek és beruházási költségek aránya a megtérülés határállapotára, $NPV = 0$ esetre vonatkoztatva:

$$r \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)^{-1} = \frac{c_E \cdot E + c_Q \cdot Q - C_0}{C_0} \quad (4.4)$$

Az egyenlet jobb oldala csak n és r függvénye, így ezek ismeretében a bevételek és költségek aránya is adott. A bal oldali tag határértéke $r \rightarrow 0$ esetében pontosan $1/n$, a megtérülési idő reciproka, a pénz időértékének elhanyagolásával tehát a fenti egyenletből is az egyszerű megtérülési idő számítási módját kapjuk. Pozitív diszkontrátát feltételezve, amely nagyon kivételes válsághelyzetektől eltekintve mindig helytálló, az egyszerű megtérülési idő alacsonyabb a tényleges megtérülés idejénél, így annak alsó becsléseként alkalmazható. A bal oldali tag másik hasonló, nevezetes határértéke $n \rightarrow \infty$ esethez tartozik, értéke pedig pontosan az r diszkontráta, amennyiben tehát a bal oldalon szereplő költségek aránya ennél kisebb, akkor a

beruházás soha nem térül meg. A módszer segítségével közelítő felső becslés készíthető a várható hozamra vonatkozóan, mely szerint az éves bevételek és a beruházási költség arányánál csak kisebb hozam érhető el. A fenti két módszer előnye, hogy a számítás a költségek ismeretében egyetlen osztással elvégezhető, és túl hosszú megtérülési idő vagy túl alacsony hozam esetén a bonyolultabb számítás elvégzése nélkül is elvethető a beruházás.

Dolgozatomban a villamosenergia-termelés mellett a kapcsolt hőtermelés lehetőségeit is figyelembe veszem. A hőkiadás általában csak a termelt villamos energia csökkenésének árán valósítható meg, így gazdaságossági szempontból is fontos kérdés, hogy mennyi villamos energiát érdemes feláldozni adott mennyiségű hő előállítására érdekében. Elsődleges szempont, hogy a hőtermelés kialakítása miatt ne csökkenjenek a kiserőmű éves bevételei, tehát az értékesített hőből több bevétel keletkezzen a meg nem termelt villamos energiából fakadó kiesésnél, az erre vonatkozó feltételt az alábbi egyenlet írja le:

$$Q \geq \frac{c_E}{c_Q} \cdot \Delta E \quad (4.5)$$

ahol ΔE a termelt villamos energia [kWh] csökkenése Q hőmennyiség [kWh] kiadásának hatására. A módszer előnye, hogy pusztán az egységköltségek alapján elvégezhető a számítás, a hátránya azonban, hogy csak alsó becslésként alkalmazható, mivel nem veszi figyelembe a beruházási költségek hőtermelésből fakadó megnövekedését. A villamos energia egységköltsége országos szinten állandó érték, a hő egységköltsége azonban a helyi hőigénytől és viszonyoktól is függ, a (4.5) egyenlet ennek megfelelő átrendezésével ΔE és Q ismeretében az is számítható, hogy milyen hő egységköltség felett érdemes a kapcsolt hőtermelés megvalósítása. Pontos számítás elvégzése esetén akkor tekintjük gazdaságosnak a kapcsolt hőtermelést, ha megvalósításának hatására javul az éves bevételek és a beruházási költség hányadosa, utóbbi tehát kisebb arányban nő a bevételek növekedésénél. A számításhoz az egységköltségek mellett a beruházási költségek eredeti értékét és megváltozását, valamint a termelt energia mennyiségét is tudnunk kell, ezek ismeretében azonban ez a módszer is könnyen használható.

Az ORC kiserőművek elsődlegesen villamos energia termelésre szolgálnak, a kapcsolt hőkiadás csak bizonyos esetekben, a gazdaságosság javítása céljából kerül megvalósításra. A gazdasági számítást ennek megfelelően elsőként mindig érdemes tisztán villamosenergia-termelés esetére elvégezni, majd az erre kapott eredményekkel összevetve értékelni a kapcsolt hőtermelés megvalósíthatóságát. Az éves üzemeltetési, karbantartási költségek általában a bevételeknek csak kis hányadát teszik ki, így ezeket elhanyagolva és hőkiadás hiányában az éves bevételek egyszerűen a termelt villamos energia és az átvételi ár összegeként

számíthatóak. A beruházási költségek felírásához célszerű bevezetni a fajlagos beruházási költség fogalmát, amely az egységnyi beépített teljesítményre jutó költséget jelenti. A fentiek alapján a (4.4) egyenlet az alábbi alakba írható:

$$r \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)^{-1} = \frac{c_E \cdot E}{a \cdot P_0} = \frac{c_E}{a} \cdot \tau_{cs} \quad (4.6)$$

ahol a jelöli a beruházási költséget [Ft/kW], P_0 pedig a kiserőmű névleges, beépített teljesítményét [kW], τ_{cs} pedig az éves csúcskihasználási óraszám [h], mely az éves szinten termelt energia és a névleges teljesítmény hányadosa. A (4.6) egyenlet előnye, hogy csak fajlagos jellemzőket tartalmaz, így a rendszerméret ismerete nélkül is végezhetőek számítások vele, mivel a beruházás gazdaságossága csak a villamos energia átvételi áratól, a fajlagos beruházási költségtől és a csúcskihasználási óraszámától függ.

4.1. táblázat: Jelenleg érvényes villamos energia átvételi árak a KÁT rendszerben [22]

Villamos energia kötelező átvételi ára [Ft/kWh]			
Időszak	Csúcs	Völgy	Mélyvölgy
20 MW vagy annál kisebb naperőműben termelt	32,49	32,49	32,49
20 MW vagy annál kisebb erőműben (kivéve: naperőmű) termelt	36,30	32,49	13,26
20 MW-nál nagyobb, de legfeljebb 50 MW-os erőműben termelt	29,04	25,99	10,60

A villamos energia átvételi ára az általam vizsgált, megújuló hőforrásokat hasznosító kiserőművek esetében nem a piaci, hanem egy támogatott árat jelent, melynek formája jelenleg a kötelező átvételi (KÁT) rendszer. A támogatott, átvételi kötelezettség alá eső termelők csatlakozhatnak a villamos energiáról szóló törvény rendelkezéseinek megfelelően a MAVIR ZRt. által létrehozott KÁT mérlegkörbe, amely a termelt villamos energia piaci viszonyoktól független, kötelező átvételét, valamint a piacinál magasabb, támogatott átvételi árat jelent [21]. Az átvételi árak az energia átvételi időszakától és a kiserőmű típusától és névleges teljesítményétől is függenek az 4.1. táblázat szerint [22]. Az éjszakai, mélyvölgy időszakra a 20 MW alatti naperőművek kivételével alacsony átvételi ár jellemző, ezzel ösztönözve a kiserőmű tulajdonosát a villamosenergia-rendszer (VER) napi teljesítményingadozásainak kiegyenlítéséhez történő hozzájárulásra a teljesítmény szabályozása vagy energiatároló beépítése által. Naperőművek esetében a mélyvölgy időszakban történő termelés csak tárolás esetén valósítható meg, így ott szintén a tárolás ösztönzése miatt tartják magasán éjszaka is az

átvételi árat. Az általam vizsgált kiserőművek jellemző mérete 20 MW alatti, így napenergia hőforrás esetén 32,49 Ft/kWh átvételi árral számolhatunk. A geotermikus hőforrás alkalmazása esetén egész napos folyamatos energiatermelést is feltételezhetünk, melynek esetében az átlagos átvételi ár 31,27 Ft/kWh, melyet a fenti táblázatban a különböző időszakokra vonatkozó áraknak az időszakok heti hosszával súlyozott átlagaként kaptam.

A megújuló és alternatív energiaforrásokból előállított hő- és villamosenergia-átvételi támogatási rendszer (METÁR) egy 2011-ben kidolgozott törvénytervezet a KÁT rendszer leváltására [23], bevezetése azonban 2013 óta késlekedik, és időpontja ma sem ismert. A kiadott tervezet alapján meglehetősen differenciált támogatási rendszerre számíthatunk, mivel az ártámogatás időtartama és az átvételi tarifa egyaránt függ a megújuló energia típusokon belül alkalmazott technológiától és rendszermérettől is, külön táblázat tartozik például a geotermikus alapú, ORC vagy Kalina körfolyamattal megvalósított kapcsolt energiatermelés támogatására. A tervezet szerint egy minimális határfok küszöb is várható, amelyet meg kell haladni a kiserőműnek a támogatás érdekében, erre vonatkozó számszerű adatokat azonban nem tartalmaz a dokumentum.

A csúcskihasználási óraszám az általam vizsgált esetekben főként a technológiától és a hőforrástól függ, a kiserőmű teljesítménye nem befolyásolja jelentős mértékben. A csúcskihasználási óraszám helyett a vele egyenértékű kihasználási tényező is használatos, amely az éves szinten termelt és elméletileg maximálisan termelhető energia százalékos aránya, számértékét tekintve megegyezik a csúcskihasználási óraszám és az éves összes órák számának (8760 h) hányadosával. Napenergia hőforrás esetén a napsütés időbeli egyenlőtlen eloszlása miatt értéke alapvetően alacsony, amely a (4.6) egyenletnek megfelelően jelentősen rontja a beruházás megtérülését. A kihasználási tényező javításának lehetséges módja a kollektorok és a körfolyamat közé épített hőtároló alkalmazása, illetve valamilyen, praktikus biomassza alapú póttüzelés alkalmazása nem elegendő napsütés esetén. A fenti módszerek hátránya, hogy önmagukban is költségesek, valamint segítségükkel csak az ORC rendszer kihasználása növelhető, a napkollektoroké nem, amely szintén a fajlagos beruházási költség emelkedéséhez vezet. Geotermikus hőforrás esetén a kiserőmű működése folyamatos, melyet csak az éves karbantartás és az esetleges kiesések korlátoznak, így akár igen magas 8000 óra feletti csúcskihasználási óraszám is elérhető, amely kedvez a beruházás megtérülésének. Hulladék hő hasznosítása esetén a csúcskihasználási óraszámot alapvetően a mögöttes ipari folyamat működése határozza meg, azonban jellemzően minden ipari létesítményben szempont a jó kihasználási tényező. A megtérülés szempontjából tehát célszerű olyan hulladékhő hőforrást

választani, ami az év jelentős részében rendelkezésre áll, így ebben az esetben is elérhető egy kedvezőnek mondható 7000 óra feletti csúcskihasználási óraszám.

A villamos energia átvételi ára a fentiek alapján általában ismert, a csúcskihasználási óraszám is jól becsülhető, így egy adott megtérülési elvárás (n és r érték) esetén a (4.6) egyenletből kiszámolható a maximális fajlagos beruházási költség, amely felett már nem érdemes a beruházás megvalósítása. A fajlagos beruházási költség általában függ a rendszer méretétől, kis teljesítmény esetén értéke magas, majd a teljesítmény növekedésével értéke csökken. Egy adott beruházási költség ismeretében a hozzá tartozó rendszerméret megadja, hogy mi az a minimális teljesítmény, amely felett gazdaságos a kiserőmű létesítése. A gyakorlatban általában nem áll rendelkezésre korlátlan tőke, így a legkisebb gazdaságos teljesítményhez tartozó beruházási költség sok esetben meghaladja a befektető anyagi lehetőségeit.

A beruházási költség lehetséges forrása lehet a befektető saját tőkeállománya, banki hitel, vagy vissza nem térítendő pályázati támogatás. A saját tőke hátránya, hogy általában korlátozott, így a beruházás megvalósításához további befektetők bevonására lehet szükség, ami azonban sok esetben nehézkes és bizonytalan. A banki hitel hátránya az igen magas kamat, amely a számítások során magas diszkontrátát eredményez, így az általam vizsgált, hosszú megtérülésű kiserőművek többségének éves bevételei még a kamatok fedezetére sem elegendőek, így a tisztán hitelből történő építkezés csak igen ritkán kifizetődő. A fenti korlátok miatt a legtöbb esetben valamilyen pályázati támogatásra van szükség a beruházás megvalósításához, és a nemzetközi tapasztalatok is azt mutatják, hogy azokban az országokban fejlődnek dinamikusán a megújuló energiaforrások, amelyekben a befektetők jelentős állami támogatásban részesülnek. A pályázati források mellé általában valamilyen arányú önrészre is szükség van, a fentiek szerint számolt, megtérülést eredményező maximális beruházási költségnek és a rendszer megvalósításának tényleges beruházási költségének hányadosa az önrész maximális arányát határozza meg. A befektetést ennek alapján akkor érdemes megvalósítani, ha találunk olyan pályázati forrást, amely a számítottnál alacsonyabb önrész mellett támogatja a kívánt beruházást. A pályázati források jelentős hátránya, hogy ritkán és korlátozottan állnak rendelkezésre, jelenleg Magyarországon nem ismerek olyan állami pályázati lehetőséget, amely az általam vizsgált rendszerekre nyújtana támogatást. Az Európai Unió azonban több központi, de itthonról is elérhető pályázatot hirdet, ilyen például a Horizont 2020 nevezetű kutatási és innovációs pályázat [24], amelyben a kiírása alapján újszerű energetikai kutatásokra és beruházásokra is igényelhető támogatás [25].

5. SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

A Matlab modell számos különféle szimulációs vizsgálat végrehajtását tette lehetővé, amelyek segítségével meghatározhattuk az ORC rendszerek villamosenergia-termelésre vonatkozó hatásfokának alakulását a különböző esetekben, az egyes rendszerekkel éves szinten megtermelhető energia mennyiségét, valamint részletesen vizsgálhattuk a kapcsolt energiatermelés lehetőségeit is. Amennyiben a bemutatott eredményeim a tervezési állapotra vonatkoznak, akkor a 3. fejezetben bemutatott optimális elgőzölgési hőmérséklet figyelembevételével végzem el a számításokat, ha pedig egy adott rendszer részterhelésű üzemére vonatkoznak a számítások, akkor a csúszónyomású szabályozás mellett kialakuló valós elgőzölgési hőmérsékletet veszem figyelembe.

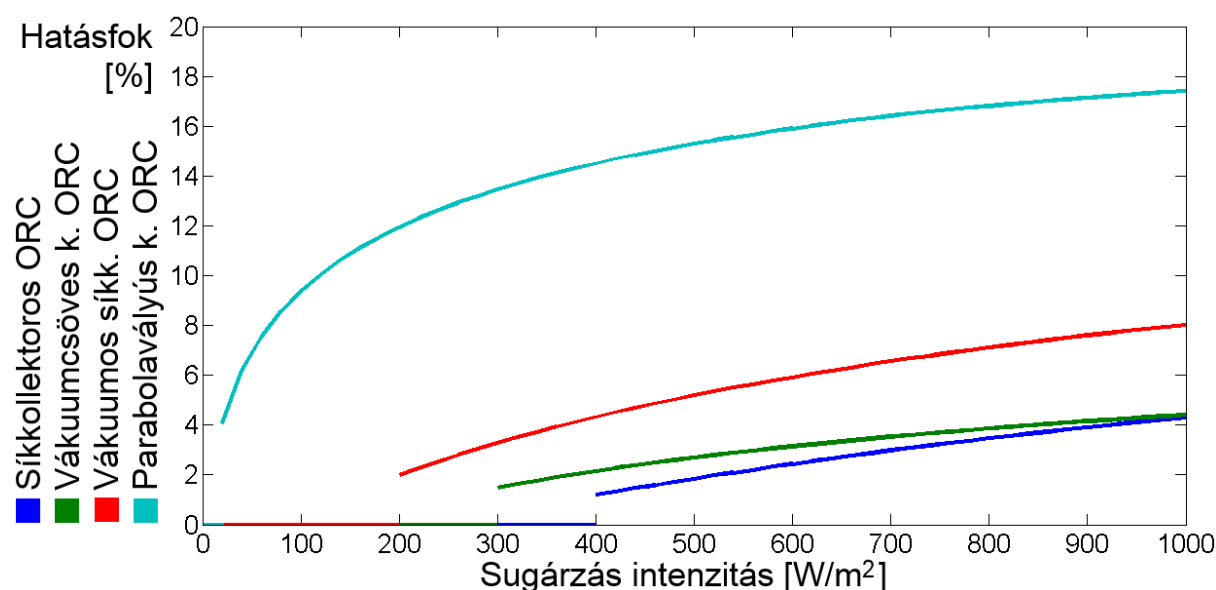
5.1. Villamosenergia-termelés hatásfoka

A különböző rendszerek villamosenergia-termelésre vonatkozó hatásfokának gazdaságossági szempontból nincs döntő jelentősége, azonban egy egyszerűen kezelhető és értelmezhető mérőszámként jó alapot nyújt a különböző rendszerek összehasonlítására. A különféle kiserőművek hatásfokát nem csak egy névleges állapotban számítottam ki, hanem ábrázoltam a különböző környezeti adatok függvényében, mely alapján jól látható ezen jellemzőknek a rendszer üzemére gyakorolt hatása.

A naphőerőművek működését befolyásoló környezeti paraméterek a sugárzás intenzitása és a külső hőmérséklet, így a hatásfokot ezek függvényében kétváltozós felület diagramként ábrázoltam. A számítást mind a négy általam vizsgált kollektor típus esetén elvégeztem, a vizsgált rendszerek leírását és a számítás eredményeit a 2. függelék tartalmazza. Mivel a napsütéses területeken általában nem áll rendelkezésre bőséges vízmennyiség a kiserőmű hűtése céljából, ezért a körfolyamatban léghűtést feltételeztem, a hűtő levegő hőmérséklete így megegyezik a külső hőmérséklettel, amely a kondenzátor hőmérsékletének folyamatos változását is eredményezi. Ennek azért van jelentősége, mert így a külső hőmérséklet csökkenése a kondenzátorhőmérséklet csökkentésén keresztül növeli a rendszer összhatásfokát, állandó kondenzációs hőmérséklet esetén azonban a hatásfok növekedése helyett kis mértékben csökkenést tapasztalunk a kollektor hatásfokának romlása miatt.

Az F2.1-4. ábrák alapján látható, hogy a naphőerőművek hatásfokát elsődlegesen a sugárzás intenzitása befolyásolja, a külső hőmérsékletnek kisebb szerepe van. A külső hőmérséklet növekedésével mind a négy vizsgált rendszer esetén, a sugárzás aktuális értékétől függetlenül

a hatásfok kis mértékű, közel lineáris csökkenését tapasztaljuk. A sugárzás csökkenése minden esetben a hatásfok csökkenését eredményezi, a csökkenés jellege és meredeksége azonban a kollektor típusától függően eltérő, a jobb szigetelésű, magasabb hőmérséklet elérését lehetővé tevő kollektorok alacsonyabb sugárzás mellett is jobb hatásfokkal képesek működni. Az 5.1. ábrán egy diagramban látható a különböző kollektorokat használó ORC rendszerek hatásfokának alakulása a sugárzás függvényében, állandó 20 °C-os külső hőmérséklet esetén. A nem koncentrátoros kollektorok esetében alacsony sugárzás mellett nem alakult ki a rendszer gazdaságos működtetéséhez szükséges minimális felmelegedés, melyet 20 °C előzőlgés és kondenzáció közti hőmérsékletkülönbségként szabtam meg, így az ábra szerinti 400, 300 illetve 200 W/m² sugárzás alatt nem javasolt a kiserőmű működtetése. Koncentrátoros napkollektor esetén elvi szinten egészen alacsony sugárzás esetén is előáll a kellő hőmérséklet, azonban az alacsony tömegáramok miatt a gyakorlatban itt sem valósítható meg tetszőlegesen alacsony részterhelésű állapot. A fenti szám adatok csak a jelenség szemléltetésére tájékoztatóként szolgálnak, az alsó működési határt jelentő sugárzás pontos értéke csak pontosan ismert, konkrét rendszerek esetében határozható meg, így a technológia általános összefoglalását célzó dolgozatomban ezzel nem foglalkozom.



5.1. ábra: Különböző kollektort tartalmazó ORC kiserőművek hatásfoka a sugárzás függvényében

Sík- és vákuumcsöves kollektorok esetén az 1000 W/m² sugárzáshoz tartozó névleges hatásfok megegyezik, mivel a vákuumcsöves kollektor jobb hőszigetelését itt még kiegyenlíti a síkkollektor magasabb optikai hatásfoka, a sugárzás csökkenésével azonban már láthatóan megmutatkozik a vákuumcsöves kollektor előnye. A vákuumos síkkollektor alacsonyabb hőveszteségi tényezői névleges állapotban és részterhelésen is jóval magasabb, közel kétszeres

hatásfokot eredményeznek. Névleges állapotban további kétszeres növekedést jelent a parabolavályús kollektort tartalmazó rendszer hatásfoka, előnye a jóval alacsonyabb sugárzásfüggése miatt a gyakrabban előforduló, így nagyobb jelentőséggel bíró közepes sugárzástartományban még jobban megmutatkozik. A fenti ábra alapján elmondható, hogy jó hatásfokú naphőerőművi villamosenergia-termelés megvalósítására csak koncentrátoros kollektorok alkalmazása esetén van lehetőség, és az alacsony hatásfokok miatt alapvetően megkérdőjelezhető, hogy érdemes lehet-e nem koncentrátoros kollektorokra alapozó ORC rendszert létesíteni. A gazdaságosság kérdésének megítéléséhez a költségek és a termelt energia mennyiségének ismeretére is szükség van, a kérdés tehát további vizsgálatokat igényel.

A napenergián alapuló villamosenergia-termelés legelterjedtebb eszközeiként a napelemek fontos összehasonlítási alapot biztosítanak, így a naphőerőművek vizsgálata során ezek releváns jellemzőinek bemutatására is ki kell térni. A korszerű napelemek jellemző névleges hatásfoka 15-16% közé esik, amelynek értékét a sugárzás csak kis mértékben befolyásolja, így annak függvényében állandónak tekinthető. A napelemek hatásfokát a külső hőmérséklet a cellahőmérséklet változásán keresztül befolyásolja, és értéke az általam vizsgált rendszerekhez hasonlóan a hőmérséklet növekedésével lineárisan csökken. A napelemek alacsony sugárzás esetén is jó hatásfoka miatt a gyengébb sugárzási adottságokkal rendelkező területeken előnyösebb a használatuk, míg a naphőerőművek telepítésére az erősen napsütötte területek az ideálisak.

A naphőerőművek hatásfoka a szükséges kollektor felülettel van összefüggésben, a hatásfok ismeretében kiszámítható az egységnyi névleges villamos teljesítményű kiserőműhöz szükséges fajlagos felület. Kollektorok esetében a hőmérséklettől függően változó hatásfok miatt azok költségét egységnyi hőteljesítmény helyett inkább egységnyi felületre érdemes fajlagosítani, így a kiserőmű egységnyi teljesítményéhez szükséges kollektor felület és a kollektorok felületre viszonyított egységköltsége alapján könnyedén számolható a fajlagos beruházási költség kollektorokból adódó része. A kollektorok fajlagos felületének különleges jelentősége van akkor, ha korlátozott a kiserőmű létesítésére szánt terület, ilyen esetekben fontos a jó hatásfokú, kis területigényű rendszerek létesítése. A négy vizsgált kiserőmű névleges hatásfokát és az egységnyi villamos teljesítményhez szükséges kollektor felületét az 5.1. táblázat foglalja össze, mely összehasonlításképp feltünteti egy átlagos napelem adatait is. A napelemekre vonatkozó, itt és a későbbiekben megjelenő adatok és számítási eredmények forrása egy korábbi, napelemes rendszerek modellezésével foglalkozó TDK dolgozatom [26].

5.1. táblázat: Különböző napenergia hasznosító rendszerek villamos hatásfoka és névleges teljesítményre vetített fajlagos felülete

Naperómű típusa	Hatásfok [%]	Fajlagos felület [m ² /kW]
Síkkollektoros ORC	4,32	23,17
Vákuumsöves kollektoros ORC	4,41	22,67
Vákuumos síkkollektoros ORC	8,02	12,46
Parabolavályús kollektoros ORC	17,41	5,74
Napelem (átlagos)	15,2	6,58

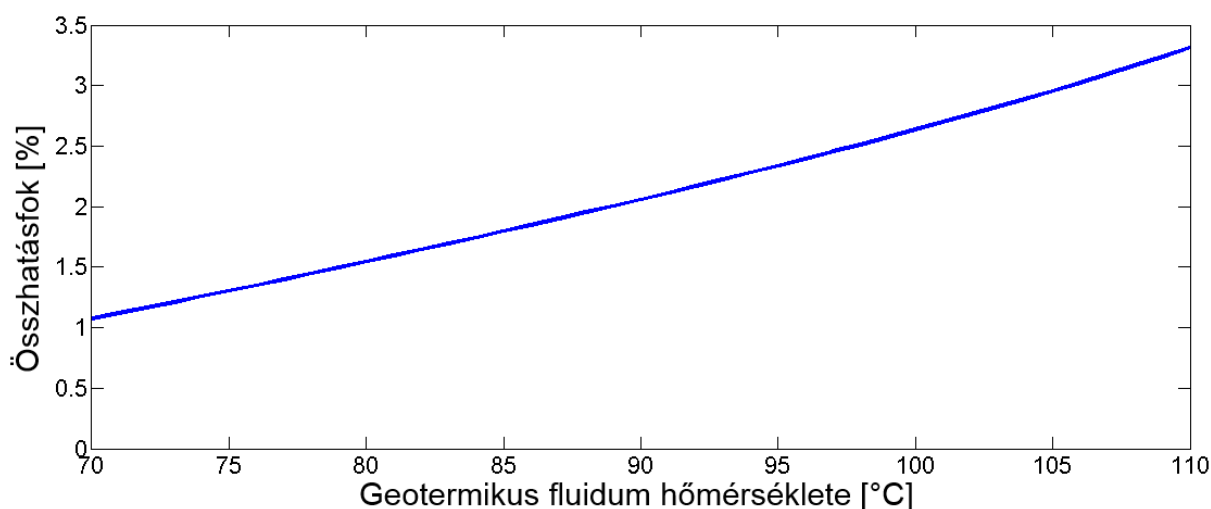
Geotermikus és hulladékhő hőforrások estén a hatásfok értelmezése is felvet bizonyos kérdéseket. A 3. fejezetben a rendszer összhatásfokát a generált villamos teljesítmény és a hőhordozóban rendelkezésre álló teljes hőteljesítmény hányadosaként definiáltam, mely esetben veszteségnek tekintjük a hőhordozó által a körfolyamatnak át nem adott hőmennyiséget is. A gyakorlatban az ORC rendszer hatásfokán általában csak a körfolyamati hatásfokot, tehát a villamos teljesítmény és a körfolyamatnak átadott hő arányát értik, amely nem veszi figyelembe a hőhasznosítás arányát, így számértékét tekintve az összhatásfoknál magasabb. A körfolyamat hatásfoka a 3.2. ábrán látottak szerint függ az elgőzölgési hőmérséklettől, és maximuma nem esik egybe az összhatásfok maximumával, tehát a körfolyamat hatásfokára akkor kapunk jól hangzó, magas értéket, amikor a ténylegesen előállított teljesítmény messze elmarad a lehetséges legnagyobb értéktől. A fenti megfontolások miatt az összhatásfokot nevezem az ORC rendszer hatásfokának egészen addig, amíg csak a villamosenergia-termelést vesszük figyelembe, és nem hasznosítjuk az elgőzölögtetőben lehűlt hőhordozó maradék hőtartalmát, a kapcsolt hőtermelés tárgyalásánál pedig külön említem majd a villamosenergia-termelés és hőkiadás hatásfokát.

A geotermikus és hulladékhő hőforrások a hőhordozó közeg hőmérsékletével és tömegáramával jellemezhetők, így elsődlegesen azt érdemes vizsgálni, hogy ezek adott értékei esetén milyen hatásfokkal telepíthető körfolyamat. A hőhordozó közeg tömegárama tervezési állapotban nem befolyásolja a rendszer hatásfokát, így a következőkben a hőhordozó tömeg hőmérsékletének függvényében ábrázolom az elérhető hatásfokot. A geotermikus kutak hőmérséklete Magyarországon jellemzően nem haladja meg a 100 °C-ot, míg a hulladékhő ennél magasabb hőmérsékleten is rendelkezésre állhat, az eltérő hőmérsékletek mellett pedig eltérő munkaközegű ORC használata eredményez kedvezőbb hatásfokot. A geotermikus

hőforrások kihasználásához propán munkaközegű szerves Rankine-körfolyamattal számoltam, melynek adatait az 5.2. táblázat tartalmazza.

5.2. táblázat: Geotermikus hőforrások kihasználására alkalmas ORC rendszer

ORC		Munkaközeg: Propán			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

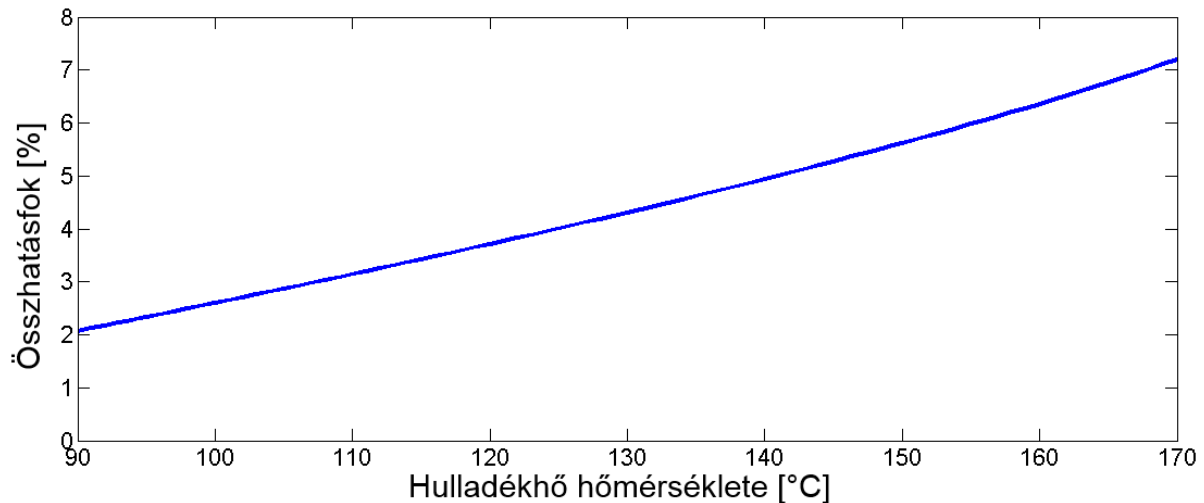


5.2. ábra: Geotermikus kútra telepített ORC rendszerrel elérhető összhatásfok tisztán villamos energia termelése esetén, a kúthőmérséklet függvényében

A különböző kúthőmérsékletek esetén elérhető összhatásfok az 5.2. ábrán látható. A hatásfok értékét a külső hőmérséklet is befolyásolja, melyet a számítás során a magyarországi éves átlaghőmérsékletnek megfelelő 10 °C-nak választottam. A kúthőmérséklet növekedésével a rendszer összhatásfoka is folyamatosan javul, értéke azonban még a hazai maximumot jelentő 100 °C-os kúthőmérséklet esetén sem éri el a 3%-ot, amely ráadásul még nem tartalmazza a visszasajtolásból fakadó önfogyasztást. A geotermikus kutak tisztán villamosenergia-termelésre történő hasznosítása tehát csak igen alacsony hatásfokkal valósíthatóak meg, így minden körülmények közt érdemes a kapcsolt hőtermelés megvalósításával javítani a kiserőmű energetikai mutatóit. Ennek lehetséges megoldásaira és energiatermelésbeli hozadékaira később, az erre vonatkozó fejezetben térek vissza.

Hulladék hő hasznosítása esetén a geotermikus kutak hőmérsékleténél magasabb hőmérsékleten is rendelkezésre állhat a hőhordozó közeg, vizsgálataimat 170 °C-os előremenő hőmérsékletig végeztem el. Az ORC rendszer adatai megegyeznek az 5.2. táblázatban

foglaltakkal a munkaközeget leszámítva, melynek hulladékhő hasznosítása esetén a már bemutatott R245fa anyagot használtam annak magasabb kritikus hőmérséklete miatt. A különböző hulladékhő hőmérsékletek esetén elérhető összhatásfok az 5.3. ábrán látható, az előbbiekhöz hasonlóan 10 °C külső hőmérséklet esetén.

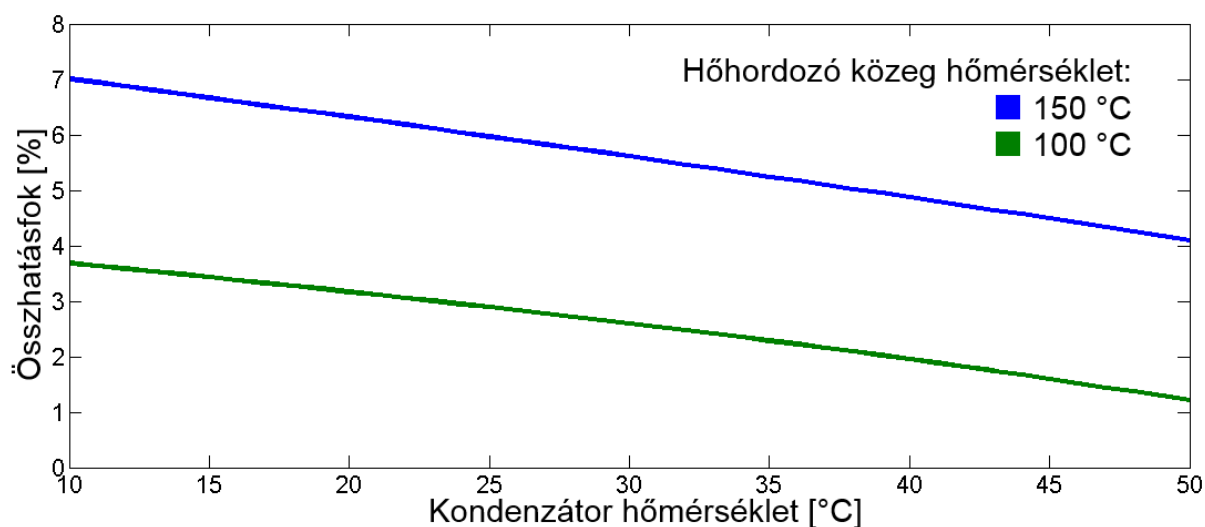


5.3. ábra: Hulladékhő hasznosító ORC rendszerrel elérhető összhatásfok tisztán villamos energia termelése esetén, a hulladékhő hőmérséklete függvényében

A hatásfok a várakozásoknak megfelelően folyamatosan növekszik a hőforrás hőmérsékletének növekedésével, és 150 °C-on az 5%-ot is meghaladja, amely a geotermikus kutakhoz képest már egészen kedvezőnek mondható azt is figyelembe véve, hogy itt visszasajtolási teljesítményigény sem jelentkezik. Hulladékhő hasznosítása esetén a hasznosítás nélkül a teljes hőmennyiség veszendőbe menne, így ehhez képest ez az 5%-ot meghaladó hatásfok is jónak értékelhető, a tiszta villamosenergia-termelésnél azonban itt is célszerűbb a kapcsolt energiatermelés kialakítása megfelelő hőigény jelentkezése esetén.

Geotermikus és hulladékhő hasznosító kiserőművek esetében eddig a tervezési állapot adatait vizsgáltuk, így a következőkben röviden bemutatom a hatásfok alakulását a különböző üzemállapotok esetén. A hőhordozó közeg hőmérsékletének változása hatására a 3. fejezetben leírtak szerint a rendszer nem távolodik el jelentősen az optimális állapottól, így az 5.2-3. ábrák nem csak tervezési állapotban, hanem egy adott rendszer részterhelésű állapotaira is érvényesek. A hőmérséklet csökkenése a hatásfok romlását vonja maga után, így azt érdemes mindig a lehető legmagasabb értéken tartani. A hőhordozó közeg tömegáramának növekedése és csökkenése egyaránt a hatásfok csökkenését eredményezi, így célszerű azt a tervezési, állandó értéken tartani. Geotermikus kutaknál és hulladékhő esetén egyaránt jellemző az állandó hőmérséklet és tömegáram, így az ezek változásából jelentkező gondok a gyakorlatban általában nem merülnek fel.

Az ilyen típusú ORC rendszerek üzemét legnagyobb mértékben befolyásoló tényező a kondenzátor hőmérséklete, amely a külső levegő illetve a hűtővíz hőmérsékletének megfelelően változik. Az 5.4. ábra a kondenzátorhőmérséklet függvényében mutatja az összhatásfok változását 150 °C hőhordozó hőmérséklet esetén. Léghűtés alkalmazásakor a kondenzátor hőmérséklete éves szinten a vízszintes tengelyen ábrázolt teljes tartományt bejárhatja, míg vízhűtés esetén kisebb az ingadozás mértéke. További különbség, hogy léghűtés alkalmazásakor napi szinten változik a kondenzáció hőmérséklete, vízhűtés esetén csak nagyobb időtávú változások figyelhetők meg a hűtővíz hőmérsékletének lassabb változása miatt.



5.4. ábra: Geotermikus és hulladékhő hasznosító ORC rendszer összhatásfokának változása a kondenzátor hőmérséklet változása esetén

A kondenzátor hőmérséklet igen nagy hatással van a rendszer üzemére, a villamosenergia-termelés hatásfoka meredeken csökken a kondenzátor hőmérsékletének növekedésével. A hatásfokgörbe meredeksége közel megegyezik a hőhordozó közeg hőmérsékletétől függetlenül, a nagysága azonban a korábban bemutatottak szerint arányos vele, így kisebb hőforrás hőmérséklet esetén a hatásfok relatív megváltozása sokkal jelentősebb. A görbe két végpontja közti eltérés még 150 °C hőhordozó hőmérséklet esetén is meghaladja a 40%-ot, mely léghűtés alkalmazása esetén ez azt jelenti, hogy a kiserőmű nappali és éjszakai teljesítménye között 20% eltérés még látszólag állandósult üzemben, állandó hőforrás jellemzők mellett is előfordulhat. A geotermikus kutak hőmérsékletszintjén a hatásfok változásának még nagyobb a hatása, így itt kiemelt fontosságú a kondenzátor hőmérsékletének alacsonyan tartása, mely általában vízhűtés kialakítását követeli meg.

5.2. Éves energiatermelés számítása

A kiserőmű bevételei a megtermelt energiából származnak, így a gazdaságossági számításoknál bemutatottaknak megfelelően a megtérülés számítása során fontos ismernünk a várható energiatermelés mértékét. A bemutatott rendszerek üzemét a külső hőmérséklet, és naphőerőművek esetén még a sugárzás intenzitása befolyásolja, melyek mindegyike éves periodicitást mutat, így a termelés előrejelzésére vonatkozó számításokat éves szinten célszerű elvégezni. Az éves energiatermelés számítása során a kiserőművek különböző üzemállapotaival való előfordulásuknak megfelelő súllyal vesszük figyelembe, így a különböző rendszerek összehasonlítására ez a legmegfelelőbb alap.

Naphőerőművek esetén a napelemes rendszerekhez hasonlóan az éves energiatermelés előrejelzése meteorológia adatbázisok alapján történik, melyek egy átlagos év párhuzamosan mért sugárzás és hőmérséklet adatait tartalmazzák. A számítást két különböző, felépítésében lényegesen eltérő adatbázis alapján is elvégeztem, melyek közül az egyik az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontja által létrehozott Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) adatbázis [27]. Az adatbázis előnye, hogy ingyenesen hozzáférhető és egész Európa és Afrika területére is tartalmaz adatokat, hátránya azonban, hogy minden hónapból mindössze egy átlagos nap adatai kérhetőek le, negyedórás bontásban. A másik adatbázis a napelemes rendszerek szimulációjára szolgáló PVsyst nevezetű program ingyenes demó változatából származik [28], a Meteo nevet viseli és a teljes évre vonatkoztatva tartalmaz órás bontású adatokat. Napelemes rendszerek termelésének becslésére a napelemek sugárzástól csak alig függő hatásfoka miatt mindkét adatbázis jól használható és hasonló eredményt ad. Naphőerőművek esetén a PVGIS adatbázis jóval kevesebb termelt energiát jósol, melynek oka, hogy az csak átlagos napok adatait tartalmazza, így egyáltalán nem jelennek meg benne azok a magas sugárzási értékek, amelyeken a naphőerőművek jó hatásfokkal képesek működni. A Meteo adatbázis ezzel szemben szélsőséges adatokat is tartalmaz, így sokkal jobban megfelel a valós időjárási körülményeknek, ezért megbízhatóbb eredményeket szolgáltat, így a továbbiakban ezeket mutatom be.

A számítást egy Debrecen melletti, é. sz. $47^{\circ} 29' 25''$, k. h. $21^{\circ} 35' 59''$ földrajzi koordinátákkal leírt helyszínre végeztem, a sugárzási adatok, és ebből fakadóan a számítási eredmények azonban ettől az ország más területein sem térnek el jelentősen. Nem koncentrátoros kollektorok esetében az adatbázisok 35° -os dőlésszöget és tökéletes déli tájolást mutatnak optimálisnak, így ezek esetében az erre a felületre vonatkoztatott teljes, direkt és szórt sugárzást is magában foglaló globálsugárzással végeztem a számítást. Parabolválós kollektor

esetében tökéletes napkövetést feltételeztem, és a szórt sugárzást nem tartalmazó DNI-t (direct normal irradiation) vettem alapul a számítás során. A Meteo adatbázis esetén az éves besugárzás a globálisugárzásra vonatkoztatva 1535 kWh/m², a DNI alapján számolva pedig 1335 kWh/m², mely azt jelenti, hogy a koncentrátoros naphőerőműveknek rögtön 15%-kal kevesebb bemenő energia áll rendelkezésre abból adódóan, hogy nem képesek a Magyarországon egyébként jelentős arányú szórt sugárzás hasznosítására.

A négy különböző naperőmű típus éves energiatermelési adatait és az ebből származtatott további összehasonlító jellemzőket az 5.3. táblázat tartalmazza, a korábbiakhoz hasonlóan feltüntetve egy napelemes rendszer adatait is összehasonlításként [26].

5.3. táblázat: Naperőművi rendszerek éves energiatermelési és ebből származtatott adatai

	Éves energia- termelés [MWh]	Névleges hatásfok	Éves átlagos hatásfok	Fajlagos energiatermelés [kWh/m ²]	Kihasználási tényező	Kollektor felület [m ²]
Síkkollektoros ORC	77,80	3,75%	1,90%	778	8,88%	2667
Vákuumcsöves koll. ORC	96,67	4,12%	2,59%	967	11,03%	2427
Vákkumos síkkoll. ORC	107,37	7,63%	5,34%	1074	12,26%	1310
Parabolavályús koll. ORC	118,59	17,34%	15,40%	1186	13,54%	577
Napelemes rendszer	133,00	15,2%	13,17%	1330	15,18%	658

A naphőerőmű névleges teljesítményét mind a négy esetben egységesen 100 kW-nak választottam meg. A számítások eredménye szerint az éves szinten megtermelt energia növekszik a magasabb hőmérsékletet lehetővé tevő kollektorok használatával, ez egyben a fajlagos energiatermelés és az ezzel analóg kihasználási tényező növekedését is eredményezi. A fajlagos energiatermelés számértékét tekintve a csúskihasználási óraszámnak felel meg, melyről az előző fejezetben a beruházás gazdaságosságával kapcsolatban részletesen is szó esett, és az eredmények valóban azt mutatják, hogy értéke naperőművek esetén igen alacsony. A táblázat a névleges hatásfok mellett az éves átlagos hatásfokot is tartalmazza, amely minden esetben láthatóan elmarad a névleges értéktől, azonban a mögöttes fizikai tartalom alapján annál jobb összehasonlítási alapot szolgáltat.

A napelemekre vonatkozó adatok mind hatásfok, mind kihasználási tényező tekintetében kiemelkednek, és messze felülmúlják a nem koncentrátoros napkollektort használó naphőerőműveket. Amennyiben a napelem illetve kollektor felületére fajlagosítjuk az éves energiatermelést, a napelemes rendszerek esetén a síkkollektoros ORC-hez viszonyítva 8-szoros, a vákuumcsöveshez viszonyítva 5-szörös, és még a vákuumos síkkollektorhoz viszonyítva is 2,5-szeres értéket kapunk, adott méretű rendelkezésre álló helyen tehát éves szinten ennyivel több energia termelhető napelemekkel a naphőerőművekhez képest. A parabolavályús kollektort alkalmazó koncentrátoros naphőerőmű hatásfoka névleges állapotban és éves szinten egyaránt meghaladja a napelemes rendszerekét, a termelt energia mennyisége azonban mégis kevesebb amiatt, hogy a koncentrátoros kollektor nem képes a szórt sugárzás hasznosítására. A fenti adatok alapján elmondható, hogy villamosenergia-termelés céljából csak koncentrátoros kollektorral létesíthető gazdaságosan naperőmű, a nem koncentrátoros kollektorok ilyen célú hasznosítása legfeljebb úgy tehető gazdaságossá, ha kihasználjuk a napelemek esetén nem elérhető lehetőségeket, mint a kapcsolt hőtermelés lehetősége vagy a hő formájában történő energiátárolás.

Geotermikus és hulladékhő hasznosításakor változó hőforrás jellemzők esetén az éves energiatermelés a naphőerőművekhez hasonló módon, a hőforrás jellemzőit idősoros adatként tartalmazó adatbázisok alapján számítható. Az erre vonatkozó adatbázisokban természetesen a sugárzás helyett a hőhordozó közeg hőmérsékletét és tömegáramát kell szerepeltetni, valamint a külső hőmérsékletre ebben az esetben is szükség van a kondenzátor hőmérsékletére gyakorolt hatása miatt. Amennyiben a hőhordozó közeg hőmérséklete és tömegárama állandó, ami a gyakorlati esetekben általában teljesül, az éves termelés számításához egyedül a külső hőmérsékletre van szükség. A hatásfok jelentős kondenzátorhőmérséklet függése miatt a vizsgált rendszerben vízűtés megvalósítását feltételeztem, a hűtővíz hőmérsékletét a számítás során a napi középhőmérséklettel egyenlőnek tekintettem, a kondenzátor hőmérsékletét pedig ennél 10 °C-kal magasabbnak. A hőmérsékletadatokat a már bemutatott Meteo adatbázisból vettem, mivel az az éjszakai órákra vonatkoztatva is tartalmazza a hőmérsékletet, valamint a belőle számolt éves átlaghőmérséklet 10,5 °C, mely megegyezik az adott földrajzi helyen érvényes valós értékkel.

5.4. táblázat: Geotermikus és hulladékhő hasznosító ORC hatásfokának éves alakulása

Hőhordozó hőmérséklet	Minimális hatásfok	Maximális hatásfok	Átlagos hatásfok	Átlaghőmérséklethez tartozó hatásfok
100 °C	2,45%	4,21%	3,50%	3,53%
150 °C	5,60%	7,58%	6,76%	6,77%

A számítást 100 °C és 150 °C hőhordozó közeg hőmérséklet esetén is elvégeztem, és az 5.4. táblázatban látható, hogy a hatásfok éves szinten mindkét esetben igen tág határok közt változik. Az éves átlagos hatásfok az eredmények alapján igen pontosan megegyezik az éves átlaghőmérséklethez tartozó hatásfokkal, melynek oka a hatásfok közel lineáris hőmérsékletfüggése. Amennyiben az 5.4. ábrán látható görbék menete teljesen lineáris lenne, akkor matematikai módszerekkel is igazolhatóan pontosan megegyezne az átlagos hatásfok az átlaghőmérséklet esetén érvényes hatásfokkal, de látható módon a valós esetben is elhanyagolható a különbség. Ennek az azonosságnak az a komoly jelentősége és gyakorlati haszna, hogy a kiserőmű éves átlagos hatásfoka hőmérsékleti adatbázis és szimuláció program nélkül is könnyedén meghatározható az éves átlaghőmérséklet ismeretében. A kihasználási tényező értékét ezek alapján az éves átlagos és a névleges hatásfok hányadosának, valamint a karbantartások és egyéb leállások miatti kiesések éves részarányának szorzataként számíthatjuk, ebből pedig az éves szinten terelt energia mennyisége közvetlenül meghatározható.

5.3. Kapcsolt hőtermelés kialakításának lehetőségei

Az előző fejezetek vizsgálati eredményei megmutatták, hogy a különféle ORC rendszerek önmagukban általában nem bizonyulnak kellően gazdaságosnak, a megtérülési mutatók javítása céljából érdemes a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés kialakítása. A kapcsolt hőtermelés lehetőségeit a rendelkezésre álló hőigény szabja meg, a kapcsoltan hőt termelő ORC rendszerek lakossági fogyasztók fűtési- és használati melegvíz hőigényének kielégítésére lehetnek alkalmasak. A hőtermelés szempontjából döntő fontosságú kérdés a kiadott hő elvárt hőmérséklete, amelyet a hőellátó rendszer mérete és veszteségei határoznak meg, a rendszer mérete pedig a kiadni kívánt hő mennyiségével van összefüggésben. Minél magasabb hőmérsékleten történik a hőkiadás, annál jobban lecsökken a kiadható villamos teljesítmény, így célszerű a hőtermelés hőmérsékletének lehetőség szerinti legalacsonyabb értéken tartása. Közepes és nagy kiterjedésű távhőrendszerek központjában legalább 110-130 °C előremenő

hőmérsékletet szoktak alkalmazni, ez a hőmérséklet azonban túl magas az általam bemutatott rendszerek jellemző hőmérsékletszintjeihez képest, így mindenképpen valamilyen egyedi megoldásban kell gondolkodni.

Használati melegvíz elvárt hőmérséklete a csapolónál 40 °C, így ezt elegendő 45-50 °C közé felmelegíteni, valamint hasonló hőmérsékletű vízzel padló- illetve falfűtés is könnyen megvalósítható. Korszerű, padlófűtést alkalmazó lakások esetén tehát a hőveszteségeket is figyelembe véve a kapcsolt hőtermelés 55 °C hőmérsékleten történő megvalósítása is elegendő. Modern radiátoros fűtés esetén a kívánt előremenő hőmérséklet 70 °C, ebben az esetben a veszteségek fedezésével együtt legalább 75 °C-os központi hőtermelési hőmérsékletre van szükség. Régebbi fűtési rendszerek esetén 90 °C az elvárt előremenő hőmérséklet, illetve további közbeiktatott hőcserélők még magasabb hőmérsékletet is szükségessé tehetnek, az ilyen kedvezőtlen esetekkel azonban most nem foglalkozom. Mivel Magyarországon még sem geotermikus erőmű, sem naphőerőmű nem létesült, nem jelenthet problémát olyan telephely kiválasztása, ahol megfelelően alacsony hőmérsékletű hőigények állnak rendelkezésre.

Naphőerőművek esetén a kapcsolt hőtermelés legjobb módja az ellennyomású hőkiadás, melynek során a kondenzátorban leadott hő melegíti fel a fűtési célra szolgáló vizet. Az előző bekezdésben leírt 55 °C és 75 °C hőmérsékletszintekhez 60 °C illetve 80 °C kondenzátorhőmérséklet szükséges. Mind a négy naphőerőmű típusra megvizsgáltam a kapcsolt hőkiadás lehetőségét mindkét említett hőmérsékletszinten, összehasonlítva a tisztán villamos energiát termelő rendszer adataival, illetve a tiszta hőtermelés lehetőségével, mely azt jelenti, hogy az ORC elhagyásával a kollektorokban a kívánt hőmérsékleten hőt állítunk elő. A táblázatban szereplő rendszerek kollektor felületét minden esetben 1000 m²-nek választottam az összehasonlíthatóság érdekében, mivel így megegyezik a rendszerbe bevitt teljes sugárzási energia mennyisége. A táblázatokban a termelt hőmennyiséget is a villamos energia esetén használatos MWh mértékegységben szerepeltettem, mivel a GJ használatából adód 3,6-szeres szorzó elrontaná a könnyű összehasonlíthatóságot. A termelt energia konkrét mennyisége alatti cellában az adott energiatermelésre vonatkozó éves átlagos hatásfok is szerepel, szintén az összehasonlíthatóság megkönnyítése céljából.

5.5. táblázat: 55 °C-os kapcsolt hőtermelés jellemző adatai, összehasonlítva tiszta villamosenergia-termelés
illetve tiszta hőtermelés lehetőségeivel

Hőtermelés hőmérsékletszintje: 55 °C	Tiszta villamos energia term. [MWh]	Kapcsolt		Tiszta hőtermelés [MWh]
		Villany [MWh]	Hő [MWh]	
Síkkollektoros ORC	29,17	10,69	541,22	892,37
	1,90%	0,70%	35,26%	58,13%
Vákuumsöves koll. ORC	39,83	22,19	520,24	775,90
	2,59%	1,45%	33,89%	50,55%
Vákkumos síkkoll. ORC	81,95	73,46	489,31	750,65
	5,34%	4,79%	31,88%	48,90%
Parabolavályús koll. ORC	205,62	184,25	661,79	972,58
	15,40%	13,80%	49,57%	72,85%

5.6. táblázat: 75 °C-os kapcsolt hőtermelés jellemző adatai, összehasonlítva tiszta villamosenergia-termelés
illetve tiszta hőtermelés lehetőségeivel

Hőtermelés hőmérsékletszintje: 75 °C	Tiszta villamos energia term. [MWh]	Kapcsolt		Tiszta hőtermelés [MWh]
		Villany [MWh]	Hő [MWh]	
Síkkollektoros ORC	29,17	-	-	751,95
	1,90%	-	-	48,99%
Vákuumsöves koll. ORC	39,83	10,25	432,50	712,45
	2,59%	0,67%	28,18%	46,41%
Vákkumos síkkoll. ORC	81,95	62,42	495,20	721,21
	5,34%	4,07%	32,26%	46,98%
Parabolavályús koll. ORC	205,62	163,84	681,42	969,47
	15,40%	12,27%	51,04%	72,62%

Az eredmények alapján látható, hogy sík- és vákuumsöves kollektorok esetén a kapcsolt hőtermelés kialakítása jelentősen lerontja az amúgy is alacsony villamos hatásfokot, bár ennek árán viszonylag nagy mennyiségű hő előállítására van lehetőség. A másik oldalról megközelítve a dolgot azt látjuk, hogy a tiszta hőtermeléshez képest a kapcsolt energiatermelés megvalósítása esetén jóval kevesebb lesz az előállított hő mennyisége, melyért szinte csak

elhanyagolható mennyiségű villamos energiát kapunk. Amennyiben tehát rendelkezésre áll egy megfelelően nagy hőigény, akkor célszerűbb azt kielégíteni villamos energia termelés nélkül, mintsem egy drága ORC rendszert beépíteni egy igen csekély villamos teljesítmény reményében. A sík- és vákuumcsöves kollektornál tehát a villamosenergia-termelés esetén látott kedvezőtlen eredmények kapcsolt hőtermelés segítségével sem javíthatóak, így a különböző lehetőségek megvizsgálása után kijelenthető, ilyen kollektorokra alapozva semmilyen szempontból sem érdemes ORC naphőerőművet létesíteni.

Vákuumos síkkollektor és parabolavályús kollektor esetén érdemes a kapcsolt hőtermelés kiépítése, mivel az a villamos energia kis mértékű csökkenéséhez képest igen nagy hőmennyiség előállítását teszi lehetővé. A kapcsoltan hőt termelő naphőerőművek közös problémája, hogy a hőkiadást a villamos teljesítményhez hasonlóan a sugárzás alakulása határozza meg, így a hő termelése és az igények jelentkezése általában nem esik egybe. Ez a probléma tároló beépítésével orvosolható, mely kerülhet a kondenzátor után is csak a kiadott hőt tárolva, de a magasabb hőmérséklet miatt érdekesebb már a körfolyamat elé beépíteni, ennek lehetőségeivel a következő fejezetben részletesen foglalkozom. A naphőerőművi hőtermelés további hátránya, hogy a nem napsütéses időszakban egyáltalán nem tudnak hőt termelni, így önmagukban nem képesek a fogyasztók üzembiztos ellátására, csak kiegészítésként alkalmazhatóak más hőellátási megoldások mellett.

Geotermikus ORC kiserőművek esetében az ellennyomású hőtermelés nem valósítható meg gazdaságosan, mivel a villamosenergia-termelés hatásfoka meredeken romlik a kondenzátor hőmérséklet megemelésével, és értéke már a legalacsonyabb hasznosítható hőmérsékletszinthez tartozó 60 °C kondenzátor- hőmérséklet esetén is szinte nullára csökken. Geotermikus rendszereknél a kapcsolt hőtermelés a körfolyamat hőcserélőjében már lehűtött fluidum megmaradt hőtartalmát hasznosítja több lépcsős lehűtés megvalósítása által. A kútból kilépő fluidumot elsőként az ORC elgőzölögtető hőcserélőjébe vezetik, ahol magas elgőzölögési hőmérséklet mellett a lehetőségekhez mérten jó hatásfokú villamosenergia-termelés valósulhat meg, hiszen ebben az esetben nem kell foglalkozni a fluidum minél jobb visszahűtésével, mivel annak megmaradt hőtartalma sem veszik kárba. A körfolyamat után a fluidum maradék hőtartalmát a különböző fellépő hőigények kielégítésére fordítják, azok hőmérséklete szerinti csökkenő sorrendben, elsőként tehát magasabb hőmérsékletű távhő szolgáltatás, majd alacsony hőmérsékletű fűtési hőellátás, végül használati melegvíz előállítás és esetleg strandon medencefűtés létesíthető vele. Az ilyen összetett rendszerek esetében az elsődleges cél gyakran a hőszolgáltatás megvalósítása, és a villamosenergia-termelést csak mellékesen, a visszasajtolás

és a rendszer egyéb önfogyasztásának fedezésére építik ki, hogy külső energiaigény nélkül működhessen a rendszer.

Az 5.7. táblázatban egy hőszolgáltatást és villamosenergia-termelést kapcsoltan végző geotermikus rendszer jellemző számadatait mutatom be. A víz fluidum hőmérsékletét a felszínre érkezéskor 100 °C-nak, tömegáramát 10 kg/s-nak tekintetem, a külső hőmérséklet pedig 20 °C. A fluidum elsőként az ORC elgőzölgetető hőcserélőjében 80 °C-ra hűl, melynek során leadott hőteljesítményből a körfolyamat 8,41% hatásfokkal 70 kW villamos teljesítményt állít elő, mely a kút hőteljesítményének mindössze 2,12%-a. Ez a villamos teljesítmény 70% hatásfokú szivattyút feltételezve a fluidum 50 bar nyomáson történő visszasajtolására elegendő. A fluidummal további lehűlése során 75 °C-os és 50 °C-os hőmérsékletszinteken adunk ki összesen több mint 2 MW hőt, mely egy kisebb kiterjedésű távfűtő rendszer megvalósítására, illetve használati melegvíz előállítására használható fel. Ugyanerre a kútra alapozva tiszta villamosenergia-termelés esetén a korábban bemutatott hatásfokokat figyelembe véve 115 kW villamos teljesítmény elérésére lett volna lehetőség, melyből levonva a visszasajtolás feltételezett 70 kW-os teljesítményszükségletét mindössze 45 kW nettó teljesítmény marad, melyhez képest egy 2 MW-os geotermikus távhőrendszer létrehozása egyértelműen gazdaságosabb lehetőségnek tűnik. A geotermikus távhőrendszerek a naphőerőműveken alapulókkal szemben a kút folyamatos rendelkezésre állása miatt kiegészítő tüzelés nélkül is alkalmasak a fogyasztók ellátására.

5.7. táblázat: Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés geotermikus rendszerek esetén

Fluidum hőmérséklet	Átadott hőteljesítmény	Hő aránya	Felhasználás	
(belépéskor) 100 °C	831,2 kW	25,20%	ORC bemenő hőmennyiség	
			Villamos telj.	Hatásfok
			70,0 kW	8,41% (2,12%)
80 °C	1030,3 kW	31,24%	75 °C-os hőszolgáltatás (50 °C visszatérő)	
55 °C	1026,1 kW	31,11%	50 °C-os hőszolgáltatás (25 °C visszatérő)	
30 °C	410,5 kW	12,45%	Veszteség (ki nem használt hőtartalom)	

A hulladékhőt általában azért nevezzük hulladéknak, mert nincs rá szükségünk, az adott folyamatban nem tudjuk hasznosítani, feltehetőleg azért, mert nem áll rendelkezésre hőigény, amelynek fedezésére felhasználhatnánk. Amennyiben az ipari folyamatban vagy az üzem

területén mégis jelentkezik valamilyen hőigény, a költséges és rossz hatásfokú villamosenergia-termelés helyett általában érdemesebb a hulladékhőt teljes egészében az adott hőigény kielégítésére fordítani. Kapcsolt energiatermelés kialakítása ennek megfelelően csak igen korlátozott esetekben lehet indokolt, ha a hőigény csak kisebb mennyiségben, vagy alacsonyabb hőmérsékleten jelentkezik a hulladékhőhöz képest, az ilyen esetekben azonban a geotermikus hőforrások esetén bemutatottakhoz hasonló megfontolásokat igényelnek, így ezzel nem foglalkozom külön.

5.4. Energiatárolás lehetősége

Energiatároló beépítésére elsődlegesen szigetüzemű rendszer esetén van szükség, ahol a termelés és fogyasztás egyensúlyának fenntartására szolgál. A villamosenergia-rendszerben a termelt teljesítmény szabályozásáért általában a nagyobb erőművek felelősek, így hálózatra kapcsolódó kiserőművek szabályozásba történő bevonására jelenleg még nem állnak rendelkezésre a megfelelő ösztönzők, így a tároló létesítése során nem az a lényeges szempont. A kiserőműveket általában időfüggő átvételi ár biztosításával ösztönzik tároló kiépítésére, csúcsidőben magasabb, völgyidőszakban pedig alacsonyabb tarifa biztosításával igyekeznek a kiserőművek termelésének alakulását a rendszerterhelés változásához igazítani. A beruházás gazdaságossága szempontjából a tároló létesítésének célja a kihasználási tényező javítása, valamint állandósult állapotbeli üzem elősegítése, mely kedvezőbb hatásfokot tesz lehetővé.

Naphőerőművek esetén a kollektor és a körfolyamat közé van lehetőség hőtároló beépítésére. A 4. fejezetben már bemutatott, jelenlegi KÁT rendszerben érvényes díjszabás minden időszámban azonos tarifát biztosít, a villamos energia termelési időpontjának tehát nincs jelentősége a bevételek szempontjából. A tároló kialakításának legfőbb előnye a körfolyamat kihasználási tényezőjének javítása, melynek eredményeként kisebb névleges teljesítményű ORC rendszer képes ugyanazon energiamennyiség megtermelésére, ezáltal minden kollektor típus esetén javítva a megtérülést. A hőtároló alkalmazása lehetővé teszi a körfolyamat állandósult állapotban történő üzemét, amely főleg a koncentrátoros naphőerőművek esetében előnyös, mivel azok hatásfoka részterhelésen jelentősen eltér az optimálistól. Minél magasabb a tároló hőmérséklete, annál több hőt tud egységnyi tömegű folyadék tárolni, valamint annál magasabb lehet az elgőzölgés hőmérséklete és a körfolyamat hatásfoka, így az adott hőből több villamos energia állítható elő, ezért kisebb méretű tárolóra van szükség az adott tárolási feladat ellátásához. A tároló alkalmazásának legfőbb hátrányát is az állandó magas hőmérséklete jelenti, amely bár a körfolyamat szempontjából kedvező, a rendszer összhatásfokát rontja,

mivel a kollektorok alacsony sugárzás esetén csak rossz hatásfokkal, illetve egy bizonyos érték alatt már egyáltalán nem képesek a tároló által megkívánt hőmérséklet előállítására. A vizsgált kollektorok közül a parabolavályús az egyetlen, amely még alacsony sugárzás esetén is képes a szükséges magas hőmérséklet elérésére, így a hőtárolás megvalósítása elsődlegesen a koncentrátoros naphőerőművek esetében gazdaságos.

A parabolavályús kollektort tartalmazó ORC kiserőművek esetében tehát jó lehetőségek vannak a hőtárolás kialakítására, így erre részletes vizsgálatokat is végeztem. A számítás során 300 °C-os állandó előzőlégési hőmérsékletet feltételeztem, melyhez az előmelegítő-elgőzölgtető hőcserélőben érvényes hőmérsékletlefutások figyelembevételével 360 °C-os tároló hőmérséklet esetén érhető el a tároló legjobb kihasználtsága, a tárolt közeg ilyenkor névleges állapotban 150 °C-ra hűthető le. Először az éves szinten termelt energia mennyiségét vizsgáltam a tároló beiktatása esetén, a korábbiakhoz hasonlóan 1000 m² kollektor felület figyelembevételével.

Az 5.8. táblázatban a tiszta villamos energia termelés mellett a kapcsolt hőtermelésre vonatkozó adatok is megjelennek, 55, 75 illetve 95 °C hőmérsékletű hőkiadás esetére számolva. Az 5.5-6. táblázatokkal összehasonlítva látható, hogy a tároló kiépítése kis mértékben növelte az éves szinten megtermelt villamos energia mennyiségét a körfolyamat átlagosan jobb hatásfokú üzeme miatt, a kiadott hő mennyisége azonban ugyanebből az okból kifolyólag csökkent.

5.8. táblázat: Parabolavályús kollektoros ORC kiserőmű által termelt energia tároló alkalmazása esetén

	Tisztán vill. energia	Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés		
		55 °C	75 °C	95 °C
Éves villamos energia	210,3 MWh	190,6 MWh	171,3 MWh	152,4 MWh
Átlagos villamos hf.	15,75%	14,28%	12,83%	11,42%
Éves hőtermelés	-	607,3 MWh	622,2 MWh	636,2 MWh
Átlagos hőterm. hf.	-	45,49%	46,61%	47,65%
Összhatásfok	15,75%	59,77%	59,44%	59,07%

A körfolyamat legjobb kihasználása abban az esetben biztosítható, ha a kollektorok által nappal megtermelt hőmennyiséget teljes 24 órás, éjjel-nappali üzemelés esetén használja fel. Az ORC teljesítményét ilyenkor a kollektorokban az éves szinten legnagyobb egy nap alatt előállított napi hőmennyiség alapján kell megválasztani, amely tisztán villamos energia termelés esetén 8,04 MWh, kapcsolt hőtermelés esetén pedig ennél elhanyagolható mértékben

alacsonyabb. Ennek a hőmennyiségnek az egy nap alatt történő elfogyasztásához 24 órás folyamatos felhasználást feltételezve állandó 335 kW hőbevitelt kell biztosítani a körfolyamatba, amelyből a nyári napokra érvényes hatásfoka alapján 85 kW villamos teljesítmény keletkezik, így erre az értékre kell választani az ORC névleges teljesítményét. Tároló nélkül az 1000 m² kollektor felülethez az 5.3. táblázat alapján 170 kW névleges teljesítmény tartozik, tehát tároló alkalmazásával elérhető, hogy éves szinten ugyanazt az energiamennyiséget fele akkora teljesítményű ORC segítségével termeljük meg.

A beruházási költségek szempontjából döntő fontosságú a fentiek megvalósításához szükséges hőtároló mérete is. A tároló reggel üres állapotból indul, és estére lesz benne a legnagyobb hőmennyiség, így erre az értékre kell méretezni. A kollektorokban előállított hő egy részét a körfolyamat már nappal hasznosítja, így 10 órás időtartamot feltételezve a tároló üres és teli állapota közt csak a napi összes hőmennyiség 14/24-ed részét kell tárolni, amely a fenti maximális érték esetén 4,7 MWh. Ennek tárolásához 200 °C hőhordozó közeg hőmérsékletváltozás és termoolajokra jellemző átlagos fajhőt és sűrűséget figyelembe véve nagyjából 50 m³ térfogatú közegre van szükség, valamint két ugyanekkora méretű szigetelt tartályra, melyeket a meleg- és hidegágba iktatunk be. Az 50 m³-es hőtároló térfogat elsőre túlzottan nagynek tűnik, azonban figyelembe véve a rendszer méreteit nem számít kiugróan magasnak, a duplája helyett csak 85 kW teljesítményű ORC-n megtakarított beruházási költségek pedig nagyrészt fedezi a tároló létesítésének költségét.

A tároló beépítésének további előnye, hogy a villamosenergia-termelés egyenletesebb eloszlása megkönnyíti a kiserőmű hálózati integrációját, valamint az időjárásfüggő megújulókra jellemző gyors teljesítményváltozások kiküszöbölésével a VER szabályozását is elősegíti. Kapcsolt hőtermelés esetén a tároló lehetővé teszi az aktuális napsugárzástól független hőkiadást, így éjszaka is mód van a fogyasztók ellátására, amikor a hőre egyébként is nagyobb szükség van. A kiserőmű csúcskihasználási óraszám a tároló segítségével duplájára, 2400 h-ra növekedett, más erőművekkel összehasonlítva ez azonban még mindig alacsony érték. Ennek oka, hogy a tárolás csak napi időtávon valósítható meg, hosszabb kevésbé napos időszakokban továbbra is alacsony lesz a kiserőmű teljesítménye, amely ráadásul a hőfogyasztók ellátást sem teszi lehetővé. A tároló mellett tehát még szükség lehet valamilyen, célszerűen biomassza alapú póttüzelés megvalósítására, amely a kihasználási tényező további javításához és a hőfogyasztók üzembiztos ellátásához is hozzájárul. A póttüzelést szolgáló kazán is a tárolóhoz kapcsolható, tehát az abban található közeget melegíti fel, így nincs szükség a kazán hőteljesítményének szabályozására, amely egyenletes, jó hatásfokú üzemvitelt tesz

lehetővé. Egy parabolavályús napkollektorokról és biomassza alapú kazánról táplált, tárolót tartalmazó ORC rendszer kellően üzembiztos és jól szabályozható ahhoz, hogy szigetüzemű rendszerek ellátására is alkalmas legyen. Az ilyen kiserőművek például Afrika napsütötte, de villamos hálózattól távoli részein is lehetővé teszik, hogy a fosszilis energiahordozón alapuló dízelaggregátor helyett megújuló energiaforrások hasznosításával biztosítsák a szigetüzemű rendszer működését.

Geotermikus és hulladékhő hasznosító kiserőművek általában állandósult állapotban működnek, így a tároló beépítésére ennek megváltoztatása céljából lehet szükség. Az ilyen kiserőművekben termelt energiára a hatályos KÁT díjszabás szerint az éjszakai mélyvölgy idején jóval alacsonyabb átvételi ár vonatkozik, így a bevételek növelhetőek azáltal, hogy az éjszakai órákban a rendszer teljesítményét csökkentve a hő egy részét eltároljuk, majd abból a csúcsidőszakban termelünk villamos energiát. A fenti megoldás azonban azt eredményezi, hogy a hőhordozó közeg tömegárama eltérő lesz nappali és éjszakai üzemben, amely a tervezésitől eltérő állapotban az optimálisnál alacsonyabb hatásfokot eredményez, így csökkenti a termelt energia mennyiségét. Az ORC rendszer névleges teljesítményét ilyenkor a nagyobb teljesítményű, nappali üzemhez kell igazítani, ami a tároló költségein túl további beruházási többletköltséget eredményez, és rontja a kiserőmű kihasználási tényezőjét. Geotermikus és hulladékhő hőforrás esetén tehát műszaki szempontból is kedvezőtlen és nem is gazdaságos egy hőtároló kiépítése, így erre vonatkozóan nem is folytatok további vizsgálatokat.

6. ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

Dolgozatomban a szerves Rankine-körfolyamat alkalmazásának lehetőségeit vizsgáltam napenergia, geotermikus energia és hulladékhő hőforrások esetén. Céлом a technológia különböző megvalósítási módjainak átfogó értékelése volt műszaki és gazdasági szempontok együttes figyelembevételével. Konkrét rendszerek vizsgálata helyett általános érvényű megállapításokra törekedtem, ennek szellemében az eredmények közlésénél is fajlagos mennyiségeken keresztül végeztem az összehasonítást, hogy ezáltal vizsgálati eredményeim minél szélesebb körben felhasználhatóak legyenek. Nagy hangsúlyt fektettem a különféle számítási módszerek bemutatására is, melyeken keresztül szemléletesen megjeleníthető volt az adott kérdéskört befolyásoló különböző tényezők hatása és jellege.

Munkám során modelleket készítettem a vizsgálni kívánt rendszerek működésének leírására, majd az ezekkel végzett számítások és szimulációs vizsgálatok eredményeit használtam fel az egyes technológiák értékeléséhez. A szerves Rankine-körfolyamat modelljét alapvető termodinamikai összefüggések felhasználásával, három különböző program segítségével is elkészítettem, melyek mindegyike eltérő előnyökkel és hátrányokkal rendelkezett a használat során. A hőforrások modelljének készítésénél megmutatkozott, hogy a geotermikus és hulladékhő hőforrás a modellalkotás szempontjából igen hasonló, így ezeket a későbbiekben is gyakran együttesen kezeltem, ezzel szemben a napenergia alapvetően eltér ezektől, így minden esetben külön tárgyalást igényelt.

A modellek alapján elsőként a különböző kiserőművek optimális kialakítását határoztam meg, hogy a későbbi vizsgálatok során már jól megtervezett rendszerekre végezhessem el a számításokat. Az eredmények alapján az ORC elgőzölgési hőmérséklete az optimális működést befolyásoló legfontosabb paraméter, hiszen ez teremt kapcsolatot a hőforrás és a körfolyamat között. Az elgőzölgési nyomás optimális értéke függ a kiserőmű működését befolyásoló, a modellek bemeneti adatát jelentő jellemzők értékétől is, így ezek változásának hatásait is vizsgálnom kellett. A rendszer optimális kialakítása csak tervezési állapotban biztosítható, egy adott megvalósított rendszer részterhelésű üzemállapotai nagyban eltérhetnek az optimális állapottól, melynek áttekintéséhez a részterheléses üzemvitel kérdéseit is tisztáznom kellett.

A kiserőművek létesítése alapvetően a gazdaságosságuk kérdése, így az erre vonatkozó számítási módok alapvető összefüggéseit és lehetséges egyszerűsítési módjait is részletesen bemutattam, melyekből számos fontos tervezési és vizsgálati irányelv mögöttes tartalma is láthatóvá vált. Munkám során nem végeztem konkrét, számszerű gazdasági értékelést, mivel az

általam megcélzott általános érvényű vizsgálatok erre pontos és megbízható költségadatokat hiányában nem adtak lehetőséget.

A különböző kiserőművek működésének értékelése során a hatásfok vizsgálata volt az első lépés, mivel ennek nagysága jó alapot biztosít a különböző technológiák összehasonlítására, értékének változásai pedig jól megmutatják a különböző befolyásoló tényezőknek a rendszer működésére gyakorolt hatását. Következő lépésben az éves szinten termelt energia mennyiségének meghatározását végeztem el, amelynek a gazdasági számítások során is fontos szerepe van, valamint az éves szintű fajlagos értékek jól alkalmazhatóak a rendszerek jellemzésére, mivel a különböző üzemállapotok hatásait azok valós előfordulásának megfelelően súlyozva veszik figyelembe. A kapcsolt hőtermelés megvalósításának és hőtároló alkalmazásának lehetőségeit is áttekintettem, melyek hozzájárulhatnak a kiserőmű gazdaságosságának javításához.

Naphőerőművek tekintetében négy különböző kialakítást vizsgáltam, melyek közt a legfontosabb különbség a kollektor típusa volt, valamint összehasonlításként a napelemes rendszerek főbb jellemzőit is bemutattam. Nem koncentrátoros kollektorok alkalmazásával tisztán villamos energia termelés esetén csak a napelemeknél lényegesen rosszabb hatásfok és kihasználási tényező érhető el, így az ilyen kiserőművek létesítését legfeljebb a napelemek esetében nem megvalósítható lehetőségek, tehát a kapcsolt hőtermelés vagy a hőtárolás kialakítása teheti gazdaságossá. Számításaim eredményei szerint sík- és vákuumcsöves kollektor esetén a kapcsolt hőtermelés és hőtárolás egyaránt olyan mértékben lerontják az amúgy is alacsony energetikai jellemzőket, hogy ilyen kollektorokra alapozott villamosenergia-termelést egyáltalán nem javaslok. Vákuumos síkkollektor esetén ezek a mutatók valamivel kedvezőbbek, és alacsony hőmérsékletű kapcsolt hőtermelésre is lehetőség nyílik, így a nem koncentrátoros napkollektorok közül ez az egyetlen típus, amelyre alapozva érdemes lehet ORC rendszert létrehozni.

A koncentrátoros, parabolavályús kollektort használó naphőerőművek ezzel a napenergia jó hatásfokú hasznosítására képesek, valamint kapcsolt energiatermelés kialakításának és hőtároló beépítésének lehetőségei is igen kedvezőek. A koncentrátoros naperőművek komoly hátránya, hogy nem képesek a szórt sugárzás hasznosítására, míg a napelemek a teljes globálisugárzást hasznosítják, és hatásfokuk alacsony sugárzás esetén is kisebb mértékben csökken, így a kevésbé benapozott területek esetén inkább ezek használata javasolt, míg a koncentrátoros naphőerőművek előnye a délebbi, naposabb területeken mutatkozik meg. Magyarország nagyjából a két terület határán helyezkedik el, tehát alapvetően a napelemes rendszerek mutatói

a kedvezőbbek, ám a kapcsolt hőtermelésből és tárolásból fakadó előnyök a naphőerőműveket is gazdaságossá tehetik.

Geotermikus hőforrások hasznosítása tisztán villamosenergia-termelésre a feltörő fluidum hőtartalmának rossz kihasználása miatt csak alacsony hatásfokkal valósíthatóak meg. Kapcsolt hőtermelés kialakítása azonban jelentősen javítja a geotermikus kiserőmű energetikai mutatóit, ezért megfelelő hőigény rendelkezésre állása esetén mindenképpen érdemesnek tartom a hőtermelés kiépítését is. Hulladékhő hasznosítása tekintetében az alacsony hőmérsékletből fakadó alacsony hatásfok miatt csak akkor gazdaságos az ORC rendszer létesítése, ha a hulladékhő hőtartalmának közvetlen hasznosítására egyáltalán nincs lehetőség, ilyen esetekben azonban a hőforrás ingyenes rendelkezésre állása miatt az alacsony hatásfok ellenére és érdemes lehet a villamosenergia-termelés megvalósítása.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] EUROPEAN COMMISSION: *The EU climate and energy package*. <http://ec.europa.eu/clima/policies/package/> (2014. okt. 5.)
- [2] HONEYWELL: *Genetron Working Fluids*. <http://www.honeywell-orc.com/> (2014. okt. 5.)
- [3] TURBODEN: *Turboden Solar Thermal Power Applications*. http://www.turboden.eu/en/public/downloads/11-COM.P-6-rev.10-SOLAR_ENGLISH.pdf (2014. okt. 5.)
- [4] EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION: *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018*. <http://www.epia.org/news/publications/> (2014. okt. 5.)
- [5] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY: *Concentrating Solar Power – Technology Brief*. [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP Tech Brief E10 Concentrating Solar Power.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E10_Concentrating_Solar_Power.pdf) (2014. okt. 5.)
- [6] CSP WORLD: *CSP Facts & Figures*. <http://www.csp-world.com/resources/csp-facts-figures> (2014. okt. 5.)
- [7] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY: *Concentrating Solar Power Projects*, <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/> (2014. okt. 5.)
- [8] Tester, J. W. et al.: *The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Massachusetts Institute of Technology, 2006
- [9] DUFFIE, J. A., BACKMAN, W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd edition, Wiley-Interscience, 1991
- [10] EUROPEAN SOLAR THERMAL INDUSTRY FEDERATION: *A guide to the standard EN 12975*. [http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST D2.3 Guide to EN 12975.pdf](http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST_D2.3_Guide_to_EN_12975.pdf) (2014. okt. 15.)
- [11] SOLAR DISTRICT HEATING: *Guidelines: Solar Collectors*. http://www.solar-district-heating.eu/Portals/0/Factsheets/SDH-WP3_FS-7-1_SolarCollectors_version3.pdf (2014. okt. 15.)
- [12] WAGNER SOLAR: *EURO C20/22 AR napkollektor: Műszaki információk*. <http://wagnersolar.hu/js/jQuery-elfinder/files/Files/EURO-C20-C22.pdf> (2014. okt. 15.)
- [13] ARCON SOLAR: *HT Solar Collectors*. <http://www.arcon.dk/produkter/HT-solfangere.aspx> (2014. okt. 15.)

- [14] SONNENKRAFT: *Kollektorok*. <http://www.sonnenkraft.hu/magan-hazak/a-megoldasok/kollektorok/> (2014. okt. 15.)
- [15] SRB ENERGY: *The UHV collector: Colletor Features*.
<http://www.srbenergy.com/pages/caracteristicas-del-colector> (2014. okt. 15.)
- [16] SPF INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK: *SPF Online Kollektorkatalog*.
http://www.spf.ch/index.php?id=111&L=0&no_cache=1 (2014. okt. 15.)
- [17] SRB ENERGY: *The SRB evacuated flat solar panel*.
http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/scane_benvenuti-250610.pdf
(2014. okt. 15.)
- [18] STG INTERNATIONAL: *How it works*. <http://www.stginternational.org/how-it-works.html>
(2014. okt. 15.)
- [19] NREL: *Test Results SEGS LS-2 Solar Collector*. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/segs_ls2_solar_collector.pdf (2014. okt. 15.)
- [20] CZINDER J.: *Erőművek szabályozása*. Műegyetemi Kiadó, 2000
- [21] MAVIR: *Kötelező átvételi rendszer (KÁT)*. <http://www.mavir.hu/web/mavir/kotelezo-atviteli-rendszer-kat> (2014. okt. 25.)
- [22] MAGYAR ENERGETIKAI ÉS KÖZMŰ-SZABÁLYOZÁSI HIVATAL: A megújuló energiaforrásból, illetve a hulladékból nyert energiával termelt villamos energiára vonatkozó kötelező átvételi árak, 2008-2014. <http://www.mekh.hu/hatosagi-arak-2/villamos-energia/kotelezo-atvetel.html> (2014. okt. 25.)
- [23] NEMZETI FEJLESZTÉSI MINISZTERIUM KLÍMA- ÉS ENERGIAÜGYÉRT FELELŐS ÁLLAMTITKÁRSÁG: Szabályozási koncepció a megújuló- és alternatív energiaforrásokból előállított hő- és villamos energia kötelező átvételi rendszerről. [http://www.2010-2014.kormany.hu/download/7/24/50000/NFM_11975 \(METÁR szab. koncepció\).doc](http://www.2010-2014.kormany.hu/download/7/24/50000/NFM_11975_(METAR_szab_koncepcio).doc) (2014. okt. 25.)
- [24] NEMZETI INNOVÁCIÓS HIVATAL: *Horizont 2020*. <http://www.h2020.gov.hu/> (2014. okt. 25.)
- [25] EUROPEAN COMMISSION: *Horizon 2020, The EU Framework Programme for Research and Innovation, Energy*. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/area/energy> (2014. okt. 25.)
- [26] MAYER MARTIN JÁNOS: *Napelemek termelés előrejelzésének pontosítása*. TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2013

- [27] JOINT RESEARCH CENTRE: *Photovoltaic Geographical Information System*.
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (2014. okt. 30.)
- [28] PVSYST: *Photovoltaic Software*. <http://www.pvsyst.com/en/> (2014. okt. 30.)
- [29] PÉTÁV PÉCSI TÁVFŰTŐ KFT.: *A távhőszolgáltatás*. http://www.petav.hu/a_tavhoszolgalatas (2014. okt. 30.)

FÜGGELÉK

1. Elgőzőlgési nyomás és hatásfok alakulása részterhelésen

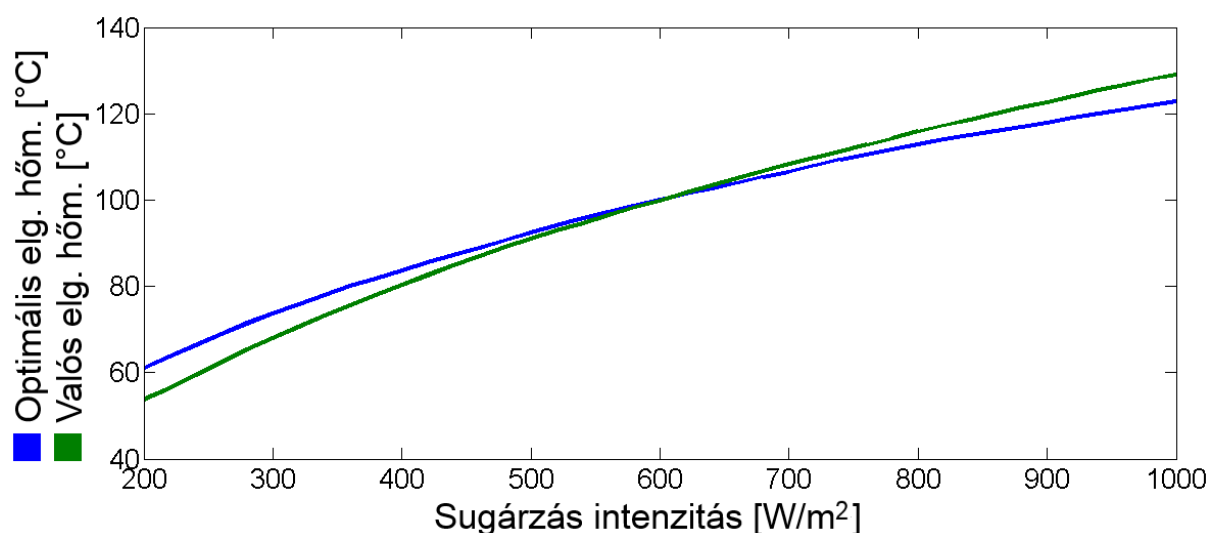
A melléklet három különböző ORC rendszer, egy koncentrátor nélküli kollektort, egy koncentrátoros kollektort és egy geotermikus vagy hulladékhő hőforrást kihasználó kiserőmű esetén tartalmazza az ideális és valós elgőzőlgési hőmérséklet, valamint az ezekhez tartozó maximális és valós hatásfok alakulását a hőforrást leíró különböző bemeneti paraméterek változása esetén.

Vákuumsöves (koncentrátor nélküli) kollektort tartalmazó ORC rendszer:

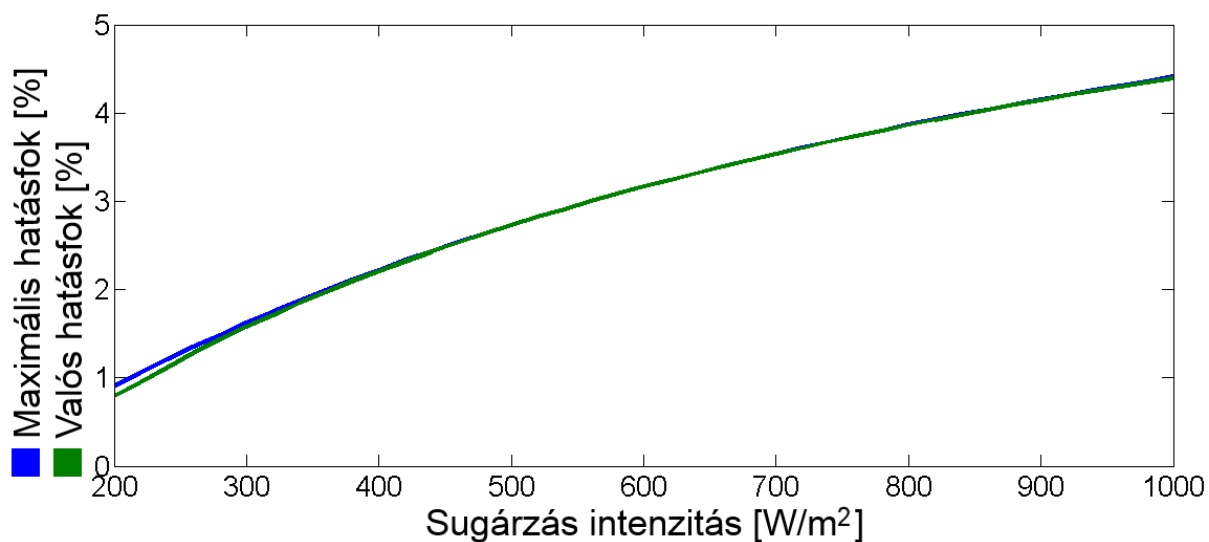
F1.1. táblázat: Vákuumsöves (koncentrátor nélküli) kollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor		Sonnenkraft VK25 vákuumsöves kollektor [14]			
η_0	0,605	a_1	0,85 W/(m ² K)	a_2	0,01 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: R245fa			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

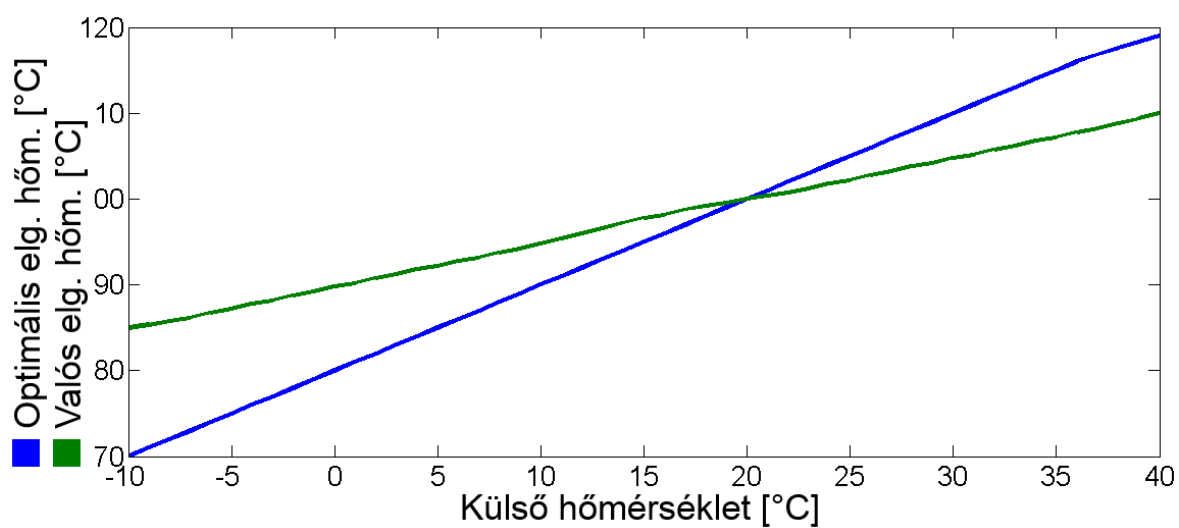
Tervezési állapot: 600 W/m² sugárzás és 20 °C külső hőmérséklet



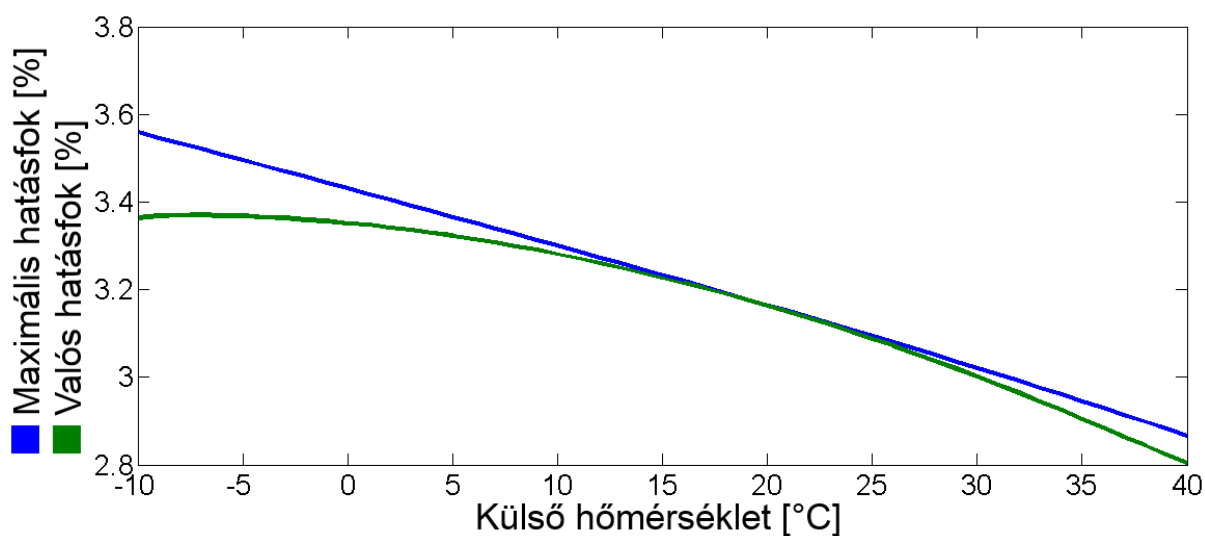
F1.1. ábra: Optimális és valós elgőzőlgési hőmérséklet alakulása a sugárzás függvényében



F1.2. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a sugárzás függvényében



F1.3. ábra: Optimális és valós elgőzölgési hőmérséklet alakulása a külső hőmérséklet függvényében



F1.4. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a külső hőmérséklet függvényében

Parabolavályús (koncentrátoros) kollektort tartalmazó ORC rendszer:

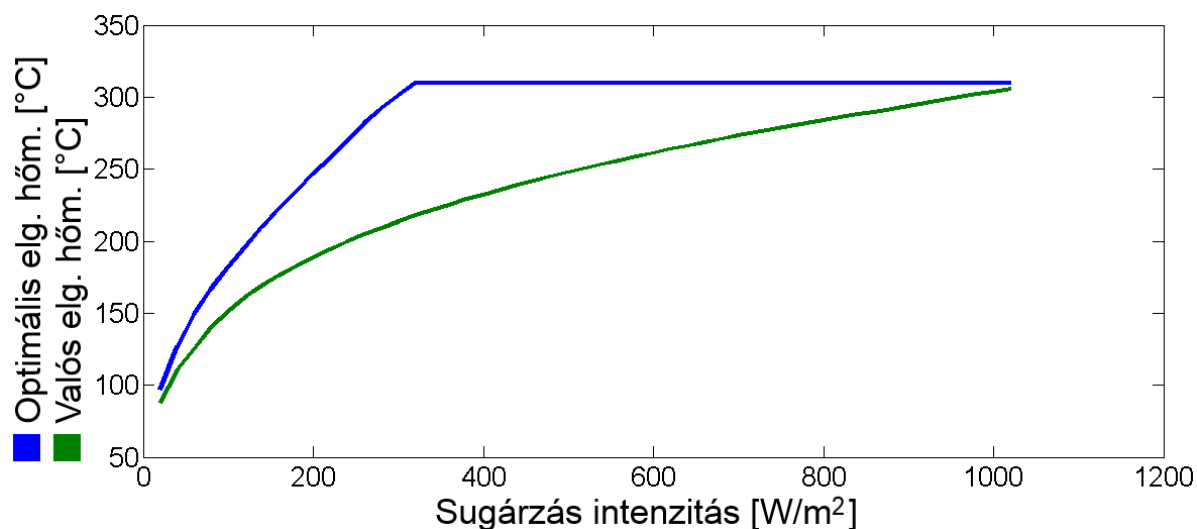
F1.2. táblázat: Parabolavályús (koncentrátoros) kollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor					
η_0	0,773	SEGS LS-2 parabolavályús kollektor [19]			
a_0	0,00007276 1/K	a_1	0,00496 W/(m ² K)	a_2	0,000691 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: Toluol			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

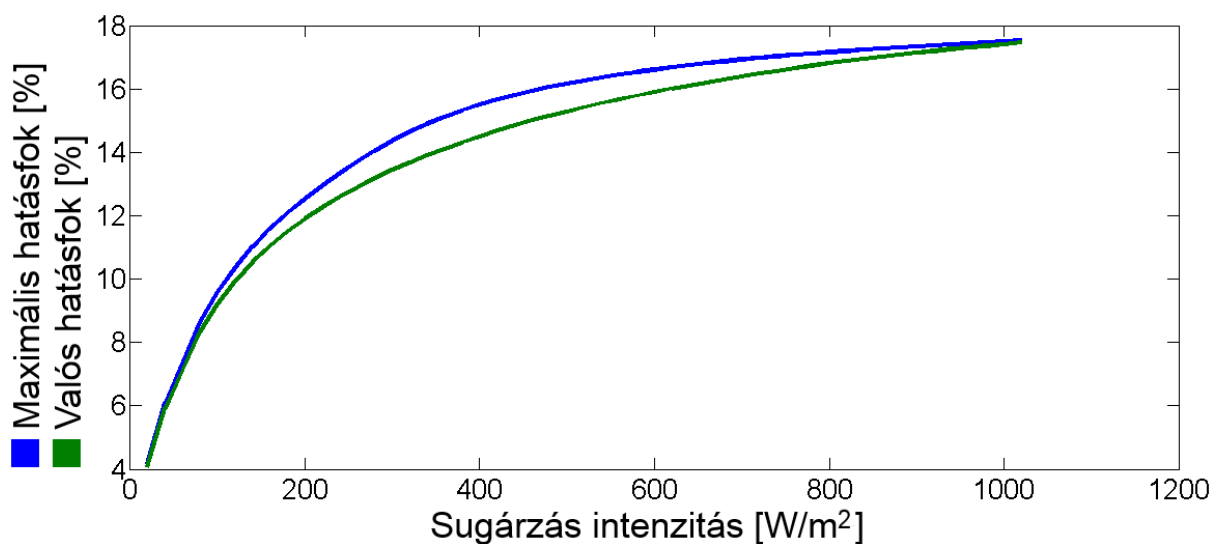
Tervezési állapot: 1000 W/m² sugárzás és 40 °C külső hőmérséklet.

Az elgőzölgés hőmérsékletét ebben az esetben a szerves munkaközeg, a toluol kritikus hőmérséklete korlátozta, így a tervezési állapotot a maximális üzemállapotba kellett felvenni, hogy a hőmérséklet minden egyéb esetben ennél a megengedett korlát alatt legyen.

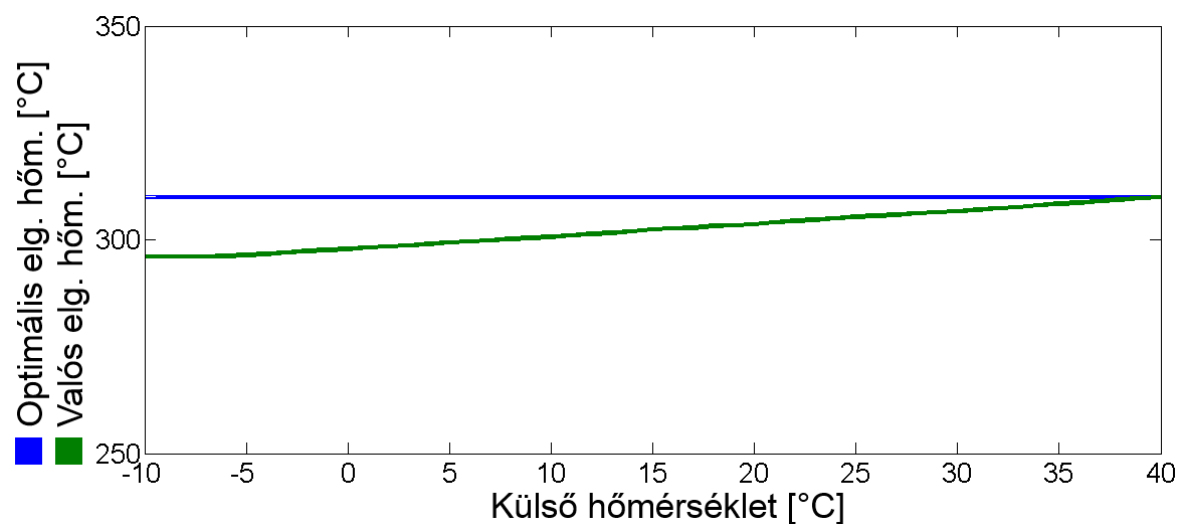
A külső hőmérséklet csökkenése esetén a hatásfok folyamatos növekedését látjuk az F1.8. ábrán, mely növekedés -5 °C alatt megtorpan, és enyhe csökkenésbe megy át. Ennek oka, hogy a toluol minimális megengedhető hőmérséklete miatt a kondenzátorhőmérséklet ebben a tartományban egy adott értéken állandósítottam, így nem követi a külső hőmérséklet csökkenését, mint magasabb hőmérsékletek esetén. A kondenzáció hőmérsékletének korlátozása a gyakorlatban a hűtőközeg tömegáramának csökkenésével oldható meg.



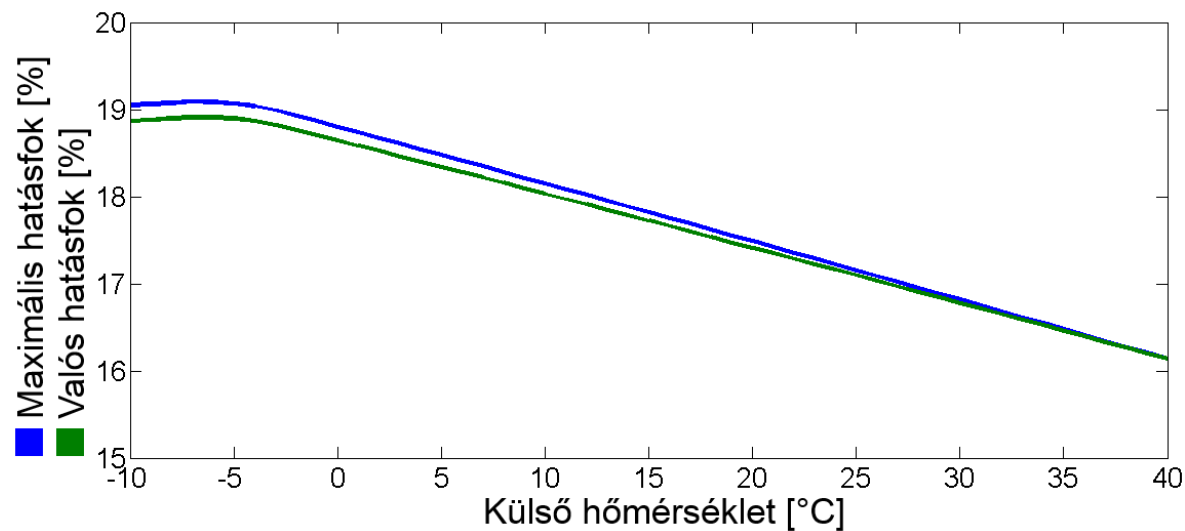
F1.5. ábra: Optimális és valós elgőzölgési hőmérséklet alakulása a sugárzás függvényében



F1.6. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a sugárzás függvényében



F1.7. ábra: Optimális és valós elgőzölgési hőmérséklet alakulása a külső hőmérséklet függvényében



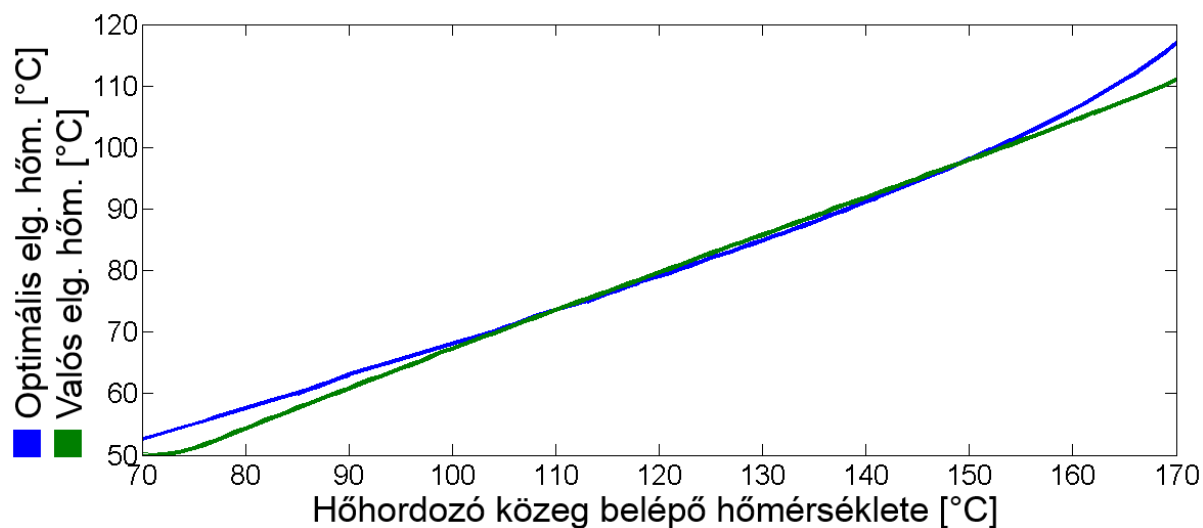
F1.8. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a külső hőmérséklet függvényében

Geotermikus vagy hulladékhő hőforrást hasznosító ORC rendszer:

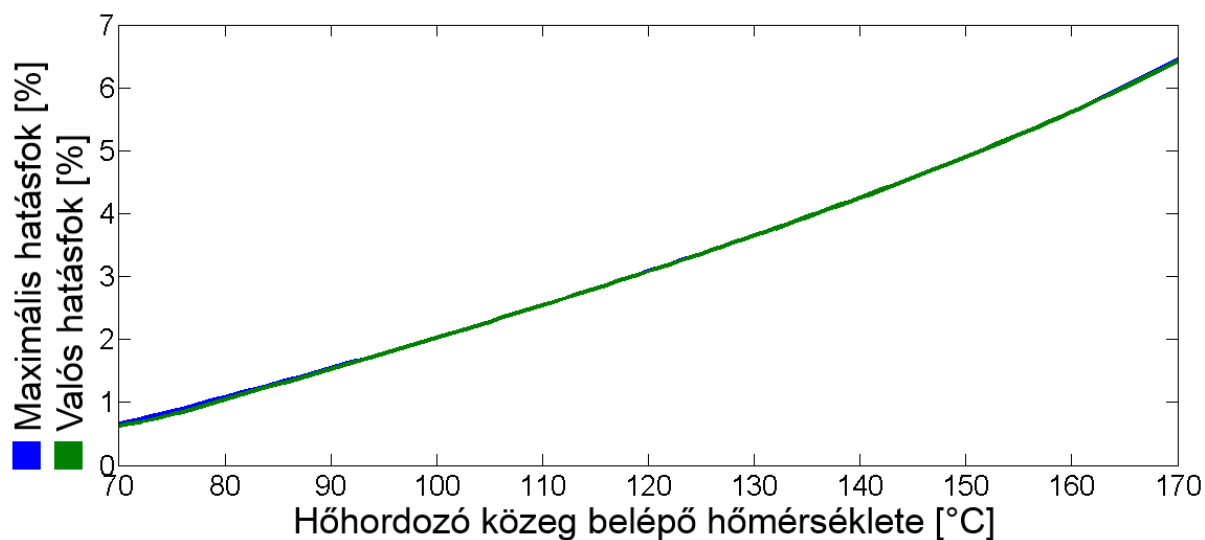
F1.3. táblázat: Geotermikus vagy hulladékhő hőforrást hasznosító ORC rendszer leírása

ORC		Munkaközeg: R245fa			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

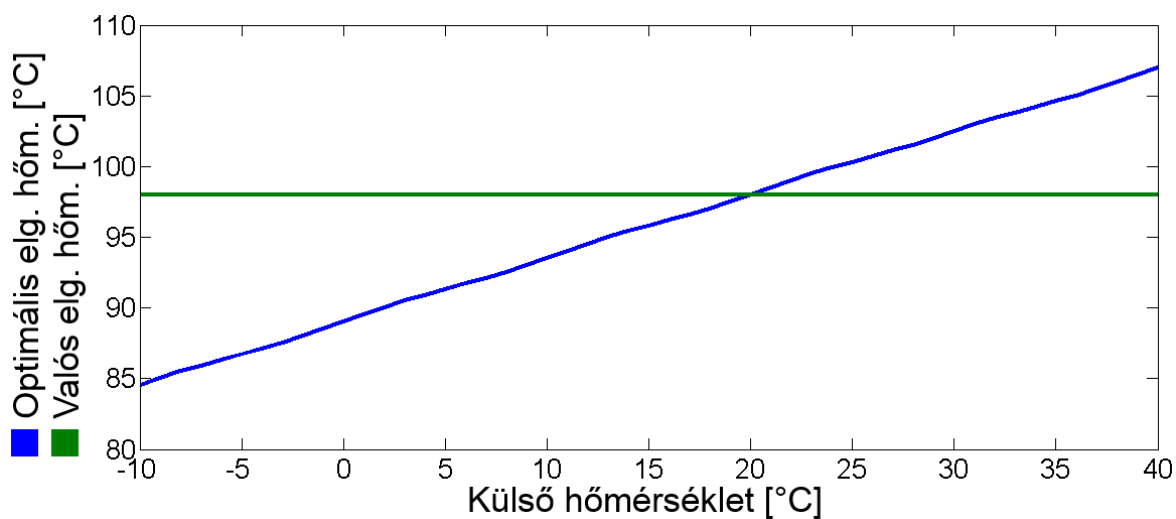
Tervezési állapot: 150 °C hőhordozó közeg előremenő hőmérséklet, 20 °C külső hőmérséklet, tömegáram tetszőleges, a diagram a névleges értékhez viszonyított relatív tömegáramra vonatkozik.



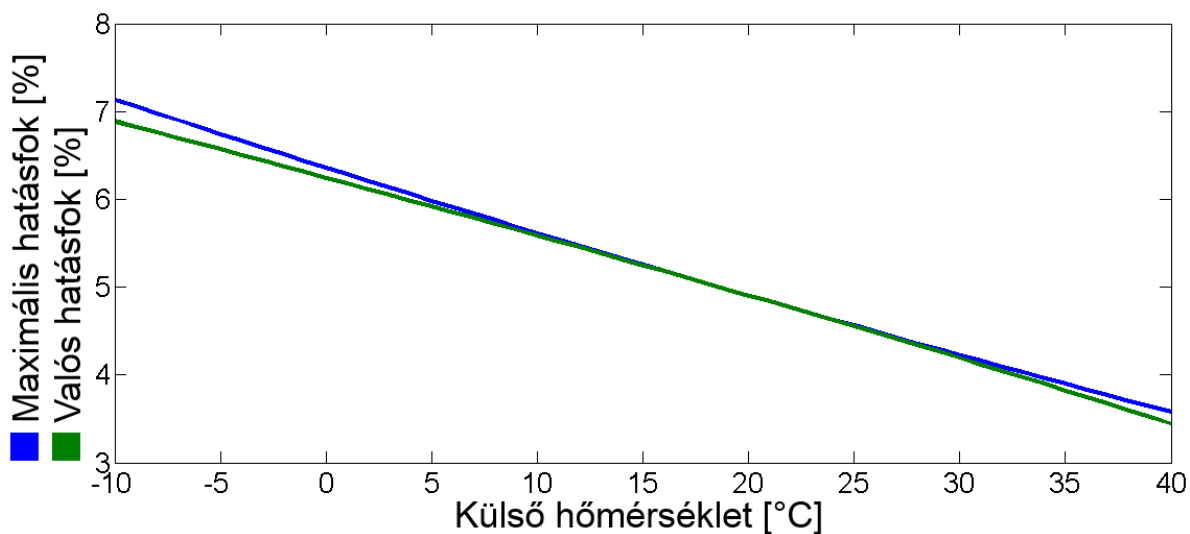
F1.9. ábra: Optimális és valós elgőzölgési hőmérséklet alakulása a hőhordozó közeg előremenő hőmérséklete függvényében



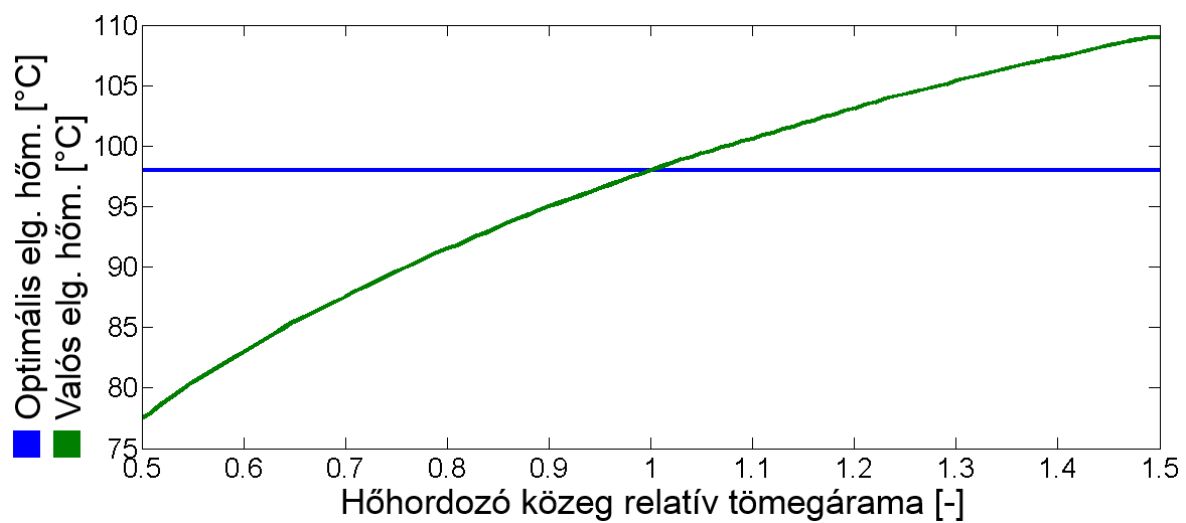
F1.10. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a hőhordozó közeg előremenő hőmérséklete függvényében



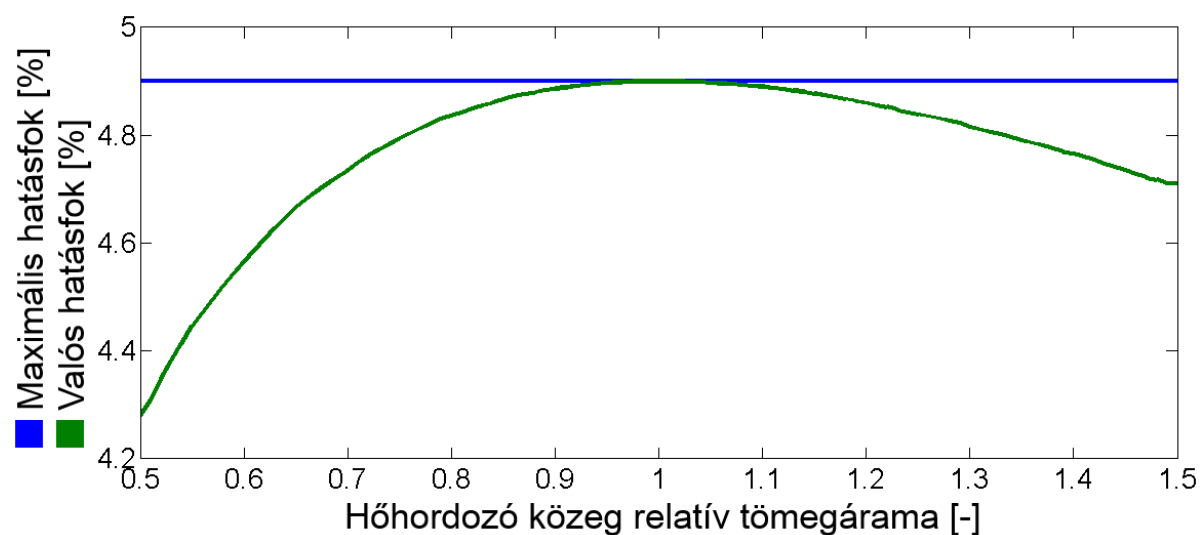
F1.11. ábra: Optimális és valós elgőzölgési hőmérséklet alakulása a külső hőmérséklet függvényében



F1.12. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a külső hőmérséklet függvényében



F1.13. ábra: Optimális és valós elgőzlgési hőmérséklet alakulása a hőhordozó közeg relatív (tervezési értékhez viszonyított) tömegárama függvényében



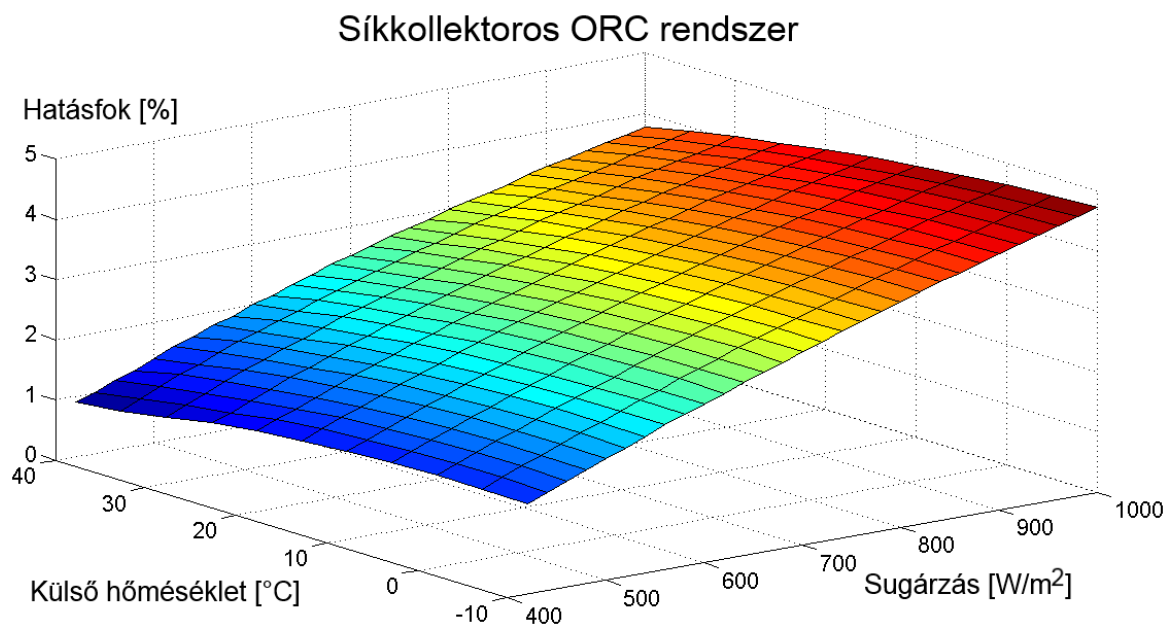
F1.14. ábra: Maximális és valós hatásfok alakulása a hőhordozó közeg relatív (tervezési értékhez viszonyított) tömegárama függvényében

2. Naphőerőművek hatásfokának változása

Síkkollektort tartalmazó ORC rendszer:

F2.1. táblázat: Síkkollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor		EURO C20 AR síkkollektor [12]			
η_0	0,854	a_1	3,37 W/(m ² K)	a_2	0,0104 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: R245fa			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %



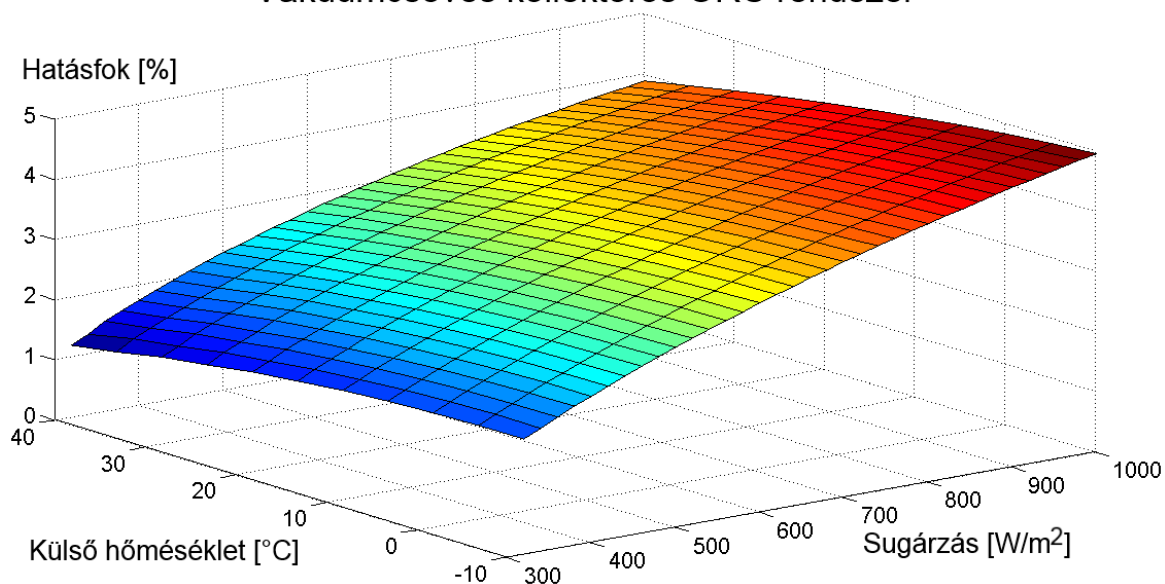
F2.1. ábra: Villamos hatásfok változása a sugárzás és külső hőmérséklet függvényében

Vákuumsöves kollektort tartalmazó ORC rendszer:

F2.2. táblázat: Vákuumsöves kollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor		Sonnenkraft VK25 vákuumsöves kollektor [14]			
η_0	0,605	a_1	0,85 W/(m ² K)	a_2	0,01 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: R245fa			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

Vákuumsöves kollektoros ORC rendszer



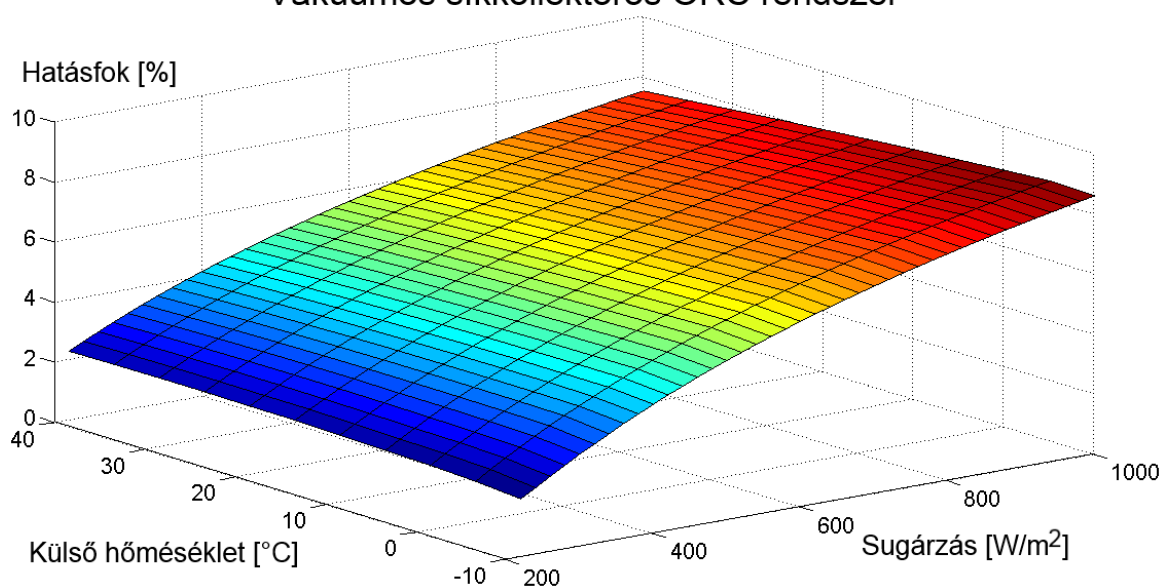
F2.2. ábra: Villamos hatásfok változása a sugárzás és külső hőmérséklet függvényében

Vákuumos síkkollektort tartalmazó ORC rendszer:

F2.3. táblázat: Vákuumos síkkollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor		SRB ENERGY UHV COLLECTOR C1 [16]			
η_0	0,55	a_1	0,67 W/(m ² K)	a_2	0,001 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: Toluol			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

Vákuumos síkkollektoros ORC rendszer



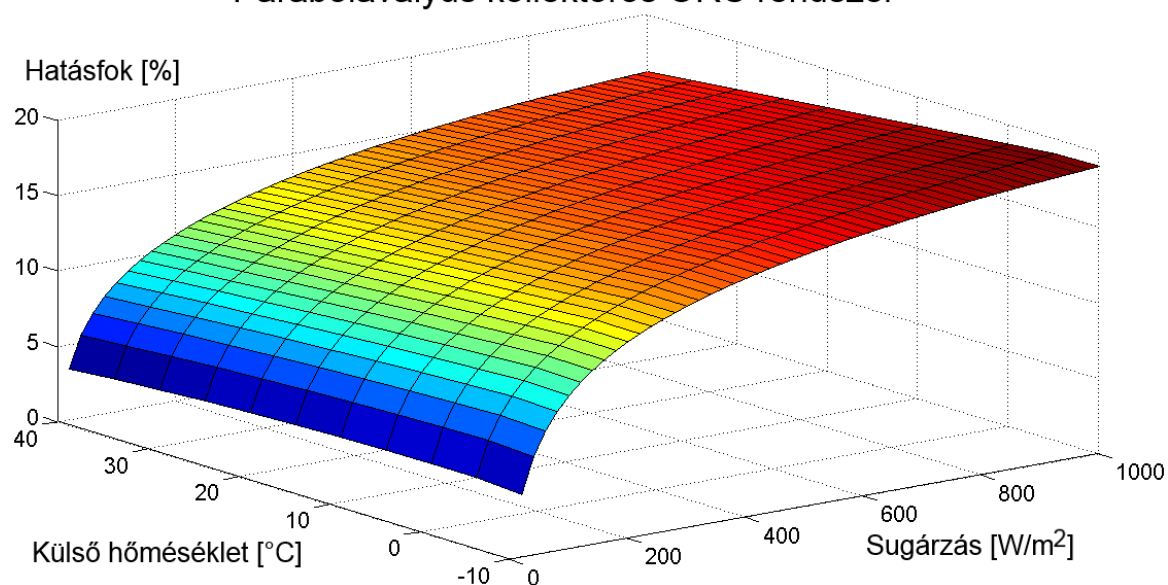
F2.3. ábra: Villamos hatásfok változása a sugárzás és külső hőmérséklet függvényében

Parabolavályús kollektort tartalmazó ORC rendszer:

F2.4. táblázat: Vákuumsöves kollektort tartalmazó ORC rendszer leírása

Napkollektor					
η_0	0,773	SEGS LS-2 parabolavályús kollektor [19]			
a_0	0,00007276 1/K	a_1	0,00496 W/(m ² K)	a_2	0,000691 W/(m ² K ²)
ORC		Munkaközeg: Toluol			
$\Delta T_{kond,min}$	10 °C	$\Delta T_{elg,min}$	5 °C	$\Delta T_{hcs,min}$	5 °C
$\Delta T_{hűtő}$	10 °C	$\Delta T_{elg,be}$	20 °C		
η_{turb}	70 %	η_{gen}	95 %	η_{sziv}	70 %

Parabolavályús kollektoros ORC rendszer



F2.4. ábra: Villamos hatásfok változása a sugárzás és külső hőmérséklet függvényében