

Naphőerőművek szerves Rankine-körfolyamat alkalmazásával

Mayer Martin János

Energetikai mérnök BSc; mayer.martinj@gmail.com

Munkám során kis teljesítményű naphőerőművek alkalmazási lehetőségeit elemeztem, melyek szerves Rankine-körfolyamat segítségével alacsony hőmérsékletű napkollektorokból is képesek villamosenergia-termelésre. A vizsgálathoz modelleket készítettem a napkollektorok és a körfolyamat működésének leírására, melyeken a szükséges optimalizálási feladatok elvégzése után szimulációkat futtattam Matlab segítségével. Négy különböző kollektorral felszerelt rendszert vizsgáltam, melyek legfőbb összehasonlításának alapját a kiserőművek megtérülését befolyásoló alapvető gazdaságossági szempontoknak megfelelően a villamos hatások és a kihasználási tényező jelentette. A kapcsolt hőtermelés és a hő formájában történő energiátárolás lehetőségét is áttekintettem, amelyekkel bizonyos esetekben jelentősen javítható a naphőerőművek gazdaságossága.

*

This paper deals with an assessment of the feasibility of small-scale solar thermal power plants, where the heat produced in low-temperature solar collectors is converted into electricity using an organic Rankine-cycle. Models were created to describe the operation of the solar collectors and the cycle, on which the main optimization tasks and simulations were performed in Matlab. Four systems were analysed with different collector types, where the main comparison criteria were the electrical efficiency and the capacity factor, which are the most important factors influencing the financial return of the small-scale power plants. The possibility of combined heat and power generation and heat storage were also presented, since these can have a great impact on the economic feasibility.

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 napelemes rendszerek beépített teljesítménye világ szinten folyamatosan növekszik a technológia csökkenő árának hatására. A közvetett energiaátalakítás során első lépésben napkollektorokkal hőt állítunk elő, melyből termodinamikai körfolyamat segítségével termelünk villamos energiát. A jelenlegi naphőerőműveket nagy teljesítmény jellemzi, a jó hatások eléréséhez szükséges magas hőmérsékletet a napsugárzás koncentráálásával biztosítják, erre utal az elterjedt CSP (Concentrated Solar Power) rövidítés. Munkám során egy kevésbé vizsgált megoldás, a kis teljesítményű és ezáltal alacsonyabb hőmérsékletű naphőerőművek műszaki és gazdasági lehetőségeinek felderítése volt a célom, amelyek a napelemes rendszerekhez hasonló decentralizált energiatermelést is lehetővé teszik.

A szerves Rankine-körfolyamat (ORC) hasonló a hagyományos víz munkaközegű Rankine-ciklushoz, a szerves munkaközeg eltérő tulajdonságai miatt azonban annál jobb hatásokkal, kedvezőbb kialakítás és üzemi paraméterek mellett képes az alacsony hőmérsékletű hőforrások kihasználására. ORC segítségével az egyszerűbb, nem koncentrátoros napkollektorok által előállított alacsonyabb hőmérsékletű hő is hasznosítható, így vizsgálataim során a síkkollektortól a koncentrátoros parabolavályús kollektorokig több különböző típus alkalmazási lehetőségeit is megvizsgáltam. A cikk tárgyát képező ORC-s naphőerőművekből

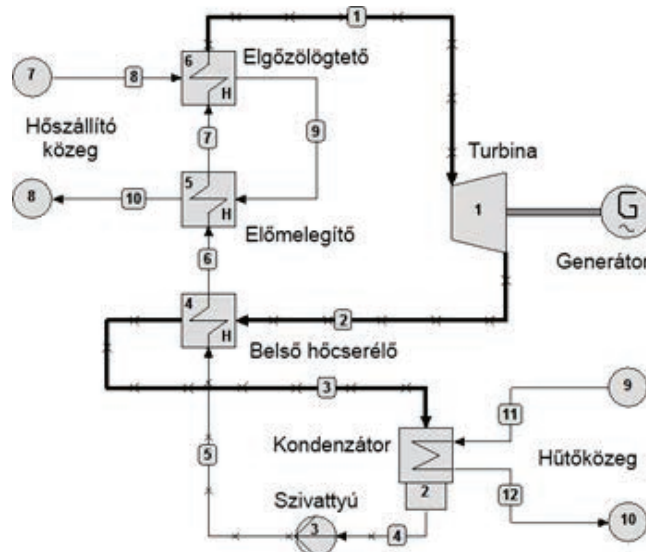
világszinten is csak kevés kísérleti példány létesült, Magyarországon pedig egyáltalán nem található ilyen, így a technológia vizsgálatát a kiserőművek működését leíró modelleken alapuló szimulációs elemzések segítségével végeztem.

Modellalkotás

A modell feladata a rendszert leíró paraméterek ismeretében a bemeneti és kimeneti adatok közti kapcsolat meghatározása. 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 adatok a kiserőmű működését befolyásoló tényezők, esetünkben az időjárási jellemzők, melyek közül a sugárzás és a külső hőmérséklet a legfontosabbak. A rendszert leíró paraméterek kijelölésekor figyelembe kellett venni, hogy bár több adat alapján pontosabb modell készíthető, az eredmények érvényességi köre azonban az adott jól definiált rendszerre korlátozódik, amely bizonytalanná teszi az általános érvényű következtetések levonását. A kiserőmű modellje két önállóan is használható részből, az ORC és a napkollektor modelljéből épül fel, a következőkben ezek főbb jellemzőit és sajátosságait mutatom be.

Szerves Rankine-körfolyamat modellje

Az általam vizsgált naphőerőművekben feltételezett szerves Rankine-ciklus kapcsolási rajza az 1. ábrán látható. A legfontosabb eltérések a Rankine-körfolyamathoz képest, hogy a hőbevitel a megszokott kazán helyett egy hőcserélőn keresztül történik, valamint a szerves munkaközegek jellemző sajátosságai miatt egy turbina utáni belső hőcserélő beépítése általában javítja a hatásfokot.



1. ábra. Szerves Rankine-körfolyamat kapcsolási rajza

A modell elkészítése során a munkaközeg állapotjelzőinek alakulását az egyes berendezésekben alapvető hőtani összefüggések segítsé-

gével, entalpia szemlélet alapján számítottam. A turbina és a szivattyú veszteségeit a forgógépek belső hatásfoka segítségével vettem figyelembe, amelyet a vizsgálatok során 70%-nak választottam. A generátor és a további villamos berendezések együttes hatásfokát 95%-nak tekintettem. Az egyes hőcserélőkben a hőmérséklet-lefutást egy adott megengedhető legkisebb hőfokrés feltételezésével számítottam, melynek értéke a hőcserélőkben áramló közegek halmazállapotától függően, reális tapasztalati értékek alapján 5-10 °C-ot vettem fel. A különböző berendezésekben és csövekben fellépő hőveszteségeket és nyomáseséseket elhanyagoltam, mivel ezek nehezen meghatározható értéke jelentős bizonytalanságot vinne a modellbe, az ebből fakadó hibát azonban a reálisnál kissé alacsonyabbnak választott turbinahatásfok jól ellensúlyozza.

A modell elkészítéséhez és a vizsgálatok futtatásához három különböző programot használtam. A Cycle-Tempo egy hőkörfolyamatok modellezésére szolgáló program, mely a rendszer grafikus felületen történő összeállítás és a paraméterek megadása után saját beépített számítási algoritmusa alapján határozza meg a szükséges eredményeket. A program külső forrásokkal történő kommunikációja, így a napkollektorra vonatkozó modellel történő együttműködés csak nehézkesen oldható meg, így a Cycle-Tempot igazán csak az általam készített modellek validálására, illetve a körfolyamaton végzett nagyobb mértékű változtatások kipróbálására használtam. A modellt Excel és Matlab programokban is elkészítettem, amelyekben a teljes számítási módszert nekem kellett kidolgoznom és megvalósítanom, ami bőséges lehetőséget és több szabadságot biztosított. A munkaközeg állapotjelzői közti összefüggéseket a FluidProp nevezetű bővítménnyel számítom, amelyet a Cycle-Tempo is használ, így az eredmények ilyen szempontból teljesen összevethetőek. Excel segítségével átlátható és könnyen kezelhető grafikus felületet készítettem az adatok bevitelére és az eredmények megjelenítésére egyaránt, ami jelentősen megkönnyíti az egyes hatások megértését és egyéni vizsgálatok elvégzését. A modell sokszori lefuttatásából álló szimulációs vizsgálatokat Matlab segítségével lehet kellően gyorsan és egyszerűen elvégezni.

Napkollektorok modellje

A napkollektor modell feladata annak meghatározása, hogy adott sugárzás és külső hőmérséklet mellett a kollektor milyen tömegáramú közeget képes a kívánt hőmérsékletre melegíteni. A modell tehát a kollektor hatásfok meghatározására vezethető vissza, amely a hőveszteségek vizsgálatán keresztül történik [1]. A hőátbocsátási tényező értékét a hőmérsékletkülönbség lineáris függvényeként közelítve írható fel a hatásfokra az alábbi szabványos egyenlet [2], amelynek paramétereit a legtöbb gyártó közzéteszi a kollektor adatlapján:

$$\eta_{koll} = \eta_0 - a_1 \frac{\Delta T}{S} - a_2 \frac{\Delta T^2}{S} \quad (1)$$

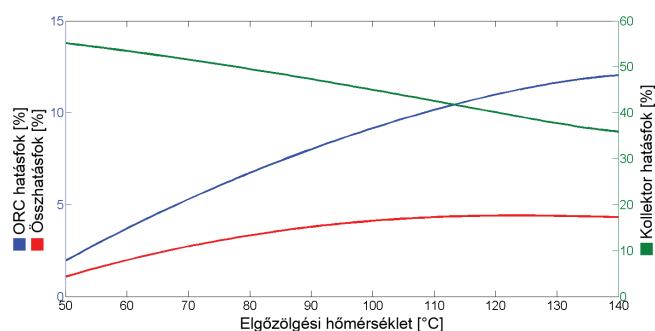
ahol ΔT az abszorber és a környezeti levegő hőmérsékletének különbsége [°C], S a sugárzás intenzitása [W/m^2], η_0 az optikai hatásfok [-], a_1 az elsőrendű [$W/(m^2K)$], a_2 pedig a másodrendű [$W/(m^2K^2)$] hőveszteségi tényező, melyeket általában mérésrel határoznak meg. Az abszorber hőmérséklete közelítőleg a kollektorban áramló közeg hőmérsékletével egyezik meg, amely folyamatosan változik a kollektor hossza mentén, melynek következtében a hatásfok sem állandó. A hatásfok helyfüggését elhanyagolva koncentrált paraméterű modell készíthető, amely a hatásfokot a be- és kilépő hőmérsékletek átlagából képzett hőmérsékletkülönbség segítségével számítja. A módszer előnye az igen egyszerű számítási mód, hátránya azonban a kollektorban jelentkező hőmérsékletváltozással párhuzamosan növekvő pontatlanság. Elosztott paraméterű modellel figyelembe vehető a hatásfok változása, így jelentős hőmérsékletváltozás esetén is pontosabban leírható a kollektor működése egy szétválasztható változójú differenciálegyenlet megoldásával.

A modell pontosságát korlátozza, hogy a kollektorban áramló közeg anyagjellemzőinek hőmérsékletfüggését, valamint a közeg és az abszorber közti hőátadáshoz szükséges hőmérsékletkülönbséget elhanyagoltam, ez azonban a legtöbb esetben nem okoz jelentős hibát. A napkollektor modelljét Excel és Matlab segítségével valósítottam meg, melyekben a kapcsolatot az ORC modellel az elgőzöltető hőcserélőben kialakuló hőmérsékletlefutások alapján felírt hőmérleg egyenletek teremtik meg.

Optimális üzemi jellemzők megválasztása

Az időjárási adatok, valamint a napkollektor és a körfolyamat egyes berendezéseinek jellemzői a fentiek szerint adott vagy felvett értékek, a kiserőmű hatásfokát azonban számos szabadon megválasztható üzemi paraméter is jelentősen befolyásolja. A vizsgálatok során fontos ezek optimális értékeinek meghatározása, hiszen egy rosszul megtervezett rendszerre vonatkozó eredményeknek nincs gyakorlati jelentősége. A hatásfokot meghatározó legfontosabb jellemző az ORC munkaközeg, valamint az elgőzöltető és a kondenzáció hőmérséklete.

A munkaközeg megválasztása összetett feladat, mivel az adott közeggel elérhető hatásfok mellett gazdasági, környezeti és biztonsági szempontokat is figyelembe kell venni. Különböző hőmérséklet-határok közt más-más munkaközeg használata célszerű, így a választás során támpontot nyújt a közeg kritikus hőmérséklete és nyomása, de az összetett hatások miatt közvetlen optimalizálási eljárás nem alakítható ki. A legalkalmasabb közeget a modell több különböző anyaggal történő futtatása során kapott eredmények összehasonlításával határoztam meg. A kondenzáció hőmérsékletének csökkentése javítja a körfolyamat hatásfokát, ehhez azonban a hűtőközeg tömegáramának növelése szükséges, amely az üzemeltetési költségek növekedésével jár. Az optimális érték gazdasági szempontok alapján határozható meg, melyről annak bizonytalansága miatt inkább eltekintettem, és a kondenzáció és a hűtőközeg hőmérséklete közti kapcsolat leírásához az adott hűtési módra vonatkozó tapasztalati értékeket vettem alapul. A kiserőmű hatásfokát az elgőzöltető hőmérséklete befolyásolja a legnagyobb mértékben, így ennek helyes megválasztása döntő fontosságú. Magasabb hőmérséklet jobb körfolyamati hatásfokot eredményez, azonban a kollektorban a hő előállítását magasabb hőmérsékleten teszi szükségessé, amely alacsonyabb kollektor hatásfokot jelent. A kiserőmű összh hatásfoka e két részhatásfok szorzataként áll elő, így meghatározható egy olyan elgőzöltési hőmérséklet, amelynél



2. ábra. Hatásfokok alakulása az elgőzöltési hőmérséklet függvényében napkollektoros ORC rendszerénél

az összhatásfok maximális. Az egyes hatásfokok alakulását a hőmérséklet függvényében a 2. ábra mutatja. Az összhatásfok az elgőzölgtetési hőmérséklet egy viszonylag széles tartományában közel állandó, így a hőmérséklet optimálistól való eltérése csak kis mértékű teljesítménycsökkenést okoz.

Részterheléses üzemvitel

A rendszer bizonyos jellemzői csak tervezési állapotban választhatóak meg tetszőlegesen, az ettől eltérő részterhelésű állapotokban az egyes berendezések jellemzői és a folyamat szabályozási módja határozzák meg értéküket. Egy tároló nélküli naphőerőmű teljesítménye nem szabályozható tetszőlegesen, hanem a kiserőmű üzemállapotát a környezeti adatok határozzák meg. Különböző részterhelési üzemállapotokban az egyes berendezések leírására használt jellemzők is változnak, ezek nem túl jelentős, és sok esetben egymást ellensúlyozó hatása miatt ezt legtöbbször nem vettem figyelembe, hanem átlagos értékekkel számoltam.

A sugárzás és a külső hőmérséklet változása a kollektor és az ORC hatásfokát egyaránt befolyásolja, így ezek függvényében az összhatásfok maximális értéke mellett az ahhoz tartozó optimális elgőzölgtetési hőmérséklet is jelentősen változik. Az elgőzölgtetés nyomását és hőmérsékletét a turbinaszabályozás befolyásolja, amelynek megválasztásakor arra kell törekedni, hogy a kialakuló elgőzölgtetési hőmérséklet az időjárási jellemzők változása esetén is minél jobban megközelítse az optimális értéket. A fűvókacsoportos, a fojtásos és a csúszónyomású turbinaszabályozás közül az utóbbi felel meg legjobban a követelménynek, valamint költségek és bonyolultság szempontjából is ez a legkedvezőbb. Csúszónyomású szabályozás esetén nem építünk be szabályozószelepet a turbina elé, így az elgőzölgtetés hőmérsékletét a turbina gőznyelése határozza meg. A gőz tömegárama és az elgőzölgtetési nyomás között egyfokozatú akciós turbina esetén az alábbi összefüggés áll fent [3]:

$$\dot{m}_G = k \frac{p_{be}}{\sqrt{T_{be}}} \Psi(\varepsilon) \quad (2)$$

ahol $\dot{m}_G$ a gőz tömegárama [kg/s], $\varepsilon = p_{be}/p_{ki}$ a nyomásviszony [-], p_{be} és p_{ki} a turbina előtti és utáni nyomás [bar], T_{be} a turbina előtti gőzhőmérséklet [°C], k a turbinára jellemző állandó, Ψ pedig a nyomásviszonytól függő tényező, melynek értéke a kritikus nyomásviszony felett állandó. A modellben az elgőzölgtetési hőmérsékletet minden részterhelésű üzemállapotban a fenti egyenlet alapján számítottam, a tervezési állapotot pedig aszerint választottam meg, hogy az elgőzölgtetési hőmérséklet minden üzemállapotban közel legyen az optimális értékhez.

Eredmények

Az elkészített modellek alapján Matlab segítségével végeztem el a technológia lehetőségeit feltáró szimulációs vizsgálatokat. Négy különböző napkollektort vizsgáltam, ezek az egyre jobb szigetelési tulajdonságok, így egyre magasabb elérhető hőmérsékletek szerint növekvő sorrendben a következők: síkkollektor [4], vákuumcsöves kollektor [5], vákuumos síkkollektor [6] és parabolavályús kollektor [7]. Az ORC körfolyamat munkaközegeként az első két esetben R245fa közegét, míg a második kettőnél toluolt használtam, mivel az adott hőmérséklettartományban ezek szolgáltatták a legkedvezőbb eredményeket, és mindkét anyag gyakorlati alkalmazására találhatók példák.

A technológia bemutatása előtt egy rövid gazdaságossági áttekintésre van szükség, amely bemutatja, hogy az egyes számított jellemzők és mutatók közül melyiknek mekkora a jelentősége, és milyen módon befolyásolja a kiserőművek megtérülését. A felhasznált dinamikus gazdaságossági modell alapja a befektetés nettó jelenértékének (NPV) szá-

mítása a pénz időértékének figyelembevételével. Az egyszeri beruházási költség után éves szinten megegyező bevételeket és kiadásokat feltételezve a beruházás nettó jelenértéke az alábbiak szerint számítható:

$$NPV = (c_E E + c_Q Q - C_0) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r(1+r)^n} \right) - C_0 \quad (3)$$

ahol C_0 a beruházási költség [Ft], c_E a villamos energia értékesítési egységköltsége [Ft/kWh], E a termelt villamos energia éves mennyisége [kWh], c_Q a hő értékesítési egységköltsége [Ft/kJ], Q az éves termelt hőmennyiség [kJ], C_0 az üzemeltetési költség [Ft], n a vizsgált évek száma [-], r pedig a diszkontráta [-]. A megtérülés határát az $NPV = 0$ feltétel jelenti, ekkor a befektetés n év alatt, az r diszkontrátának megfelelő hozammal térül meg. Tisztán villamosenergia-termelést feltételezve és az üzemi költséget elhanyagolva, valamint a beruházási költséget és a termelt energiát a kiserőmű névleges teljesítményére fajlagosítva az egyenlet az alábbi egyszerűbb alakba hozható:

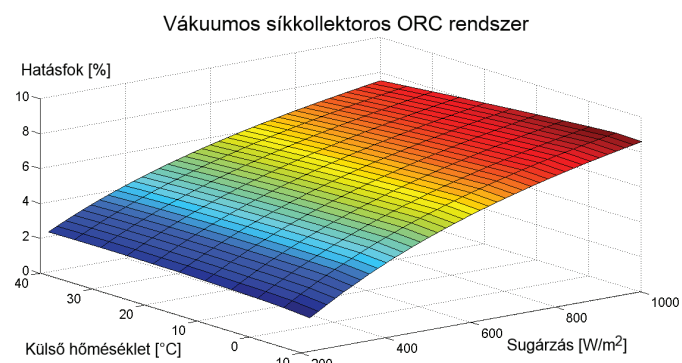
$$r \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right)^{-1} = \frac{c_E E}{C_0} = \frac{c_E}{a} \tau_{cs} \quad (4)$$

ahol a jelöli a fajlagos beruházási költséget [Ft/kW], τ_{cs} pedig az éves csúcskihasználási óraszám [h]. A fajlagos mennyiségek használatának előnye, hogy különböző névleges teljesítményű kiserőművek is összehasonlíthatóvá válnak.

Mivel az energiatermeléshez nincs szükség tüzelőanyag felhasználására, így a kiserőmű változó költségei alacsonyak, és a megtérülést a hatásfok helyett elsődlegesen a termelt energia mennyisége, és az ennek megfelelően csúcskihasználási óraszám határozza meg, ahogy ez a (4) egyenletből látható. A hatásfok a kívánt teljesítmény eléréséhez szükséges bevitt hőmennyiséget, ezen keresztül a szükséges kollektor felületet befolyásolja. Magasabb hatásfok esetén fajlagosan kevesebb kollektorra van szükség, így bár a hatásfok közvetlenül nem jelenik meg a (4) egyenletben, a fajlagos beruházási költségen keresztül ez is befolyásolja a megtérülést.

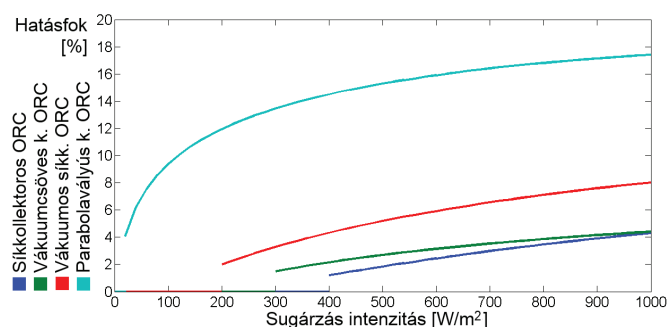
Villamosenergia-termelés hatásfoka

A naphőerőművek élettartamuk döntő részében nem tervezési állapotban, hanem az időjárási jellemzők által meghatározott üzemállapotban működnek, így a hatásfok névleges értéke mellett fontos a sugárzás- és hőmérsékletfüggésének vizsgálata is. A 3. ábra egy vákuumos síkkollektoros ORC kiserőmű hatásfokát mutatja a sugárzás és a külső hőmérséklet függvényében. A hőmérséklet csökkenésével a hatásfok kis mértékben növekszik, ennél azonban sokkal jelentősebb a változás a sugárzás függvényében, melynek alacsony értékénél a hatásfok jelentősen lecsökken a kollektor hatásfokának romlása miatt.



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

A hatásfok hőmérsékletfüggése a különböző kollektorral felszerelt kísérőművek esetében is hasonló, a sugárzásfüggés azonban jelentősen eltér a különböző típusok esetén. A 4. ábrán egy diagramban láthatóak a különböző naphőerőművek hatásfokai, amelyen egyértelműen látszik, hogy a jobban szigetelt kollektorok minden esetben magasabb hatásfokot eredményeznek. A három nem koncentrátoros kollektor esetén a hatásfok kis értéke mellett további problémát jelent, hogy alacsony sugárzás esetén az elindításukra sincs lehetőség. A vizsgált koncentrátoros, parabolavályús napkollektor ezzel szemben már egészen alacsony sugárzástól képes a többi lehetőségénél jóval magasabb hatásfokú működésre.



4. ábra. Különböző kollektort tartalmazó ORC kísérőművek hatásfoka a sugárzás függvényében

Éves energiatermelés

Az éves szinten termelt energia mennyiségének előrejelzése a megterülés számítása szempontjából is fontos, emellett jó összehasonlítási alapot teremt, mivel a különböző üzemállapotokat az éves tényleges előfordulási gyakoriságuknak megfelelő súllyal veszi figyelembe. Az éves energiatermelés számításához valamilyen meteorológiai adatbázisra van szükség, amely egy átlagos évre vonatkozó párhuzamosan mért, legalább órás bontású sugárzás és hőmérsékletadatokat tartalmaz. Számításaimhoz használt adatbázis a Meteororm programból származik [8], amely az év minden napjára tartalmaz órás bontású adatokat.

A számítást egy Debrecen melletti, é. sz. 47° 29' 25", k. h. 21° 35' 59" földrajzi koordinátákkal leírt helyszínre végeztem, de a sugárzási adatok és így a kapott eredmények az ország többi részén sem térnek el jelentősen. A nem koncentrátoros kollektorok esetében általában nem alkalmazunk napkövetést, így egy optimális tájolású, 35° dőlés-szögű déli irányú felületre vonatkozó globálisugárzás adatokkal számoltam. A koncentrátoros kollektorok esetében azonban napkövetés szükséges, valamint ezek a kollektorok nem képesek a szórt sugárzás hasznosítására, így a DNI (direct normal irradiation) adatokat kell használni. A szórt sugárzás részaránya Magyarországon a gyakori borús időjárás miatt jelentős, így a DNI alapján számolt éves besugárzás a napkövetés ellenére is mintegy 28%-kal alacsonyabb a többi kollektor által hasznosítható globálisugárzásból származó értékénél.

A számítás eredményeit az 1. táblázat tartalmazza, amelybe a négy különböző naphőerőmű mellé egy szokványos napelemes rendszerre vonatkozó adatokat is feltüntettem egy korábbi munkám alapján [9]. A kísérőművek névleges teljesítményét egységesen 100 kW-nak választottam, a termelt energia mennyisége és a szükséges kollektor felület erre az értékre vonatkozik. Az 1000 W/m² sugárzáshoz tartozó névleges hatásfoknál láthatóan minden esetben alacsonyabb az éves átlagos hatásfok, de míg a nem koncentrátoros kollektorok esetén az eltérés arányaiban igen jelentős, a koncentrátoros naphőerőművek

1. táblázat. Naperőművi rendszerek éves energiatermelési és ebből származtatott adatai

	Éves energia-termelés [MWh]	Névleges hatásfok	Éves átlagos hatásfok	Fajlagos energia-termelés [kWh/kW]	Kihasználási tényező	Kollektor felület [m²]
Síkkollektoros ORC	77,80	3,75%	1,90%	778	8,88%	2667
Vákuumsőves koll. ORC	96,67	4,12%	2,59%	967	11,03%	2427
Vákuumos síkkoll. ORC	107,37	7,63%	5,34%	1074	12,26%	1310
Parabolavályús koll. ORC	95,61	17,34%	14,99%	956	10,91%	572
Napelemes rendszer	133,00	15,2%	13,17%	1330	15,18%	658

és napelemek esetében a különbség lényegesen kisebb. A névleges teljesítményre vonatkoztatott fajlagos energiatermelés a csúskihasználási óraszámával megegyező mutató, a kihasználási tényező pedig ennek százalékos értéke az éves összes óráshoz viszonyítva. Ezek a gazdaságosságot döntően befolyásoló mutatók a magasabb hőmérsékletű kollektorok alkalmazásával egyre növekednek, azonban minden esetben elmaradnak a napelemekre jellemző értéktől. A napkollektorok szükséges felülete, mely a névleges hatásfokokkal fordított arányban változik, a fajlagos beruházási költséget befolyásolja, szintén a koncentrátoros kollektorok és a napelemes rendszerek esetén kedvezőbb.

Kapcsolt hőtermelés kialakítása

A napkollektoros ORC rendszerek a bemutatott eredmények alapján önmagukban általában nem bizonyulnak kellően gazdaságosnak, a megtérülési mutatók javítása céljából érdemes lehet a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés kialakítása. A kapcsolt hőtermelésnél ellennyomású turbina használatát feltételeztem, így a kondenzátorban leadott teljes hőmennyiség hasznosításra kerül. A kapcsolt hőtermelés esetén meghatározó a kiadott hő kívánt hőmérsékletszintje, mivel annak növelésével párhuzamosan csökken a kiadható villamos energia mennyisége. A szükséges hőmérsékletet a rendelkezésre álló hőigény jellege, a kialakított távhőrendszer mérete és annak veszteségei határozzák meg. Kis méretű távhőrendszer esetén, korszerű fűtési rendszerek és használati melegvíz előállítására használt hő esetén 75 °C hőmérséklet megfelelő, így a 2. táblázatban az erre vonatkozó eredményeim láthatóak. Padlófűtés használata esetén akár 55 °C hőmérséklet is elegendő lehet, ebben az esetben a kiadható villamos energia mennyisége, és így a kapott eredmények még kedvezőbbek.

2. 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%
Vákuumsőves koll. ORC	39,83	10,25	432,50	712,45
	2,59%	0,67%	28,18%	46,41%
Vákuumos síkkoll. ORC	81,95	62,42	495,20	721,21
	5,34%	4,07%	32,26%	46,98%
Parabolavályús koll. ORC	167,14	130,93	567,11	806,73
	14,99%	11,74%	50,86%	72,35%

A kapcsolt energiatermelésre vonatkozó hő- és villamosenergia-termelési adatok mellé összehasonlításként a tiszta villamosenergia-termelés és az adott felületű napkollektorral, ORC rendszer nélkül elérhető tiszta hőtermelésre vonatkozó eredményeket is megjelenítettem. Síkkollektor esetén a gyakori alacsony hőmérsékletek miatt nincs is lehetőség adott hőmérsékletű hőkiadás mellett kapcsolt termelésre, vákuumcsöves kollektoroknál pedig a tiszta hőtermeléshez képest a kapcsolt termelés kialakítása az ORC rendszer jelentős többletköltségével és a termelt hő jelentős csökkenésével jár, és szinte elhanyagolható mennyiségű villamos energia termelését eredményezi. Megfelelően nagy hőigény rendelkezésre állása esetén ezen kollektorok segítségével tehát célszerűbb tisztán hő termelése, mint ORC-s naphőerőmű létesítése. Vákuumos síkkollektor és parabolavályús kollektor esetén a termelt energia viszonylag kis csökkenése árán jelentős hőmennyiség termelhető, így ebben az esetben gazdaságos lehet a kapcsolt energiatermelés kiépítése.

Energiatárolás

A naphőerőművekben különleges lehetőség a napelemes rendszerekhez képest, hogy a villamos energia akkumulátoros tárolása helyett gazdaságosabban megvalósítható hőtárolásra is lehetőség van. A tároló a napkollektorok és az ORC közé kerül beépítésre, és hőmérsékletszinttől és kialakítástól függően számos különböző típusa létezik. Legegyszerűbb ezek közül a kollektorból kilépő felmelegített közeg közvetlen tárolása, ehhez azonban nagy közegmennyiség és a meleg- és hidegágon egy-egy nagyméretű tartály beiktatása szükséges.

A tárolásnak több különböző célja lehet, melyek eltérő tárolási stratégiát igényelnek. Elsődleges cél lehet a kiserőmű kihasználási tényezőjének növelése azáltal, hogy a kollektorok által napközben összegyűjtött hőből a körfolyamat hosszabb időn át termel villamos energiát. Az ORC rendszert ekkor nem a csúcs hőigényre, hanem egy átlagos értékre kell méretezni, amellyel jelentős költség takarítható meg, mely részben vagy teljesen fedezheti a tároló kiépítésének költségeit. Másik cél lehet a naphőerőmű termelésének a fogyasztói igényekkel történő időbeli összehangolása, amely a rendszerterheléstől és más erőművek működésétől függő differenciált tarifarendszerrel ösztönözhető, és elősegíti a villamosenergia-rendszer szabályozását. Kapcsolt hőtermelés esetén fontos, hogy hőkiadásra ne csak napsütés esetén legyen lehetőség, amikor általában a legkevésbé van szükség rá, hanem a tároló kapacitásának erejéig tetszőleges időben.

A gazdaságos tároláshoz lehetőség szerint magas hőmérsékletű tárolóra van szükség, hogy ugyanazt a hőmennyiséget a nagyobb hőmérsékletváltozás hatására kisebb mennyiségű és térfogatú közegben tudjuk elraktározni. A tárolót emellett állandó hőmérséklet jellemzi, így a kollektoroknak a sugárzástól függetlenül állandó, magas hőmérsékletet kell előállítaniuk. A bemutatott kollektorok közül egyedül a parabolavályús volt az, amelyik széles sugárzástartományban képes magas hőmérsékletű hő viszonylag jó hatásfokú előállítására, így a tárolás leginkább az ilyen kiserőművek esetében gazdaságos. A tárolás mellett praktikus biomassza alapú póttüzelés segítségével tovább fokozhatóak a fenti kedvező hatások, ezáltal akár szigetüzemű működtetésre is jó lehetőség lehet.

Következtetések

A szerves Rankine-körfolyamat már nem koncentrátoros, alacsony hőmérsékletű napkollektorok felhasználásával is lehetővé teszi villamos energiát termelő naphőerőmű létesítését. A naphőerőművek

villamos hatásfoka erősen függ a sugárzás értékétől, így az éves átlagos hatásfok többnyire jelentősen elmarad a névleges hatásfoktól, amit figyelembe kell venni a különböző lehetőségek értékelése során. A hatásfok a sugárzással párhuzamosan növekszik, így olyan területekre érdemes a naphőerőműveket telepíteni, ahol gyakori a magas sugárzás, ezzel szemben a napelemes rendszerek alacsonyabb sugárzás esetén is képesek jó hatásfokú működésre.

Nem koncentrátoros kollektorok alkalmazásával villamosenergia-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 termelés és tárolás 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, amelyikre alapozva érdemes lehet ORC rendszert létrehozni.

A koncentrátoros, parabolavályús kollektort használó naphőerőművek a napenergia jó hatásfokú hasznosítására képesek, valamint kapcsolt energiatermelés kialakításának és hőtároló beépítésének lehetőségei is kedvezőek. A koncentrátoros naphőerőművek komoly hátránya a napelemekkel szemben, hogy nem képesek a Magyarországon viszonylag jelentős arányú szórt sugárzás hasznosítására, így ezek előnyei főként a délebbi, naposabb területeken mutatkoznak meg. Magyarországon tisztán villamosenergia-termelést tekintve a napelemes rendszerek mutatói a kedvezőbbek, ám a kapcsolt hőtermelésből és tárolásból fakadó előnyök a naphőerőműveket is gazdaságossá tehetik.

Irodalomjegyzék

- [1] DUFFIE, J. A., BACKMAN, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd edition, Wiley-Interscience, 1991
- [2] 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 (2014. okt. 15.)
- [3] CZINDER J.: Erőművek szabályozása. Műegyetemi Kiadó, 2000
- [4] WAGNER SOLAR: EURO C20/22 AR napkollektor: Műszaki információk. <http://wagnersolar.hu/js/jQuery-elFinder/files/Files/EURO-C20-C22.pdf> (2014. okt. 15.)
- [5] SONNENKRAFT: Kollektorok. <http://www.sonnenkraft.hu/magan-hazak/a-megoldasok/kollektorok/> (2014. okt. 15.)
- [6] SRB ENERGY: The UHV collector: Collector Features. <http://www.srbenergy.com/pages/caracteristicas-del-colector> (2014. okt. 15.)
- [7] NREL: Test Results SEGS LS-2 Solar Collector. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/segs_ls2_solar_collector.pdf (2014. okt. 15.)
- [8] METEONORM: Irradiation database. <http://meteonorm.com/> (2014. okt. 30.)
- [9] MAYER M. J.: Napelemek termelés előrejelzésének pontosítása. TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2013