

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



BUZEA KLAUDIA

TDK DOLGOZAT

Fotovillamos és koncentrátoros napenergia-hasznosítás összehasonlítása

Konzulens:

Dr. Gács Iván

egyetemi docens

Budapest, 2013.október 25.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés.....	1
2. A napenergia-hasznosítás jelenlegi helyzete.....	2
3. Villamosenergia-termelés napenergiából.....	3
3.1. Naptó	3
3.2. Napkémény.....	4
3.3. Napelemek.....	5
3.3.1. Fotovillamos rendszerek típusai.....	6
3.3.2. Napelem cella típusok	6
3.4. A napsugárzás koncentrálásán alapuló hasznosítás.....	7
3.4.1. Megvalósult, épülő és tervezett naphőerőművek	8
3.4.2. Napsugárzás koncentráló alrendszer	10
3.4.3. Parabolavályús koncentrálás	14
3.4.4. Fresnel- kollektoros koncentrálás.....	15
3.4.5. Naptányéros koncentrálás.....	16
3.4.6. Naptorony.....	17
3.4.7. Hőtároló alrendszer	18
3.4.8. Hőhasznosító körfolyamat.....	22
4. Villamosenergia-termelési módok összehasonlítása.....	25
4.1. Területigény.....	25
4.2. Műszaki és gazdaságossági összehasonlítás kiinduló paraméterei.....	27
4.3. Napelem-park	30
4.3.1. Műszaki összehasonlítás.....	30
4.3.2. Gazdasági összehasonlítás.....	32
4.4. Parabolavályús naphőerőmű tárolás nélkül	33
4.4.1. Műszaki összehasonlítás.....	33
4.4.2. Gazdasági összehasonlítás.....	37
4.5. Parabolavályús naphőerőmű tárolással.....	37
4.5.1. Műszaki összehasonlítás.....	37
4.5.2. Gazdasági összehasonlítás.....	38

4.6. Eredmények összehasonlítása.....	39
5. DESERTEC koncepció	41
5.1. Villamosenergia-termelés és kapacitások.....	41
5.2. Villamosenergia-tárolás és szállítás.....	42
5.3. Költségek	44
6. Összefoglalás.....	46
6.1. Eredmények	46
6.2. Tanulságok, javaslatok	48
7. Felhasznált források	50
8. Mellékletek.....	52

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

Fosszilis energia szén-dioxid leválasztással és tárolással, vízenergia, szélenergia, geotermikus energia, napenergia. Az európai energiapolitikák és energiastratégiák döntő többsége ma a karbonmentes energiatermelést, a megújuló energiák nagyfokú hasznosítását tűzte ki célul, melyhez a fent felsorolt technológiák már most rendelkezésünkre állnak. A jelenlegi energiaforrásokhoz képest azonban a fentiek drágák, sok esetben nehéz a rendszerbe illeszthetőségük hektikus termelésük miatt és területigényük is specifikus vagy korlátozott. A célok azonban megvannak és a műszaki fejlesztések, optimalizálások elengedhetetlenek ahhoz, hogy elérhessük őket.

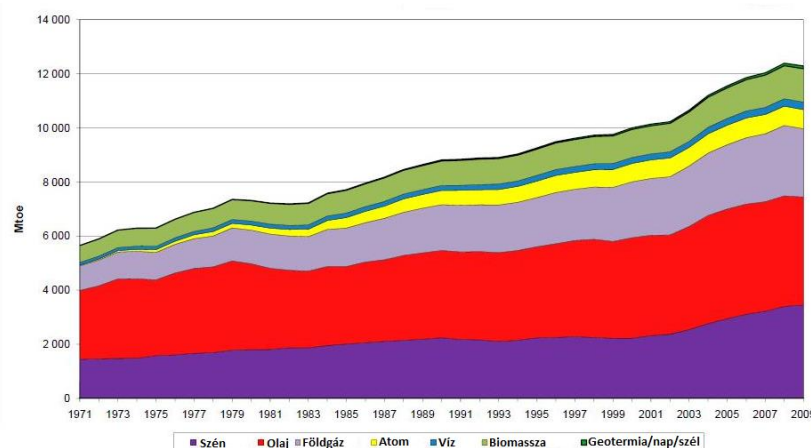
Dolgozatom alapötletét egy kevésbé elterjedt napenergiahasznosítási mód és a hozzá kapcsolódó hasznosítási, rendszerbe kapcsolási koncepció adta. A naphőerőművek a villamos energiatermelésben ma kisebb hangsúlyt kapnak, mint a fotovillamos rendszerek, főleg azért, mert fogyasztói szinten csak utóbbiak tudnak könnyen teret hódítani. A naphőerőművekhez kapcsolódó úgynevezett DESERTEC koncepció azonban új területeket és forrásokat nyit meg az Európai Unió és a befektetők előtt. Az elképzelés egyszerű: telepítsünk olyan helyekre napenergia, illetve szélenergia alapú energiatermelést, ahol a meteorológiai és területi előnyöket maximálisan ki tudjuk használni és innen kapcsoljuk be a helyi, illetve az európai villamosenergia-rendszerbe a kapacitásokat. Ez az elképzelés megfelelő műszaki fejlettség mellett gazdaságilag is versenyképes lehet, illetve a megcélzott észak-afrikai és közel-keleti területek saját fejlődésük miatt is igénylik az energetikai infrastruktúra kiépítését, fejlesztését.

1.2. Áttekintés

Dolgozomban a hangsúlyt a villamosenergia-termelésre alkalmas napenergia hasznosítás típusainak bemutatására és műszaki-gazdasági összehasonlítására fektetem. Számításaimat európai viszonyokra végzem, vizsgálva, hogy itt milyen lehetőségek adóttak a fotovillamos és a termikus naphőerőművek számára. Ezen kívül a naphőerőművek realitását vizsgálva részletesen bemutatom a DESERTEC koncepciót is.

2. A NAPENERGIA-HASZNOSÍTÁS JELENLEGI HELYZETE

A napenergia, mint megújuló energiaforrás villamos energia és hőenergia termelésre is alkalmas, ennek ellenére jelenleg a részesedése a világ energiatermelésében rendkívül alacsony. Ezt szemlélteti a 1971-2009 közötti energiatermelés forráseloszlását bemutató 2.1. ábra.



2.1. ábra. A világ energiatermelésének forráseloszlása, 1971-2009 [1]

A napenergia-hasznosítás egyik módja a hőenergia-termelés napkollektorokkal. 2009-ben a világon beépített napkollektor teljesítmény 172,4 GW_{th} volt, ez a 2004-es teljesítmény közel háromszorosa. Ezen a téren Kína vezet, beépített kapacitása 101,5 GW_{th}. Jelenleg elsősorban az épületek hőigényének kielégítése terén terjedt el a kollektorok alkalmazása, de várhatóan a hűtési és az ipari folyamatok tekintetében is teret nyer.

A napenergia-hasznosítás másik módja a villamosenergia-termelés, fotovillamos rendszerekkel vagy termikus naphőerőművekkel. A 2010-11-es években a fotovillamos (PV – Photovoltaic) alapon működő villamos energiatermelés részaránya rohamos növekedésnek indult, 2011 végére a beépített kapacitás nagyjából 65 GW_e-ra nőtt. 2000-ben ez a beépített teljesítmény még csak 1,5 GW_e volt. A beépített kapacitás több mint fele Németországban és Olaszországban található, őket követi Japán, Spanyolország, az Amerikai Egyesült Államok és Kína.

A napsugárzás koncentrálásán alapuló naphőerőművek (CSP – Concentrating Solar Power) jelenleg felemelkedő ágát jelentik a napenergia-hasznosítás területének. Az 1980-ban nagyjából 350 MW_e beépített teljesítmény Kaliforniában koncentrálódott, majd 2006-ban Spanyolországban és az Amerikai Egyesült Államokban indultak fejlesztések. Ma ebben a két országban található a beépített teljesítmény döntő hányada, és a jelenleg építés alatt álló erőművek egy része. [1]

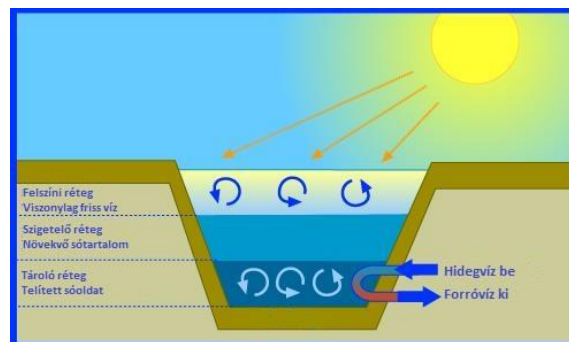
3. VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS NAPENERGIÁBÓL

A napenergia hasznosítása villamosenergia-termelésre többféle módon történhet, ezeket foglalják össze a következő alpontok.

3.1. Naptó

A naptóban (solar pond) a felmelegedő víz felszínre áramlását és hőátadását a környezetnek megakadályozzák az alsó rétegben oldott só segítségével. A naptóban három vízréteg található, a rétegezést a 3.1. ábra mutatja:

- UPZ (Upper Convective Zone): a felső réteg érintkezik a környezettel, hőmérséklete megegyezik a levegő hőmérsékletével,
- NCZ (Non-Convective Zone): az elválasztó zóna, ebben a zónában a só koncentrációja a mélység arányában csökken, a réteg világos,
- LCZ (Lower Convective Zone): az alsó réteg, só koncentrációja magas és a középső réteg által áteresztett fényt elnyeli, hővé alakítja és eltárolja.



3.1. ábra. A naptó egyszerűsített vázlata

A napsugarak tehát áthatolnak a sekély felső vízrétegen és a tó fenekét melegítik, ahol az alsó vízréteg akár 90°C hőmérsékletűre is felmelegedhet. A melegvíz nem emelkedik a felszínre a só koncentrációból adódó fajsúlynövekedés miatt. A sós melegvíz és hidegvíz szerves közegű (ORC – Organic Rankine Cycle, Kalina) körfolyamatot működtet.

A konvektív naptavaknak két típusát különböztetjük meg. Az egyik típusnál a tó alja egy sötét réteggel (például polimer) van borítva, mely elnyeli a hőt és egyben megvédi a környezetet, közeli vízkészletet a magas só koncentrációtól. A másik típus esetében a három fő réteg vékony és átlátszó membránokkal van elszeparálva, fizikailag is elválasztva az áramlásokat, keveredéseket.

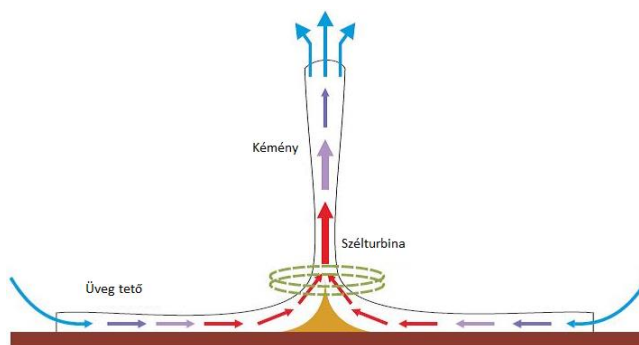
A legnagyobb működő naptó Izraelben épült (Beit HaArava) az 1970-es években és 1988-ig üzemelt, területe 210 000 m², teljesítménye 5 MWe volt, gazdaságossági okokból került bezárássra. A Bhuj naptó demonstrációs projekt keretében épült Indiában 1987-ben, területe

6 000 m². A vízben 4 000 tonna só oldott fel, átlagos hőfoka egész évben 75° C, jelenleg ez a legnagyobb működő naptó. A texasi El-Paso tó felülete fele a Bhuj tóénak, csúcsteljesítménye körülbelül 70 kW. A Bruce Foods Corporation üremeiben hasznosítják az előállított elektromos és fűtési energiát, ezzel demonstrálva a naptavak rendszerbe illeszthetőségét.

A naptavak előnye tárolási képességük, mellyel éjszakai termelésre is alkalmassá válnak. Emellett a direkt és szórt napsugárzás energiája is hasznosítható velük, valamint területileg sincsenek a nagyon magas napsütéses óraszámhoz kötve, nem igényelnek üveg- és tükörfelületeket. Hátrány a hatásfok, például az izraeli minta projekt összhatósfoka mindössze 0,9% volt. [2,3]

3.2. Napkémény

A napkémény, másnéven szolár kémény (solar chimney) működési elve, hogy egy hatalmas üvegházban felmelegszik a levegő a napsugárzás hatására és ezt egy kéményen keresztül vezetik ki. A kürtőhatásból adódó nyomáskülönbséget szélturbinával hasznosítják, kisebb méreteknél egy függőleges tengelyű szélkereket helyeznek el a kémény aljában, nagyobb méreteknél a kémény lábánál körben építik fel a közel vízszintes vagy vízszintes tengelyű szélkerekek rendszerét. Felépítését a 3.2. ábra mutatja.



3.2. ábra. A napkémény elvi felépítése

A napkémény üvegházában elhelyezhetők vízzel töltött csőrendszerek illetve tartályok, melyek nappal a töltés alatt eltárolják a hő egy részét, éjszaka pedig biztosítják a levegő felmelegítését és így a termelést. Hő tárolóként funkcionál maga a levegő is, így az üvegház sugarának növelésével jelentősen növelhető a kiadott villamos teljesítmény.

A napkémény nagy hátránya az alacsony hatásfokból adódó óriási területigény, előnye az egyszerű szerkezet és az ebből fakadó alacsonyabb beruházási költség. Az első napkéményt Spanyolországban (Manzaresben) építették 1982-ben, ennek legfontosabb paramétereit a 3.1. táblázat foglalja össze. Számítások szerint 1-5% összhatósfokot 1 000-1 500 m magas

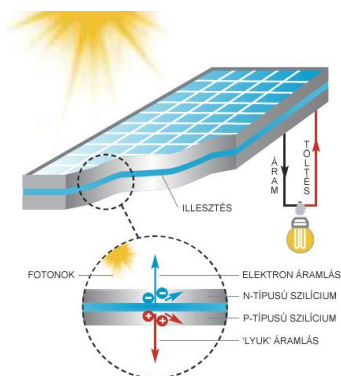
kéményekkel, 100 - 200 m sugarú üvegházzal lehet elérni, melyhez nagyjából 200 MW_e teljesítmény tartozik. Az eddig megvalósult legnagyobb projekt Kínában épült meg, ennek teljesítménye 200 kW_e, éves villamosenergia-termelése 400 000 kWh. [3]

3.1. táblázat. A Manzanares napkémény paramétereit

Beruházó	SBP Schlaich, Bergemann und Partner, Stuttgart, Németország
Elhelyezkedés	Manzanares, Spanyolország
Működési idő	1986 – 1989
Tervezési teljesítmény	50 kW
Kémény méretek	magasság: 194,6 m, sugár: 5,08 m
Üvegház átmérő	122 m
Üvegház magasság	1,85 m
Előállított hőmérsékletkülönbség	20 °C
Szélkerék paraméterek	4 lapát, 5 m hosszúságú
Éves összhatásfok	0,53%

3.3. Napelemek

A fotovillamos cella egy félvezető dióda, amely n-típusú és p-típusú félvezető rétegek összeépítésével készül. Felül található a vezetőérintkezők hálózata, alul pedig egy vezető réteg. A felső érintkező egy áramkörön keresztül kapcsolódik az alsó fémvezetőhöz. Ezt mutatja a 3.3. ábra.



3.3. ábra. Fotovillamos cella felépítése [4]

A napsugárzás hatására becsapódó foton egy elektron-lyuk párt hoz létre, az elektronok az n-típusú, a lyukak pedig a p-típusú tartomány felé mozognak és az elektronok a külső áramkörön keresztül jutnak vissza a p tartományba, az alsó fémérintkezőn keresztül.

3.3.1. FOTOVILLAMOS RENDSZEREK TÍPUSAI

Fotovillamos rendszerek esetén két fő csoportot különböztetünk meg: a hálózaton kívüli és a hálózatra kapcsolt rendszereket.

A hálózaton kívüli rendszerekbe sorolhatók a fogyasztói alkalmazások, mint például a számológépek, órák, kültéri lámpák, melyek napelemekkel (is) üzemelnek. Hálózaton kívüli rendszerek közé sorolhatók azok a napelemes rendszerek is, ahol például a rossz infrastruktúra vagy az elzártság miatt létesítenek mikrohálózatokat, ezek az úgynevezett szigetüzemű rendszerek.

Hálózatra kapcsolt rendszerek esetén a napelemek által megtermelt energiát egy inverteren keresztül közvetlenül visszatápláljuk a hálózatba. A megtermelt egyenáram átalakítását váltakozó árammá végző inverterek hatásfoka 95-97% körüli. A kisméretű háztartási panelektől a nagyméretű MW-os naperőművek (például a németországi Templin Solar Park körülbelül 130 MW_e beépített teljesítménnyel) is a hálózatra termelnek. A hálózatra kapcsolt rendszerek nagy előnye, hogy nincs szükség akkumulátor beépítésére. A rendszerek teljesítménye függ:

- az alkalmazott napelem típusától, vagyis hatásfokától és a modulok felületétől,
- a modulok telepítésétől (a dőlésszögtől, a tájolástól, az árnyékolástól),
- a napsugárzás intenzitásától,
- a napsütéses órák számától,
- a szabályozó- és irányítástechnikai berendezések hatásfokától.

3.3.2. NAPELEM CELLA TÍPUSOK

A napelemek hatásfoka jelentősen függ az alkotó anyagtól, annak ún. abszorpciós spektrumától. A napelemek nagy előnye, hogy a szórt illetve a direkt napsugárzást is hasznosítják. A napelemek két fő csoportját különböztetjük meg: a kristályos (mono-, illetve polikristályos) és a vékonyrétegű napelemeket (3.4. ábra).



3.4. ábra. Napelem cella típusok (mono-, polikristályos és vékonyfilm napelem) [4]

A kristályos napelemeket 1954 óta gyártják, alapanyaguk szilícium, melyet egy fedő üveglap és egy műanyag hátlap közé laminálnak. A monokristályos és polikristályos napelemek a szilícium tömbök gyártásában térnek el. Monokristályos esetben a szilíciumot elektromos térben húzzák henger alakúra és egy tömbben dermed meg, ebből vágják a cellákat általában nyolcszög alakúra. Polikristályos esetben a cellákat öntik négyzet alapú tömbökbe, a szilícium több kristályban dermed meg. A monokristályos napelemek hatásfoka 14-17%, az olcsóbb gyártású polikristályos napelemeké 13-15% közötti.

A vékonyrétegű napelemek esetén nem cellákat vágnak tömbökből, hanem kémiai vagy fizikai eljárással a félvezető réteget a fedő üveglapra vagy hordozó felületre csapatják le. Jelenleg a következő vékonyfilm napelemek terjedtek el, melyek hatásfoka 5-7%, gyártásuk viszonylag olcsó:

- Si- μ Si (amorf szilícium (aSi) és mikromorf (μ Si) szilícium),
- CdTe (kadmium-tellurid),
- CIGS, CIS (réz-indium-gallium-diszelenid és réz-indium-diszelenid).

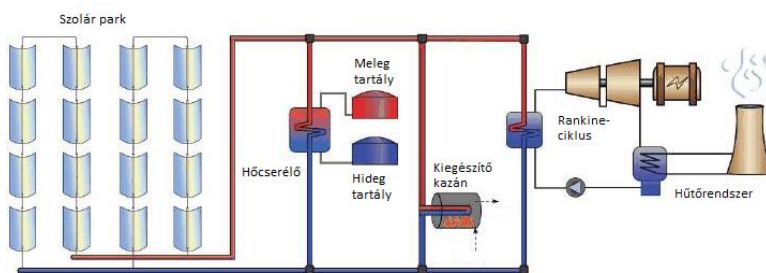
Egy új fejlődő terület az organikus vagy szerves alapanyagú napelemek gyártása, ahol a félvezetőkhöz hasonló tulajdonságú mesterséges organikus polimerekből vékonyfilm technológiához hasonlóan gyártanak napelemeket. [5]

3.4. A napsugárzás koncentrálásán alapuló hasznosítás

A napenergia alapú villamosenergia-termelésének egyik módja a termikus naphőerőművek alkalmazása. Naphőerőművek több típusa ismert, a napsugárzás mértékétől, tartamától és a teljesítményigénytől függően más-más típus alkalmas a napsugárzás hasznosítására.

A napsugárzást koncentráló naphőerőművek, másnéven CSP (Concentrated Solar Power) erőművek három technológiai alrendszerre oszthatók (3.5. ábra):

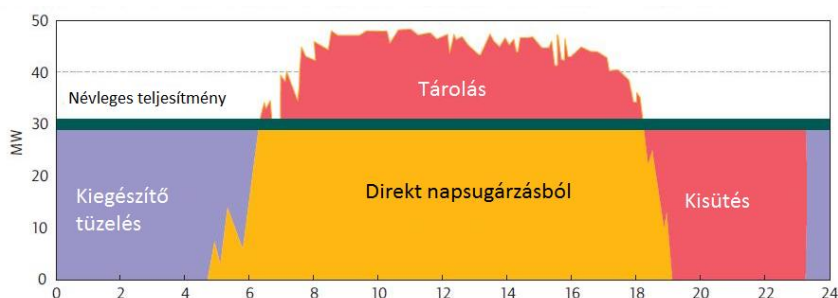
- a hőtermelő, vagyis a napenergia koncentráló rendszerre,
- a hőtároló rendszerre és
- a hőhasznosító körfolyamatra.



3.5. ábra. CSP erőművek alrendszerei [6]

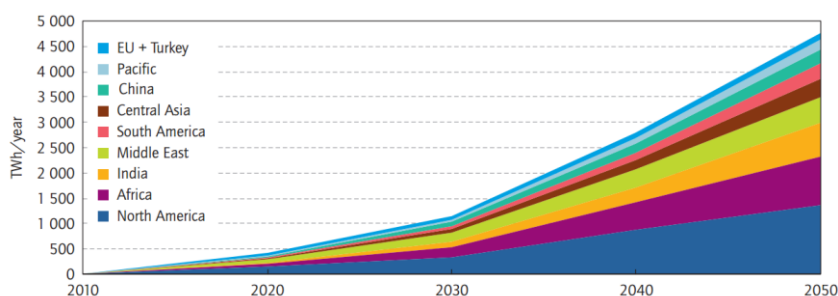
3.4.1. MEGVALÓSULT, ÉPÜLŐ ÉS TERVEZETT NAPHŐERŐMŰVEK

A koncentráción alapuló naphőerőmű más napenergia alapú villamosenergia-termelő módszerekhez képest (például a fotovillamos elemek) alkalmas a nappal begyűjtött energia tárolására és napsütéses óráktól független kisütésére. Így egy periódusra vetítve kiegyenlítetté teszi a villamosenergia-termelést, továbbá a rendszer kiegészíthető más hőforrásokkal (például biomassza póttüzelés), mellyel egyenletes hálózatra táplálás érhető el éjjel-nappal. Ezt szemlélteti a 3.6. ábra.



3.6. ábra. Kiegyenlített termelés napsugárzás koncentráló erőművekkel [1]

A International Energy Agency tanulmánya [1] összefoglal több scenáriót, melyek a CSP erőművek nagymértékű elterjedésével számolnak. A technológia számára kedvező napsugárzási viszonyok a következő területeken jellemzők: Észak-Afrika, Dél-Afrika, Közel-Kelet, India, Mexico, Chile, Peru, az USA dél-nyugati területei, illetve Kína és Ausztrália nyugati vidékei. Hasonlóképp alkalmas, de kevésbé kedvező területek találhatók Spanyolországban, Törökországban, Argentínában, Brazíliában. A napsugárzás koncentrálásán alapuló erőművek elterjedésének előrejelzéseiben 2030-ra 1 000 - 1 500 TWh/év termeléssel, majd ezután is meredek növekedéssel számolnak. Régiókra lebontva a 3.7. ábra mutat egy lehetséges termelési növekedést. Ezek a scenáriók erőteljes fejlődést és elterjedést mutatnak, jelezvén azt, hogy azokon a területeken, ahol a napsugárzás lehetővé teszi a gazdaságos megvalósítást egyértelműen érdemes létesíteni ilyen energiatermelő blokkokat.



3.7. ábra. A CSP erőművek elterjedése [1]

Jelenleg a naphőerőművek beépített kapacitása 2 100 MW felett van, a 2013 elején üzemben lévő 5 legnagyobb naphőerőművet a 3.2. táblázat foglalja össze.

3.2. táblázat. Az 5 legnagyobb üzemelő naphőerőmű [7]

Erőmű	Teljesítmény	Hely	Típus
Solar Energy Generating Systems	354 MW	USA	parabolavályú
Solnova Solar Power Station	150 MW	Spanyolország	parabolavályú
Andasol Solar Power Station	150 MW	Spanyolország	parabolavályú
Extresol Solar Power Station	150 MW	Spanyolország	parabolavályú
Palma del Rio Solar Power Station	100 MW	Spanyolország	parabolavályú

A 3.2. táblázatból látszik, hogy az eddig üzemben lévő típusok legnagyobbjai mind parabolavályús rendszerek. Ezen kívül még három típus ismert, ezek legnagyobbjait a 3.3. táblázat foglalja össze, beépített teljesítményük azonban jóval a parabolavályús rendszerek teljesítménye alatt marad.

3.3. táblázat. Egyéb meglévő naphőerőművek [7]

Erőmű	Teljesítmény	Hely	Típus
Puerto Errado	31,4 MW	Spanyolország	Fresnel kollektor
PS20 solar power tower	20 MW	Spanyolország	naptorony
Gemasolar	19,9 MW	Spanyolország	naptorony
PS10 solar power tower	11 MW	Spanyolország	naptorony
Liddell Power Station Solar Steam Generator	9 MW	Ausztrália	Fresnel kollektor
Kimberlina Solar Thermal Energy Plant	5 MW	USA	Fresnel kollektor
Sierra SunTower	5 MW	USA	naptorony

Az optimista előrejelzéseket alátámasztja az építés alatt álló és tervezett naphőerőművek listája, melynek legnagyobbjait és összegzett eredményét a 3.4. táblázat mutatja be.

3.4. táblázat. Építés alatt álló és tervezett naphőerőművek [7]

Építés alatt álló erőművek		2527 MW	
Tervezett erőművek	USA	4508 MW	
	Spanyolország	1080 MW	
	Egyéb országok	4546 MW	
Erőmű	Teljesítmény	Hely	Típus
Ivanpah Solar Power Facility	370 MW	USA	naptorony
Solana Generating Station	280 MW	USA	parabolavályú
Mojave Solar Project	280 MW	USA	parabolavályú
Fort Irwin Solar Project	500 MW	USA	-
Palen Solar Power Project	500 MW	USA	parabolavályú
Hualapai Valley Solar Project	340 MW	USA	parabolavályú
Andasol 4–7	200 MW	Spanyolország	parabolavályú
Névtelen	2 000 MW	Kína	naptorony
Solar Energy Project	2 000 MW	Marokkó	-

Az építés alatt álló erőművek egy része 2013 őszén üzemelő kategóriába lépett át. Az Ivanpah naphőerőmű szeptemberben kezdte meg működését a Mojave sivatagban. A naptornyos rendszer három egységből áll, mindegyikhez egy 140 méter magas torony tartozik. A tervezett teljes beruházási költség 2,18 milliárd USD (5560 USD/kW), tervezett évi villamosenergia-termelése 1080 GWh, ami nagyjából 2700 h/év kihasználást jelent. A Solana naphőerőmű októberben kezdte meg működését. A parabolavályús erőmű két egységből áll, a szolárpark a termoolajat 380 °C-ra fűti fel, a 140 MW-os gőzturbinák 100 bar nyomású frissgőzzel üzemelnek. Az erőmű 6 órás sóolvadékos hőtárolóval rendelkezik. Az erőmű beruházási költsége nagyjából 2 milliárd USD (7150 USD/kW), tervezett évi villamosenergia-termelése 944 GWh, ami közel 3800 h/év kihasználási óraszámra felel meg. [13]

3.4.2. NAPSUGÁRZÁS KONCENTRÁLÓ ALRENDSZER [8,9]

A napsugárzás koncentrálásával nagy egységnyi területre eső energiasűrűség érhető el, ezzel a munkaközegek magasabb hőmérsékletre melegíthetők és így erőművi körfolyamatok működtetésére is alkalmassá válnak.

A koncentrációt tükrök alkalmazásával valósítják meg, melyekkel a sugarakat egy pontba fókuszálják. A napsugárzás direkt (párhuzamos irányú) és szórt sugárzásból (eltérő irányú) sugárzásból tevődik össze, a fókuszáló rendszerek csak a direkt sugarakat képesek begyűjteni, mivel a tükröfelületet csak a direkt sugárzás éri párhuzamosan.

Egydimenziós koncentrációt valósít meg a parabola keresztmetszetű vályús koncentrátor és a Fresnel tükrös kollektor. Ezek a lineáris rendszerek a hosszuk mentén állandó keresztmetszetűek, a koncentrációs hatásfokát alapjában véve ennek a keresztmetszetnek az optikai tulajdonságai határozzák meg. Kétdimenziós koncentrációt valósít meg a parabolatányéros koncentrátor és a naptorony.

A koncentráción alapuló rendszerek hatásfokát a geometriai, optikai és termikus viszonyok befolyásolják alapvetően. A koncentráló rendszerek a globális sugárzásnak csak egy részét, az úgynevezett direkt sugárzást hasznosítják. A teljes koncentráló tükröfelületre érkező sugárzás az úgynevezett apertúra felületen, másnéven fénybeesési felületen hasznosul. Az apertúra felület és a felfogó egység (receiver) felületének hányadosa a geometriai koncentrációs fok (geometrical Concentration Ratio – CR_g):

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.1)$$

Ahol:

A_a az apertúra felület, m^2

A_r a felfogó egység (receiver) felület, m^2

A hőhordozó közeg szállítja a hasznos energiát, melyet a tükrök által koncentrált és a felfogó egységnek (receiver) átadott sugárzási energia fedez, a fellépő veszteségek által csökkentve az alábbi összefüggés szerint:

$$\dot{Q}_{hasznos} = \dot{Q}_{szol} - \dot{Q}_{veszt} \quad (3.2)$$

Ahol:

$\dot{Q}_{hasznos}$ a hasznos hőteljesítmény, W

$\dot{Q}_{szol}$ a koncentrált és felfogott sugárzási energia, W

$\dot{Q}_{veszt}$ a hőveszteségek, W

A hasznos energiát az alábbi összefüggés szerint számíthatjuk:

$$\dot{Q}_{hasznos} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ki} - T_{be}) \quad (3.3)$$

Ahol:

$\dot{m}$ a hőközvetítő közeg tömegárama, kg/s

c_p a hőközvetítő közeg fajhője , J/kgK

T_{ki} a hőközvetítő közeg kilépő hőmérséklete, K

T_{be} a hőközvetítő közeg belépő hőmérséklete, K

A koncentrált és felfogott sugárzási energiát az optikai hatások, vagyis a tükörfelületek elnyelése, áteresztése és visszaverése határozza meg, az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\dot{Q}_{szol} = \eta_r \cdot CR_g \cdot A_r \cdot I_a = \Gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot I_a \cdot A_a \quad (3.4)$$

Ahol:

η_r a felfogó egység hatásfoka, -

I_a az apertúrára beérkező direkt sugárzás, W/m²

Γ a felfogási fok (capture fraction), -

ρ a tükrök reflektivitási tényezője, -

τ a védőfelületek transzmissziós tényezője, -

α a felfogó felület abszorpciósi tényezője, -

Az összefüggésben szereplő felfogási fok (capture fraction) megmutatja, hogy a reflektált sugárzás mekkora hányada éri el a kívánt begyűjtő felületet. A felfogási fokot alapvetően a konsrukció határozza meg, a tükrök alakja és a sugárzást felfogó egység mérete befolyásolja. Egy nem megfelelően kialakított koncentráló tükör rendszer vagy egy túl kicsi felfogó egység esetén a felfogási fok értéke kisebb, mint 1.

A visszaverődés értékét a tükrök anyaga befolyásolja. A legjobb tükörfelületek 95% vagy efeletti, az üveg tükrök 94% és az új alumínium tükrök pedig 86% körüli reflexiós tényezőkkel rendelkeznek. A tükrök hőterhelését a nem visszaverődő, vagyis elnyelt sugárzás befolyásolja, amely a megmunkálás minőségével és a folyamatos tisztíthatóság biztosításával csökkenthető. A transzmissziós tényező az átlátszó védőfelületek (üveg vagy műanyag) segítségével elérhető konvektív hőveszteség csökkentés mértékét befolyásolja. A parabolavályús rendszerek esetén ez a gyűjtőcső borításánál fontos, a többi rendszernél a különböző felfogó egységek védőfelületeit befolyásolja. Az abszorpciósi tényező szintén a felfogó egységnél fontos, egy jól kialakított fekete felület elnyelő képessége akár 98% feletti is lehet.

A hasznosítható sugárzást csökkentik a különböző hőveszteségek, ezt az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg, melyek közül a konduktív veszteségek koncentráló rendszereknél a többi veszteséghez képest elhanyagolhatók:

$$\dot{Q}_{veszt} = \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{sug} + \dot{Q}_{kond} \quad (3.5)$$

Ahol:

$\dot{Q}_{konv}$ a konvektív hőveszteség, W

$\dot{Q}_{sug}$ a sugárzási hőveszteség, W

$\dot{Q}_{kond}$ a konduktív hőveszteség, W

A konvektív hőveszteség a magas hőmérsékletű felfogó egység és a környezet között jelentkezik, a következő összefüggéssel írható le:

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha_{konv} \cdot A_r \cdot (T_r - T_k) \quad (3.6)$$

Ahol:

α_{konv} a környezet és a felfogó egység közti hőátadási tényező, W/m²K

T_r a felfogó egység átlagos hőmérséklete, K

T_k a környezeti levegő hőmérséklete, K

A sugárzási hőveszteség, mely magas hőmérsékletek esetén jelentős az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\dot{Q}_{sug} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_r \cdot (T_r^4 - T_{ég}^4) \quad (3.7)$$

Ahol:

ε a felfogó egység emissziós tényezője, -

σ a Stefan-Boltzmann állandó, $5,67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴

$T_{ég}$ az ég ekvivalens fekete test hőmérséklete, K

A fenti összefüggések segítségével a begyűjtés hatásfoka a következőképp számítható:

$$\eta_{konc} = \frac{\dot{Q}_{hasznos}}{I_a \cdot A_a} = \frac{\dot{Q}_{hasznos}}{I_a \cdot C \cdot A_r} \quad (3.8)$$

A koncentráló rendszerekhez illesztett Carnot-körfolyamattal határozható meg az elméleti maximális hatásfok naphőeőművek esetén. A Carnot-körfolyamat hatásfoka a hőmérsékletek függvényében az alábbi módon fejezhető ki:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_0}{T_1} \quad (3.9)$$

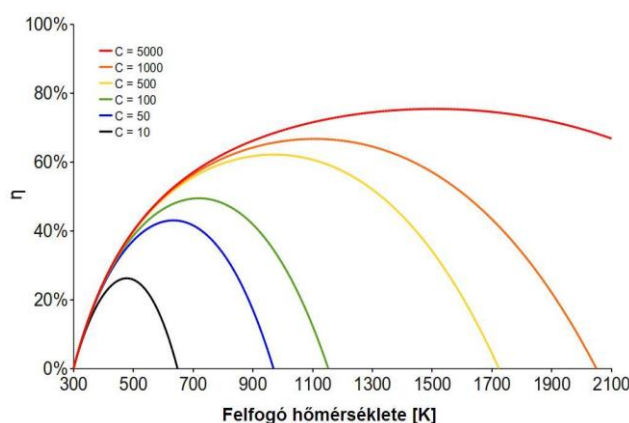
Ahol:

T_0 a körfolyamat hőelvonási hőmérséklete, K

T_1 a körfolyamat hőbevezetési hőmérséklete, K

A Carnot-hatásfok számításához a következő egyszerűsítő feltételeket tesszük, az eredményeket a 3.8. ábra szemlélteti:

- az apertúrára beeső sugárzás intenzitása 1000 W/m^2 ,
- a hőleadási hőmérséklet 300 K ,
- a felfogó egység és az apertúra felület aránya a geometriai koncentrálási fok (CR_g vagy C),
- a tükörrendszer veszteségmentes,
- a felfogó egység feketeségi foka 1,
- a felfogó egység hővesztesége csak a sugárzási veszteségből adódik, a konvektív és konduktív hőveszteségeket elhanyagoljuk,
- a Carnot-körfolyamat hőbevezetési hőmérséklete megegyezik a felfogó egység hőmérsékletével.



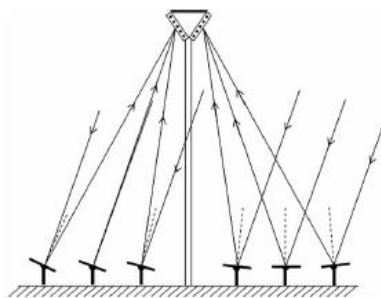
3.8. ábra. Az elméleti maximális hatásfok koncentrátoros rendszerknél

Az egyszerűsítő feltételezések mellett a maximálisan elérhető hőbevezetési hőmérséklet a következő összefüggéssel számítható:

$$T_{1,\max} = \left(\frac{CR_g \cdot I_a}{\sigma} \right)^{0,25} \quad (3.10)$$

3.4.3. PARABOLAVÁLYÚS KONCENTRÁLÁS

A parabolavályús rendszer geometriáját a 3.9. ábra mutatja. A működési elv egyszerű, a beérkező párhuzamos napsugarakat a parabola keresztmetszetű tükrök egy fókuszvonalra koncentrálnak. Ebben a fókuszvonalban helyezkedik el egy cső a felfűtendő hőhordozó közeggel. A parabolateknőt észak-dél irányú tengelye mentén motorok segítségével keletről nyugat felé fokozatosan fordítják el követve a Nap mozgását, úgy hogy napsugarak beesési szöge mindig optimális legyen.



3.10. ábra. Fresnel tükrös koncentráció [11]

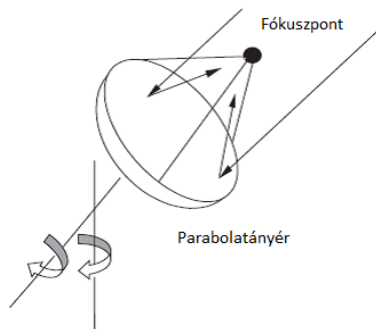
A legnagyobb Fresnel tükrös koncentrációt alkalmazó naphőerőmű a spanyolországi Puerto Errado 31,4 MW-os erőmű. Két lépésben épült meg az erőmű, 2009-ben az első 1,4 MWe teljesítményű demonstrációs rész (PE1), majd 2012-ben lépett működésbe a 30 MWe teljesítményű park (PE2). Az erőmű legfontosabb adatait a 3.5. táblázat foglalja össze.

3.5. táblázat. Puerto Errado naphőerőmű legfontosabb paraméterei [12]

	Puerto Errado 1	Puerto Errado 2
Hőteljesítmény, MW_{th}	11,5	150
Beépített teljesítmény, MW_e	1,4	30
Termelés, MWh/év	2 000	49 000
Szolár park hossza, m	806	940
Szolár park területe, m^2	21 568	302 000
Kollektor sorok, db	2	28
Szolár park belépő hőmérséklet, $^{\circ}C$	140	140
Szolár park kilépő hőmérséklet, $^{\circ}C$	270	270
Illesztett hőkörfolyamat	Rankine-ciklus	Rankine-ciklus
Illesztett hőkörfolyamat kezdő nyomása, bar	55	55
Illesztett hőkörfolyamat kezdő hőmérséklete, $^{\circ}C$	270	270

3.4.5. NAPTÁNYÉROS KONCENTRÁLÁS

A naptányér esetében a tükröket egy parabolakonzolon helyezik el (műholdvevőre hasonlító konstrukció), melynek fókuszpontjában van a hőgyűjtő a hőhordozó közeggel (3.11. ábra). A parabolatükör és a tartó-mozgató szerkezet összeépítése miatt az ilyen rendszerek mérete korlátozott.



3.11. ábra. Naptányéros koncentráció [3]

Jellemzően az energiahasznosítást a parabolatányérral egy rendszerbe épített Stirling-motorral oldják meg, így minden tányér önálló energiatermelő egységet alkot. A naptányéros koncentráció esetén kéttengelyes napkövetés valósítható meg az optimális fókuszálás érdekében. További előny a Stirling-motor magas hatásfokú energiaátalakítása, hátrány a motor magas költsége a nagy hőcserélő felületek miatt.

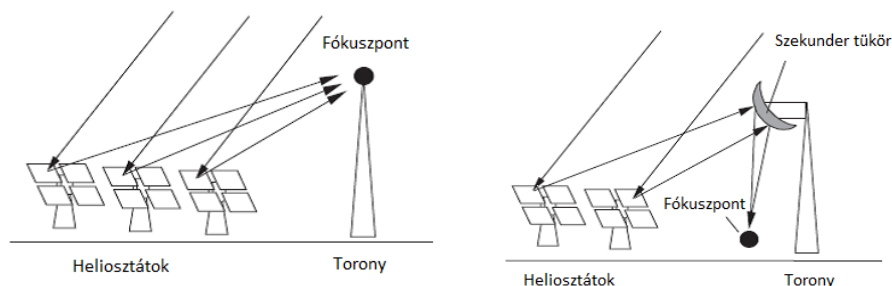
Ez a rendszer energiátárolás szempontjából eltér a többitől, mivel itt a közeg azonnal felhasználásra kerül. Fejlesztési koncepció a Stirling-motor alkalmazása helyett a fókuszpontban történő gőzfejlesztés és az összegyűjtött gőz Rankine-körfolyamatban történő hasznosítása, illetve a mikro-gázturbinák alkalmazása Stirling-motorok helyett.

A legnagyobb beépített teljesítményű (1,5 MW_e) naptányér mező az amerikai Maricopa Solar volt, mely működését 2010 januárjában kezdte meg és 2011 szeptemberében az üzemeltető cég csődje miatt termelése meg is szűnt. 60 darab naptányér üzemelt a területen, egyenként 25 kW_e teljesítménnyel. [13]

3.4.6. NAPTORONY

A naptorony szintén kétdimenziós koncentrációt valósít meg, síktükröket (heliosztát) helyeznek el egy hőgyűjtő torony körül. A heliosztát önálló mozgató mechanizmussal felszerelt síktükör, mely a nap mozgását úgy követi, hogy a sugárzást a torony hőgyűjtő felületére irányítja. A nagy napmezők segítségével a hőhordozó közeg (gyakran sóoldék) 550 – 1500 °C hőmérsékletre melegszik fel, mellyel már jó hatásfokú körfolyamatok is megvalósíthatók. Ennek a rendszernek a legkérdésesebb pontja a torony magassága, melynek arányosnak kell lennie a napmező méretével, különben a tükrök rálátási szöge nem lesz megfelelő. Mivel a tornyokban nem lehet tárolni és felhasználni az előállított hőt, ezért a magas tornyokkal nagy szállítási hőveszteségek járnak, csökkentve a hatásfokot. Ennek kiküszöbölésére találták ki az új koncepciót, mely két tükrörendszert alkalmaz és a magasabban fekvő tükör a heliosztátok által fókuszált napsugarakat egy alacsonyabban fekvő

gyűjtőpontra koncentrálja. Az eredeti és az új koncepciót a 3.12. ábra szemlélteti. [3]



3.12. ábra. Naptornyos koncentráció

2013 őszéig a legnagyobb üzemelő naptorony a spanyolországi Planta Solar 20 (PS20). A naphőerőmű 150 000 m² területen fekszik, amelyen 1 255 darab heliosztát és egy 165 m magas torony helyezkedik el. A toronyban található a felfogó ernyő és a turbógenerátor, a hőgyűjtő közeg víz, melynek hőmérséklete 250-300 °C közötti. A beépített Ruth-tárolóval körülbelül egy órás tárolást tudnak megvalósítani. Az erőmű villamos teljesítménye 20 MWe. A PS20 erőművet és a mellette épült, régebbi 10 MWe teljesítményű PS10-es erőművet a 3.13. ábra mutatja. [13]



3.13. ábra. A PS20 és PS10 naptorony [9]

3.4.7. HŐTÁROLÓ ALRENDSZER [8, 14]

A napenergia-hasznosító rendszerekben a hőtárolás az időjárásfüggő és napszakfüggő sugárzás miatt szükséges, naphőerőművek esetén az egyenletes termelést és a magasabb kihasználhatóságot biztosítják a tárolók. A hőtároló alrendszer másik feladata a hő továbbítása a technológiai körfolyamat felé, abban az esetben, ha nem azonnali a felhasználás (például Stirling-motoros naptányér).

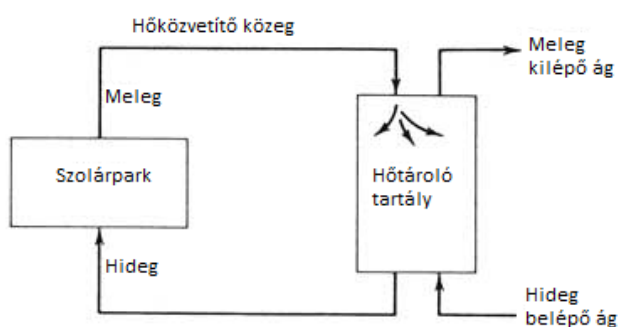
A hőtároló alrendszerrel kapcsolatban több követelmény is megfogalmazható, annak érdekében, hogy a tárolás során minimálisak legyenek a veszteségek és maximális legyen a gazdaságosság, ezek a következők:

- magas energiasűrűség,
- jó hőátadás a hőközvetítő és a hőtároló közeg között,
- a hőtároló közeg mechanikai, kémiai stabilitása,
- a két közeg biztonságos kompatibilitása,
- hosszú élettartam,
- kis hőveszteség,
- könnyű kezelhetőség.

A hő tárolása három fizikai alapelv szerint történhet:

- Az érzékelhető hő kerül eltárolásra, mely során a hőtároló közeg hőmérsékletváltozása hordozza a tárolandó hőt.
- A látens (rejtett) hő kerül eltárolásra, mely a hőtároló közeg halmazállapot változása révén hordozza a tárolandó hőt.
- A tárolást kémiai reakciók révén valósítják meg, ahol fontos, hogy a reakciók közel reverzibilisek legyenek.

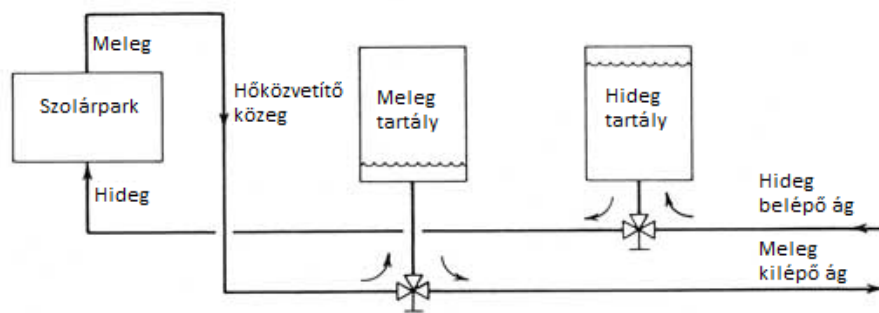
Az érzékelhető hő tárolása a legegyszerűbb módszer a három közül. Az egytárolós kapcsolást a 3.14. ábra mutatja be, ennek elve megfelel a háztartási méretű napkollektoros hőtárolásnak, a hőközvetítő közeg leadja hőjét egy hőcserélőben, a munkaközeg pedig felveszi azt.



3.14. ábra. Egytárolós rendszer

Az egytárolós rendszernél jobb hatásfokú hőtárolás valósítható meg két külön tartályos rendszerrel (3.15. ábra). Ebben az esetben a meleg tartályt sorosan kötik a hőgyűjtő mező kimenő ágára, a hideg tartályt pedig a mező bemenő ágára kötik, a szoláris sugárzás által közvetlenül melegített primer kör közeg így egyben a hőtároló közeg. A tömegáramok változtatásával megoldható a kiegyenlített energiatermelés, a tárolókapacitást a tartályok

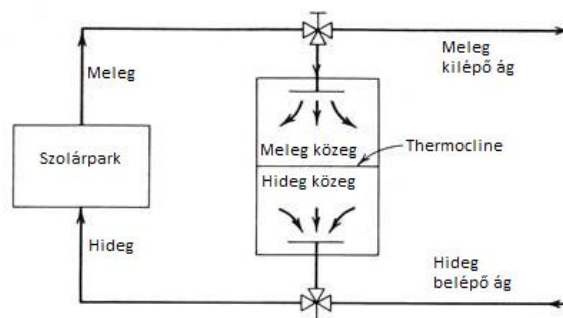
mérete korlátozza. A kéttárolós rendszerekben általában valamilyen sóolvadékot alkalmaznak közvetítő közegként, mellyel 450 – 500 °C-os kilépő hőmérséklet is elérhető. A rendszer előnye, hogy a hőkövetítő és hőtároló közeg között nincs szükség drága hőcserélő felületek beépítésére, illetve, hogy a magas hőmérsékletek miatt jó hatásfokú energiaátalakítás valósítható meg. Hátrány azonban, hogy maga a sóolvadékos közeg drága, a tartályok anyaga és a szerkezeti anyagok is a magas hőmérsékletek miatt drágábbak, illetve a rendszer folyamatos fűtést igényel, mivel a közvetítő közeg megszilárdulhat (ezeknek az anyagoknak az olvadáspontja 150 – 280 °C közötti). A tárolórendszerek építésének kezdetén még csak pár órás kiegyenlítést valósítottak meg ezekkel a rendszerekkel, ma már a sóolvadékos tartályokkal akár 15 órányi névleges üzemállapotnak megfelelő villamosenergia-termelés is biztosítható (Solar Tres naptorony, Spanyolország).



3.15. ábra. Kéttárolós rendszer

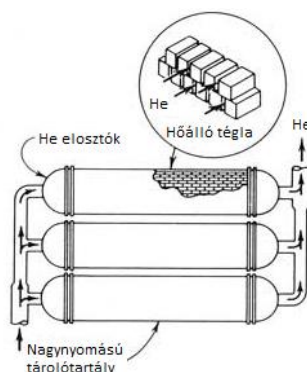
Annak érdekében, hogy ne az egész rendszerben keringessék a drága sóolvadékos közegek indirekt kéttárolós rendszerek is alkalmazhatók. Ebben az esetben a primer körű drága hőkövetítő közeg egy hőcserélőn keresztül átadja hőjét a hőtároló közegnek, mely a meleg és hideg tartályban kerül eltárolásra. Ez a megoldás az új hőcserélő felületek beépítése miatt veszteségekkel jár és alacsonyabb hőmérsékletet biztosít ez energiaátalakító rendszer belépési oldalán.

Szintén költségcsökkentő célokkal fejlesztették ki az egytárolós úgynevezett „thermocline” rendszert (3.16. ábra). Ebben az esetben egy tartály van a rendszerben, mely magasabb az eddigieknél, a tartály alsó részében tárolják a hideg közeget, a felsőben a meleg közeget. A kettő közötti átmeneti részt nevezik „thermocline” zónának. A tartály egy részét feltöltik olcsó töltőanyaggal (például szilícium homokkal), mely alkalmas a hő egy részének eltárolására és a meleg-hideg közeg szétválasztását is segíti. Hőtároló közegként ebben az esetben ásványi olajat alkalmaznak. A rendszer előnye a költségek csökkenése, hátrány azonban, hogy ezt a tartályt is fűteni kell a befagyás megakadályozása miatt, illetve a tárolás sokkal komplikáltabb tervezést igényel.



3.16. ábra. Thermocline rendszer

Az érzékelhető hő eltárolására alkalmasak lehetnek különböző szilárd halmazállapotú tároló tömegek is, ezzel kiküszöbölve a fagyásveszélyt, csökkentve az üzemeltetési költségeket. Ebben az esetben nagy tömegű, szilárd tárolótömböket (beton, magnéziumoxid téglák) építenek, melyekben hőcserélő csővezetékekkel vagy járatokkal oldják meg a hőcserét. A hőközvetítő közeg általában gáznemű (levegő, hélium), az energiaátalakítás Brayton-ciklussal oldható meg. A rendszer előnye, hogy a tároló olcsó, hátránya, hogy a kilépő közeg hőmérséklete nem állandó. Jelenleg kísérleti stádiumban van ez a koncepció, egyik típusát a 3.17. ábra mutatja be.



3.17. ábra. Szilárd töltetű hőtároló rendszer

A látens hő tárolása halmazállapot-változáson alapul, töltés során a közeget megolvasztják, kisütéskor pedig a közeg „fagyasztásával” nyerik ki az eltárolt hőt. A rendszer előnye, hogy nagy térfogati energiasűrűség érhető el és a kisütés hőmérséklete állandó. Hátránya, hogy az alkalmazható anyagok (NaOH, KNO₃, NaNO₃) hővezetése rossz, ezért a tárolóba szükséges beépíteni egy kiegészítő jó hővezetésű réteget is (például grafit). A technológia jelenleg kísérleti fázisban tart.

A termokémiai energiatárolás a kémiai kötések felszakításán alapul. Hőbefektetés hatására a kötések felszakadnak, alacsony hőmérsékleten pedig katalizátorok hatására a reakció hőfelszabadulás mellett megfordul. Erre példa az alábbi reakció:

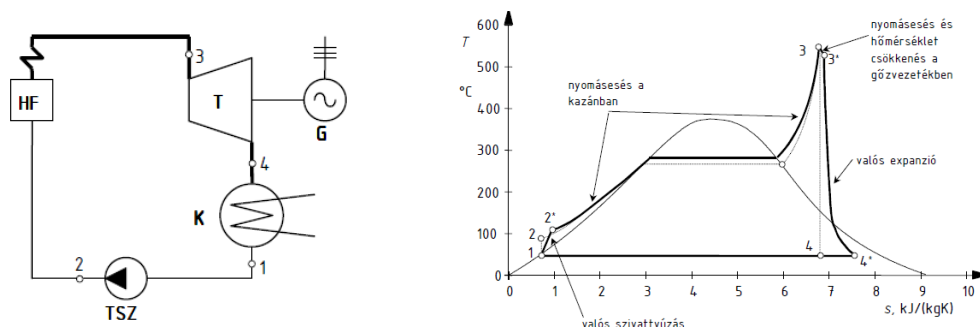


A fenti vízbontó reakcióval nemcsak hőtárolás oldható meg, hanem az előállítható hidrogén szállítható és más körfolyamatokban is hasznosítható.

3.4.8. HŐHASZNOSÍTÓ KÖRFOLYAMAT

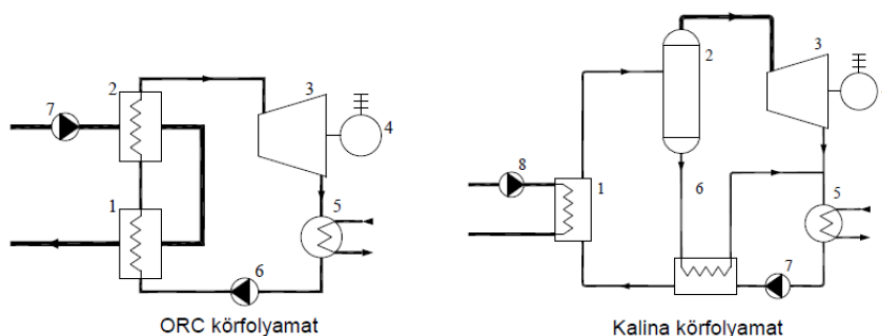
A koncentráltó naperőművekkel megvalósítható gőzkörfolyamatok a Rankine-ciklus, Organikus Rankine-ciklus (ORC) illetve a Kalina-ciklus. Forró gáz munkaközeg esetén Joule-Brayton-körfolyamat alkalmazható, naptányérok esetén pedig Stirling-motorral történik a hőenergia villamos energiává alakítása.

A hagyományos Rankine-ciklus munkaközege víz, fő alrendszerei a hőfejlesztés, a turbina, a kondenzátor és a tápvíz előmelegítő alrendszer. A körfolyam egyszerűsített kapcsolását és T-s diagramját a 3.18. ábra szemlélteti. Naphőerőművek esetén a hőforrás a szolár mezőből, illetve a tárolóból vagy hőcserélőből kilépő hőközvetítő víz munkaközeg. Problémát okozhat a rendszerben a napsütés okozta termelési ingadozás, melyet a különböző tárolókkal lehet kompenzálni.



3.18. ábra. Rankine-ciklus [15]

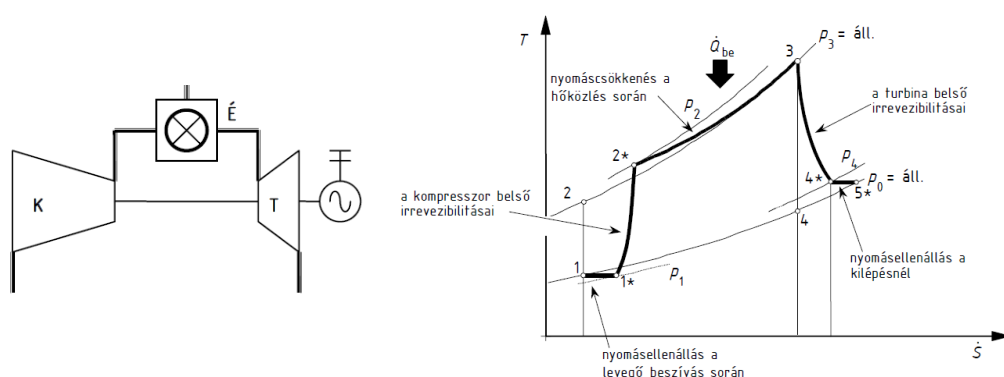
A szerves munkaközegű gőzkörfolyamatok (ORC vagy Kalina-ciklus) alacsonyabb hőmérsékletű hőforrások esetén kedvezően alkalmazhatók. A két rendszer felépítését a 3.19. ábra szemlélteti.



3.19. ábra. ORC és Kalina körfolyamat [16]

ORC körfolyamat esetén a munkaközeg nem víz, hanem valamilyen szerves vegyület, melyet az alacsony hőmérsékletű hőforrás segítségével párologtatnak el. A Kalina-ciklus lényege, hogy víz helyett egy nem azeotróp elegyet alkalmaznak munkaközegként (például $\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$). A munkaközeg nagy előnye, hogy az elpárologtatás hőmérséklete nem állandó, így nagyobb hatásfok érhető el. A koncentráció változtatásával a hőforrás változó hőmérsékletéhez igazítható a rendszer, így nő a hőközlés átlaghőmérséklete és a hatásfok.

Gáz munkaközeg alkalmazásával hagyományos gázturbinás Joule-Brayton körfolyamatok valósíthatók meg, az egyszerűsített kapcsolást és a körfolyamat T-s diagramját a 3.20. ábra szemlélteti.



3.20. ábra. Joule-Brayton-körfolyamat [15]

A gázturbinás körfolyamatnak naptányérok esetén lehet szerepe, ha a jelenleg alkalmazott Stirling-motor helyett mikro-gázturbinákat alkalmaznak. A másik lehetőség (főleg naptornyos koncepcióknál) a szoláris energiatermelés előmelegítésre hasznosítása, kiegészítő forrásként való hasznosítása vagy tüzelőanyag átalakításra történő hasznosítása az úgynevezett hibrid naperőművekben (Integrated Solar Combined Cycle - ISCC).

Naptányérok esetén alkalmazható jó hatásfokkal a Stirling-motoros körfolyamat. A Stirling-motor tetszőleges hőforrás energiáját alakítja mechanikai munkává, a munkaközeg lehet levegő, hélium, hidrogén. A töltőgázt külső forrással melegítjük (szoláris energia) illetve hűtjük (környezeti levegő), mely így egy dugattyút mozgat, a dugattyú pedig meghajt egy áramtermelő generátort.

4. VILLAMOSENERGIA-TERMELÉSI MÓDOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A következő alfejezetekben a fotovillamos energiatermelést és a koncentráción alapuló napenergia-hasznosítást hasonlítom össze területigény, műszaki megvalósítás és paraméterek alapján, valamint gazdaságossági szempontok szerint.

4.1. Területigény

A technológiák ismertetése alapján is látszik, hogy a naphőerőművek felépítése lényegesen bonyolultabb, több alrendszerből, technológia berendezésből áll, mint a napelemes rendszerek. A megújuló energiaforrások egyik nagy kérdése a területigény, ezen belül is az optimális viszonyokkal rendelkező területek kihasználása, mivel ezek kontinensünk lakottsága és mérete alapján korlátozottak. Ebben az alfejezetben a két technológia szükséges apertúra felületét (fénybeesési felületét) egyszerű, közelítő számítással hasonlítom össze, mellyel egy szempontból felmérhető a technológiák versenyképessége.

A naphőerőművek és a napelem-park apertúrafelületének összehasonlítását tervezési állapotra, vagyis ismert sugárzási intenzitás és névleges villamos teljesítmény alapján végzem el. A napelem park esetében több cellatípus hatásfokot is vizsgállok, a kiindulási adatokat a 4.1. táblázat foglalja össze.

4.1. táblázat. Napelem park kiindulási adatai területigény számításához

Direkt napsugárzás	$I_{a, d}$	850 W/m ²
Szórt napsugárzás	$I_{a, sz}$	150 W/m ²
Globál napsugárzás	$I_{a, t}$	1000 W/m ²
Villamos csúcsteljesítmény igény	P	10 MW
Napelem hatásfoka		
• mono-Si		17%
• multi-Si	η_{PV}	15%
• a-Si		7%
• GaINP/GaInAs/Ge		28%

A napelemek a szórt, illetve direkt sugárzást is hasznosítják, a szükséges apertúra felület a következő egyszerű összefüggéssel számítható:

$$A_a = \frac{P}{\eta_{PV} \cdot I_{a,t}} \quad (4.1.)$$

Az eredményeket a különböző napelem típusokra a 4.2. táblázat foglalja össze. Az inverterek 95-97% közötti hatásfoka a számítási eredményeket kis mértékben befolyásolja.

4.2. táblázat. Napelemek szükséges apertúra felülete

Apertúra felület	
• mono-Si	60 606 m ²
• multi-Si	68 966 m ²
• a-Si	142 857 m ²
• GaINP/GaInAs/Ge	36 364 m ²

Naphőerőművek esetén egy naptorony típusú naphőerőműre vizsgálom a területigényt. A naptorony esetén MS Excel programmal végzem a számítást a 0. szakaszban leírt hőtani összefüggések alapján, a következő két kiegészítő feltétel mellett:

- a felfogó ernyő hőmérséklete egyenlő a hőközvetítő közeg hőmérsékletével,
- nincs konvektív és konduktív veszteség.

A naptorony kiindulási adatait a 4.3. táblázat foglalja össze.

4.3. táblázat. Naptorony kiindulási adatok

Direkt napsugárzás	$I_{a, d}$	850 W/m ²
Koncentrációs fok	CR_g	1000
Villamos csúcsteljesítmény igény	P	10 MW
Termikus - villamos energiaátalakítás hatásfoka	η_{vill}	30%

A naptornyos rendszerben levegő-víz hőcserét valósítunk meg, a termikus körfolyamat paramétereit a 4.4. táblázat foglalja össze. A szolárpark paramétereit pedig a

4.5. táblázat foglalja össze.

4.4. táblázat. Naptorony erőmű termikus körfolyamat paraméterei

Hőigény (gőz oldal)	$Q_{\text{hasznos, gőz}}$	33 MW
Levegő-gőz hőcsere hatásfoka		75%
Hőigény (levegő oldal)	$Q_{\text{hasznos, levegő}}$	44,44 MW
Levegő tömegáram	m_{lev}	70,00 kg/s
Levegő fajhő	c_p	1120 J/kgK
Levegő belépő hőmérséklet	$T_{\text{lev, be}}$	373 K

4.5. táblázat. Naptorony szolárpark paraméterei

Felfogási fok	Γ	95%
Tükrök refelektivitási tényezője	ρ	95%
Védőfelületek transzmissziós tényezője	τ	95%
Felfogó felület abszorpciós tényezője	α	98%
Optikai hatásfok	η_{opt}	84%

A hasznos hőigény ismeretében célérték kereséssel megállapítható a szükséges apertúra felület, illetve a koncentrációs fok ismeretében a szükséges felfogó felület mérete is. A számított apertúra felület alapján a szoláris hőteljesítményt és a sugárzási veszteségeket a 4.6. táblázat foglalja össze.

4.6. táblázat. Naptorony területszámítás eredményei

Apertúra felület célértékkereséssel	A_a	66 206,43 m ²
Felfogó felület	A_r	66,21 m ²
Szoláris hőteljesítmény	Q_{szol}	47,28 MW
Felfogó egység emissziós tényezője	ε	0,98
Stefan-Boltzmann állandó	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
Ég ekvivalens fekete test hőmérséklete	$T_{\text{ég}}$	292 K
Felfogó hőmérséklete	T_r	939,89 K
Sugárzási hőveszteség	Q_{sug}	2,84 MW

A napelemes és naptornyos rendszer esetében is apertúra felületként sík panelokat (napcella vagy tükrök) kell elhelyeznünk a területen. Mindkét esetben el kell kerülni, hogy a felületek egymást árnyékolják és biztosítani kell a megfelelő napkövetést. Az eredményeket összehasonlítva az egyszerű számítás alapján a közepes hatásfokú napelempark és a naptornyos rendszer apertúra felülete közel azonos, a két erőműtípus ebből a szempontból versenyképes.

4.2. Műszaki és gazdaságossági összehasonlítás kiinduló paraméterei

A következő alfejezetekben modellezett rendszereket hasonlítok össze műszaki és gazdasági paramétereik alapján. A modellezést a National Renewable Energy Laboratory (NREL) System Advisor Model (SAM) programjával végzem [6]. A program nagy előnye, hogy

adatbázisában sok meteorológiai, rendszer és gazdasági adat van beépítve, mellyel alkalmas több megújuló bázisú erőmű tervezésének támogatására.

Az általam választott meteorológiai adatok a spanyol Sevilla városára vonatkoznak, mivel a helyi időjárási viszonyok kedveznek a napenergia-hasznosításon alapuló energiatermelésnek. Az éves átlagos paramétereket a 4.7. táblázat foglalja össze.

4.7. táblázat. Éves átlagos meteorológiai paraméterek

Szélességi fok	37,42
Éves globális sugárzás	1 785,9 kWh/m ²
Éves szórt sugárzás	1 244,9 kWh/m ²
Száraz léghőmérséklet	18,3 °C
Szélesebesség	6,7 m/s

A gazdasági elemzést az Erőművek üzemvitelének tantárgy oktatási segédanyaga alapján végeztem (CF – Cash Flow számítás). A bevétel forrását adó éves energiatermelés értékeit, illetve az egyéb műszaki és területi paramétereket SAM program szimulációjából illeszttem be. A gazdasági számításokhoz szükséges beruházási költségek, üzemeltetési és karbantartási költségek valamint a földbérleti költségek esetén a 4.8. táblázat összefoglalt adatokat használom [17]. Ezek az adatok a már üzemelő hasonló erőművek, valamint a szakirodalmak, gyártói adatbázisok adataihoz jól igazodnak.

4.8. táblázat. Gazdasági számítás kiindulási paraméterei

Általános paraméterek	
Euro árfolyam	295 Ft/€
Üzemidő	25 év
Diszkontráta	8%
Amortizáció (lineáris leírás az üzemidőre)	4%
Földbérlet	7 €/m ² /év
Saját tőke/hitel arány	30%/70%
Napelempark fajlagos költségek	
Monokristályos modul	1,3 €/W
Polikristályos modul	1,0 €/W
Vékonyfilm modul	0,8 €/W
Inverter	0,7 €/W
Rendszeregyensúly	0,7 €/W
Üzemeltetés és karbantartás évi költsége	beruházási költség 2%-a
Parabolavályús naphőerőmű fajlagos költségek	
Szolárpark	275 €/m ²
Erőmű	800 €/kW _e
Hőtároló	25 €/kWh _{th}
Üzemeltetés és karbantartás évi költsége	beruházási költség 5%-a

A spanyol a megújuló villamos energia átvételi rendszer 2007-ben 25 éves távra garantálta a 0,32 €/kWh, azaz körülbelül 91 Ft/kWh árat. Ennek hatására olyan mértékű napenergia-alapú bővítés kezdődött (főleg PV rendszerek beépítése), melyre a kormányzat nem számított, hamar be is fagyasztották a támogatási rendszert. Jelenleg folyik a törvénymódosítás, a támogatási rendszer átfaragása. 2013. augusztus 1-én Spanyolországban bejelentették, hogy 45%-kal csökkentenék a jövőben építendő PV-erőművek átvételi árát, de a többi kategóriában is 25, illetve 5%-os mérséklést terveznek, illetve arról is tárgyalnak, hogy körülbelül 30%-kal csökkentsék a már meglévő erőművek átvételi tarifáját. Az általam választott villamos energia átvételi ár az egységes elemzés érdekében került megválasztásra 80 Ft/kWh áron. [18,19]

4.3. Napelem-park

A napelem park esetében a SAM programban tárolt gyártói adatbázisból monokristályos, polikristályos és a-Si vékonyfilm modul esetére végeztem számítást. A modulok névleges adatait a 4.9. táblázat foglalja össze, a választott inverter legfőbb paramétereit pedig a 4.10. táblázat foglalja össze.

4.9. táblázat. Napelem modulok adatai

	1. típus	2. típus	3. típus
Modul típusa	monokristályos szilícium	polikristályos szilícium	a-Si vékonyfilm
Modul neve	SunPower SPR-210-BLK-U	SunPower SER-220P	ENN Solar Energy EST-220V
Modul hatásfoka	17,3%	13,39%	7,71%
Maximális teljesítmény	215,25 Wdc	219,972 Wdc	220,5 Wdc
Cellák száma modulunként	72 darab	60 darab	106 darab
Modul mérete	1,244 m ²	1,643 m ²	2, 86 m ²

4.10. táblázat. Inverter adatai

Típus	AEG Power Solutions Protect PV.500-UL 480V
Hatásfok	97,34%
Maximum AC teljesítmény	510 000 Wac
Maximum DC teljesítmény	523541 Wdc

4.3.1. MŰSZAKI ÖSSZEHOSONLÍTÁS

Az erőműparkok névleges villamos teljesítménye 50 MWe. A program által erre a teljesítményre javasolt napelem-park felépítéseket a 4.11. táblázat foglalja össze. A számítás során kéttengelyes napkövetés került beállításra, a modulok dőlésszöge 33°, irányszöge 180°, a területszámításnál a panelek nem árnyékolják egymást.

4.11. táblázat. Számított napelem-park felépítések

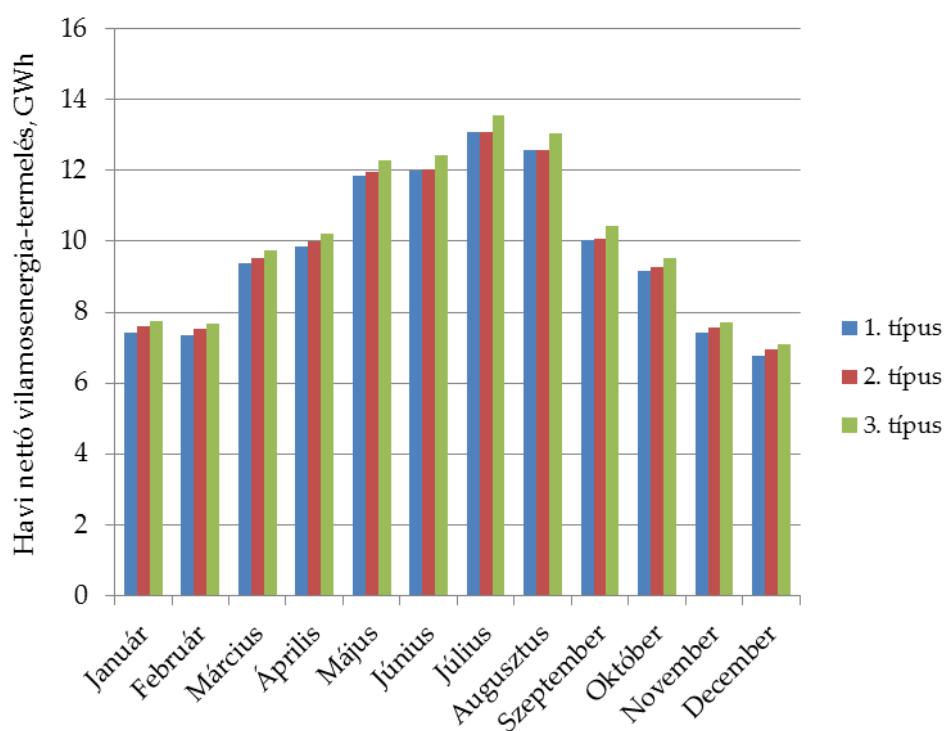
	1. típus	2. típus	3. típus
Modulok száma	232 288	227 304	226 758
Összekapcsolt napelem modulok száma	16	22	6
Párhuzamos összekapcsolások száma	14 518	10332	37 792
Teljes modul felület	288 966 m ²	373 460 m ²	648 511 m ²
Inverterek száma	99	99	99

A napelem-parkok felépítése és a meteorológiai adatok segítségével a lefuttatott program lehetőséget ad a rendszer műszaki paramétereinek kielemezésére. A legfontosabb adatokat a 4.12. táblázat foglalja össze.

4.12. táblázat. Napelem-parkok műszaki paramétereit

	1. típus	2. típus	3. típus
Éves átlagos energiatermelés (AC)	116,92 GWh	118,10 GWh	121,43 GWh
Csúskihasználási óraszám	2338 h	2362 h	2428 h
Kihasználási tényező	26,7%	26,96%	27,72%
Igényelt terület	72,24 ha	93,36 ha	162,13 ha

A havi lebontású termelést a három típusra a 4.1. ábra mutatja be.

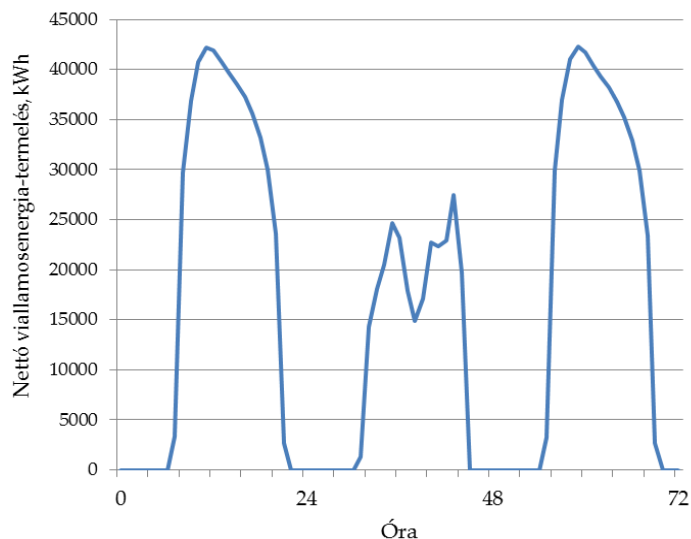


4.1. ábra. Napelem-parkok havi nettó villamos energiatermelése

Az adatok alapján látszik, hogy a választott napelemek termelése évi 120 GWh körül alakul, kihasználási óraszámuk 2300 h körüli. Területigény szempontjából látszik, hogy az alacsonyabb hatásfokú, de olcsóbb napelemek telepítése a területigényt közel kétszeresére növeli.

A nettó villamos energia termelés három júliusi napi lefutását monokristályos napelemre (1. típus) a 4.2. ábra szemlélteti. Ahogy látszik a napelemek közvetlen sugárzási energia-villamos energia konverziója hektikus termeléshez vezet, mely a villamosenergia-rendszerben

illesztési problémákat okozhat. Abban az esetben, ha ezt a hálózatra akarjuk kapcsolni, megfelelő háttér kapacitások beépítése, vagy tárolók (ideális esetben szivattyús tározós erőmű, ritka esetben akkumulátortelepek) alkalmazása nélkül a rendszer erőteljes rángatását okozza.



4.2. ábra. Monokritályos napelem nettó villamosenergiatermelése júliusi napokon

4.3.2. GAZDASÁGI ÖSSZEHASONLÍTÁS

A gazdasági elemzés legfontosabb eredményeit a [20] forrás foglalja össze. Ha a belső megtérülési ráta (IRR – Internal Rate of Return) értéke a diszkontráta feletti, illetve a nettó jelenérték (NPV – Net Present Value) értéke pozitív, akkor a beruházás megvalósítása gazdaságos a megadott feltételek mellett. (A részletes Cash Flow számítást az [20] forrás, illetve a csatolt Excel táblázat tartalmazza.)

4.13. táblázat. Napelemparkok gazdasági eredményei

	1. típus	2. típus	3. típus
Összes beruházási költség, mFt	35 434	31 881	31 771
Fajlagos beruházási költség, Ft/kW	708 670	637 615	635 419
IRR	31%	30%	13%
NPV, mFt	37 691	32 843	7 101

Az eredmények alapján a választott meteorológia viszonyok közt a napelemparkok gazdaságosan, igen magas belső megtérülési ráta mellett valósíthatók meg. Ez a kecsgetető befektetési lehetőség indokolhatja többek között az átvételi rendszer reális módosítását Spanyolországban, mellyel a rendszerbiztonsági szempontok is javíthatók.

4.4. Parabolavályús naphőerőmű tárolás nélkül

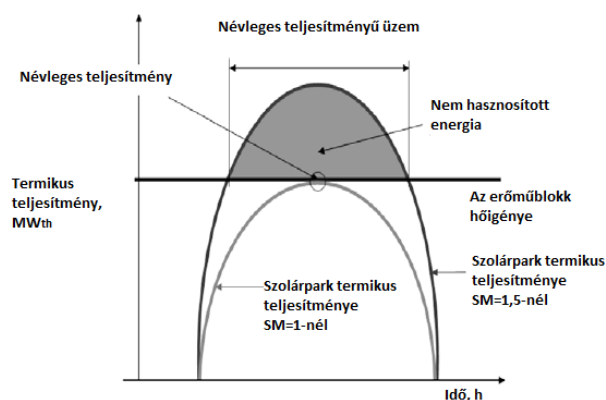
A parabolavályús naphőerőművek tipikus felépítését szemlélteti a 3.5. ábra. Mivel ebben a rendszerben a sugárzási energia először termikus energiává, majd mechanikai munkává és ezt követően villamos energiává alakul, a rendszer felépítése bonyolultabb és sok műszaki sajátossága van, mely bonyolítja a tervezést és üzemeltetést.

Egy szoláris park termelése a sugárzási intenzitáshoz igazodik, melynek időbeli változása számottevő. A változó termelés ellenére a parabolavályús rendszerhez kapcsolódó gőzkörfolyamat berendezései üzemelésükhöz állandó felfűtöttséget igényelnek (például turbina, hőközvetítő közeg), így a rendszernek van egy állandó minimális termikus energiaigénye. Előfordulhat, hogy ezt az energiaigényt nem képes fedezni a szoláris rendszer, így szükségessé válhat kiegészítő fűtés alkalmazása, melynek értelemszerűen legegyszerűbb megvalósítása egy fosszilis/biomassza tüzelőanyagú kiegészítő kazán. A hektikus termelés ellensúlyozásának másik megoldása a hőtárolók beépítése, melynek szerepe egyre nő, hiszen több helyen a jogilag is korrekt megújuló energiahasznosítás esetén korlátozott hányadú az alkalmazható kiegészítő fosszilis forrás.

4.4.1. MŰSZAKI ÖSSZEHASZNÁLÁS

A megfelelő tervezés ilyen naphőerőművek esetén elengedhetetlen, hiszen egy túl nagy begyűjtő felület nagy besugárzottság esetén kihasználatlan potenciálokat jelent, egy túl kicsi begyűjtő felület pedig alacsony besugárzottság esetén alig termeli meg a gőzerőmű működéséhez szükséges minimális energiát. A kiegészítő tüzelőberendezések a hőközvetítő közeg fűtését és a turbina minimális gőzigényét biztosítják éjszaka, illetve hosszabb alacsony sugárzási intenzitás esetén.

A szoláris begyűjtő felület méretezésének optimalizálásához meg kell határozni a megfelelő szoláris szorzó (Solar Multiple – SM) értéket, mely a szoláris park által termelt termikus energia és a villamosenergia-termelő blokk által igényelt termikus energia hányadosa névleges állapotban. A 4.3. ábra szemlélteti a különböző SM paraméterek esetén a termikus energia termelést. Látható, hogy a névleges állapot eléréséhez és szinten tartásához az SM értéke nagyobb kell legyen, mint 1. Túl nagy érték esetén azonban nagymértékű lesz a villamosenergia-termelésben nem hasznosított szoláris energia, mely csak tárolással védhető ki. Minden esetben figyelembe kell venni azonban, hogy a szoláris felület beépítése adja a beruházási költség legnagyobb hányadát. Ezenkívül minél nagyobb a felület, illetve a szükséges csővezeték rendszer, annál nagyobbak a szolár park hőveszteségei is.



4.3. ábra. Napi hőtermelés különböző SM értékek esetén [21]

A méretezés/modellezés során érdemes a villamosenergia-termelő blokk névleges paramétereiből kiindulni és ehhez igazítani a szoláris parkot. A SAM program empirikus parabolavályús naphőerőmű modellje is tárol valós adatokon alapuló blokk adatokat és a koncentrátor rendszer adatait a megadott SM alapján állapítja meg. A választott 50 MW_e névleges nettó teljesítményre a program segédlete a 4.14. táblázatban összefoglalt hagyományos Rankine gőzkörfolyamatú blokkot javasolja.

4.14. táblázat. Villamosenergia-termelő blokk adatai

Blokk típusa	Siemens 400C HTF
Névleges bruttó teljesítmény	55,5 MW _e
Névleges nettó teljesítmény	50 MW _e
Hőkörfolyamati hatásfok	37,36%
Névleges bemenő hőteljesítmény	148,56 MW _{th}
Maximális bemenő hőteljesítmény	169,73 MW _{th}
Mimimális bemenő hőteljesítmény	46,38 MW _{th}

A hőközvetítő közeg egy parabolavályús rendszerben jellemzően valamilyen termoolaj, a számítás során az egyik leggyakrabban alkalmazott típus lett figyelembe véve, melynek adatait a 4.15. táblázat foglalja össze.

4.15. táblázat. Hőközvetítő közeg adatai

Hőközvetítő közeg neve	Therminol VP-1
Hőközvetítő közeg típusa	bifenil- és defenil-oxid keveréke
Minimális üzemelési hőmérséklet	12 °C
Maximális üzemelési hőmérséklet	400 °C
Fagyáspont	12 °C

A napsugárzás koncentráló alrendszerben a parabolavályúk és a hőgyűjtő csőrendszer is több kereskedelmi opció közül választható ki, illetve beállítható a csőrendszer állapota is (tökéletes vákuum, törött üveg, hidrogén töltet, stb.). A szimuláció során a 4.16. táblázatban összefoglalt koncentráló alrendszer paraméterekkel dolgoztam.

4.16. táblázat. Koncentráló alrendszer kiindulási paraméterei

Koncentráló rendszer típusa	Luz LS-3
Koncentráló rendszer minta	SEGS VII – IX, Kalifornia
Parabolavályú tükörfelület	545 m ²
Parabolavályú tükör reflektivitás	93,5%
Hőgyűjtő cső típusa	Solel UVAC3
Hőgyűjtő cső állapota	vákuum (névleges üzem)
Optikai hatásfok	75,5%
Hővesztesség	196 W/m

A parabolavályús naphőerőmű esetében először egy tárolás és kiegészítő tüzelés nélküli rendszert vizsgáltam meg. Két esetre végeztem el a szimulációt SM= 1 és SM=2 értékekre. A megfelelő szolárparkok felépítéseit és a szimulációk eredményeit a 4.17. táblázat foglalja össze.

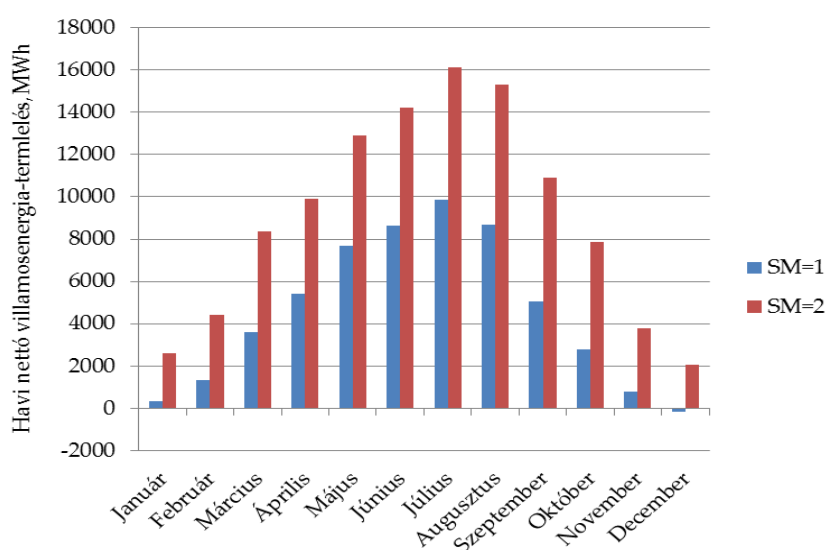
4.17. táblázat. Tárolás nélküli naphőerőmű műszaki paraméterei

Változat	SM=1	SM=2
Apertúra felület	220 725 m ²	441 450 m ²
Szolárpark terület	57,5 ha	114,9 ha
Igényelt terület	80,5 ha	161,1 ha
Éves átlagos energiatermelés	54,05 GWh	108,48 GWh
Csúskihasználási óraszám	1086 h	2172 h
Kihasználási tényező	12,4%	24,8%

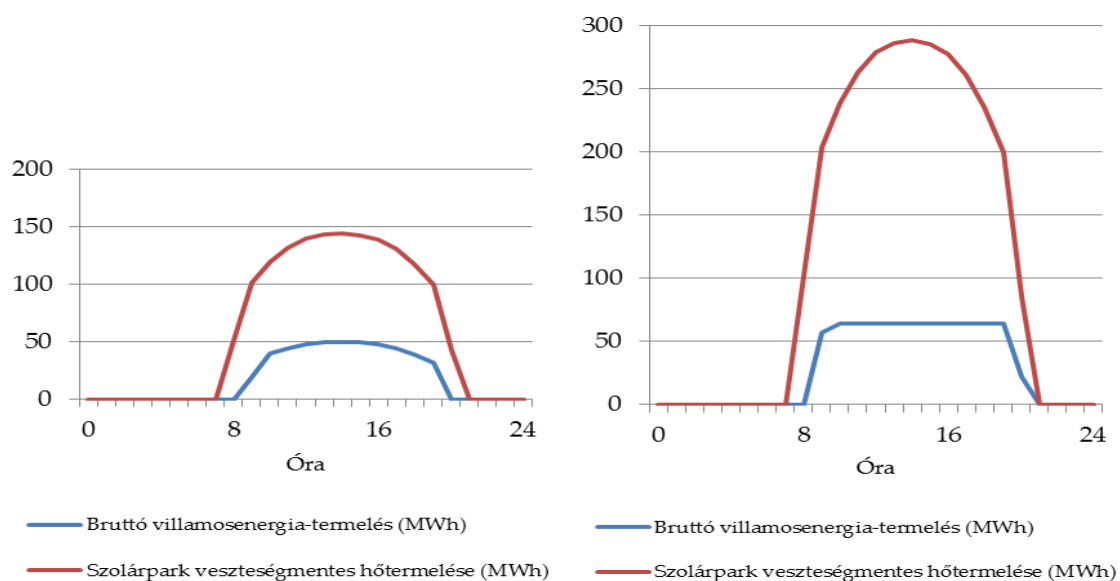
Ez a két szimuláció lehetőséget ad egy alulméretezett és egy túlméretezett rendszer vizsgálatára. A havi energiatermeléseket a 4.4. ábra szemlélteti. Az SM=1 érték esetén látszik, hogy a rendszer decemberben nem tudja fedezni szükségleteit, az üzemeléshez több energia szükséges, mint amennyit a szoláris park biztosítani tud. A 4.5. ábra bal oldala szemlélteti SM=1 értéknél, hogy egy nyári napsütéses napon a rendszer napkeltétől napnyugtáig a sugárzásnak megfelelően termel, névleges teljesítményét egy ponton éri el. A

másik esetben (SM=2 értéknél) a 4.5. ábra jobb oldala szemlélteti ugyanazon a napon, hogy a maximális villamos teljesítmény felett az erőmű nem termel, túlméretezett a rendszer, sok a hasznosítatlan sugárzási energia, mely indokolhatja hőtárolók beépítését.

Alulméretezett rendszer esetén ahogy haladunk a csökkenő direkt sugárzású téli napok felé, úgy csökken és válik egyre hektikusabbá a bruttó villamosenergia-termelés, majd decemberi napokon gyakorlatilag meg is szűnik a kitermelhető villamos energia. Túlméretezett rendszer esetén fedezzük az erőmű és a szoláris park önfogyasztását, de magas direkt napsugárzás esetén sem termelünk a néveleges kapacitás felett. Egy nyári, őszi és téli napra a termelést és az erőmű legfontosabb önfogyasztási igényeit az 1.melléklet mutatja be SM=1 és SM=2 értékre is.



4.4. ábra. Tárolás nélküli naphőerőművek havi energiatermelése



4.5. ábra. Napi villamosenergia-termelés SM=1 és SM=2 értéknél

4.4.2. GAZDASÁGI ÖSSZEHAJONLÍTÁS

A gazdasági elemzés legfontosabb eredményeit a 4.18. táblázat foglalja össze. (A részletes Cash Flow számítást az [22] forrás, illetve a csatolt Excel táblázat tartalmazza.)

4.18. táblázat. Tárolás nélküli naphőerőművek gazdasági eredményei

	SM=1	SM=2
Összes beruházási költség, mFt	60 440	109 716
Fajlagos beruházási költség, Ft/kW	1 089 015	1 976 872
IRR	-9%	3%
NPV, mFt	-36 450	-62 392

Az eredmények alapján a választott meteorológia viszonyok közt a parabolavályús koncentrátorok nem üzemelnek gazdaságosan, belső megtérülési rátájuk nagyon rossz a megadott paraméterek mellett. Az SM=1 alulméretezett rendszer esetén ez az eredmény nem meglepő, a másik esetben viszont többek között ez is indokolja a tárolással történő kiegészítés vizsgálatát. A fajlagosan drága erőmű üzemidejének kitolása javíthatja a növekvő bevételek révén a beruházás gazdasági eredményeit.

4.5. Parabolavályús naphőerőmű tárolással

Először meg kell határozni milyen üzemelést várunk el az erőműtől, vagyis meg kell adni a menetrendet. Ez a menetrend hónapokra lebontva meghatározza hétköznapi és hétvégi napokra, hogy milyen energiatermelési módokkal (szolárpark, tárolás, kiegészítő hőforrás) dolgozzon az erőmű. Beállíthatók a következők:

- napsütéses idő esetén a tároló töltődjön és ne termeljen, vagy adott feltöltöttség felett kerüljön kisütésre,
- éjszaka a tároló kerüljön kisütésre, vagy ha nem ér el adott feltöltöttségi szintet az erőmű üzemeltetéséhez, akkor ne kerüljön kisütésre,
- mekkora hányadot termelhessünk fosszilis kiegészítő hőforrásból.

Az elvárt menetred alapján érdemes a tároló kapacitás méretét optimalizálni. A tároló méretét ekvivalens órában adhatjuk meg, ami azt jelenti, hogy hány órányi névleges állapotnak megfelelő energiát tárolhatunk el a megépített tartályokkal.

4.5.1. MŰSZAKI ÖSSZEHAJONLÍTÁS

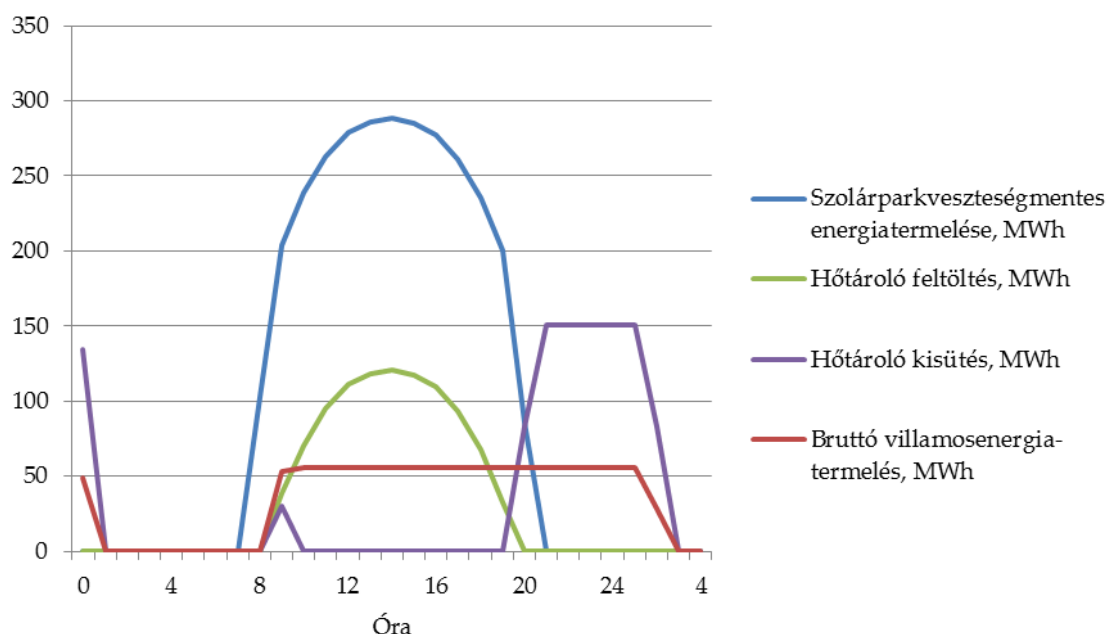
Az SM=2 túlméretezett rendszer üzemidejének meghosszabítása és egyenletes termelésének érdekében a következő menetrendet állítottam be:

- napsütéses időben (9 és 4 óra között) az erőmű betárolja a névleges termelés feletti energiát,
- naplemente után a tárolásból fedezi a névleges teljesítményt a tároló kimerüléséig.

A szimuláció során két esetben (7 illetve 8 órás tároló esetén) is egyenletes, meghosszabított üzemű termelés adódott, melyek között gazdaságossági vizsgálattal érdemes megállapítani, hogy melyik éri meg jobban. A 7 órás tárolókapacitás esetére a termeléslefutást az előzőekben is vizsgált napra a 4.6. ábra szemlélteti (külön kiemelve a tárolás lefutását), a rendszerek legfontosabb paramétereit a 4.19. táblázat foglalja össze.

4.19. táblázat. Tárolással rendelkező naphőerőmű műszaki paramétereit

Tároló	7 órás tároló	8 órás tároló
Éves átlagos energiatermelés	154,31 GWh	159,86 GWh
Csúcskihasználási óraszám	3090 h	3200 h
Kihasználási tényező	35,27%	36,53%



4.6. ábra. Napi villamosenergia-termelés SM=2 értéknél 7 órás tárolókapacitás beépítése mellett

4.5.2. GAZDASÁGI ÖSSZEHAJONLÍTÁS

A gazdasági elemzés legfontosabb eredményeit a 4.20. táblázat foglalja össze. (A részletes Cash Flow számítást az [22] forrás, illetve a csatolt Excel táblázat tartalmazza.)

4.20. táblázat. Tárolással rendelkező naphőerőművek gazdasági eredményei

	7 órás tároló	8 órás tároló
Összes beruházási költség, mFt	117 386	118 485
Fajlagos beruházási költség, Ft/kW	2 115 070	2 134 870
IRR	2,3%	3,1%
NPV, mFt	-31106	-27511

Az eredmények alapján a választott meteorológia viszonyok közt a parabolavályús koncentrátorok tárolással még mindig nem üzemelnek gazdaságosan. A fajlagosan drága erőmű üzemidejének kitolása a növekvő bevételek révén a javította a beruházás gazdasági eredményeit, de ezek még messze elmaradnak a napelemparkoknál kapott értékektől.

4.6. Eredmények összehasonlítása

Területigény szempontjából az egyszerűsített számítás és a SAM program alapján is a két technológia nagyjából azonos földigénnyel rendelkezik. Ezen a téren megállapítható, hogy a mezőgazdaságilag kihasználatlan területek energiatermelésre történő hasznosításában nem élvez előnyt egyik mód sem, mindkettő versenyképes. Mivel nagy területekről van szó és a megújuló energiatermelés által igényelt földterületek nem élelmiszertermelésre történő hasznosítása jelenleg is sok vitát szül, ezért a következő fejezetben bemutatott DESERTEC koncepció megfontolandó telepítési ötleteket adhat.

A műszaki eredmények alapján a legszembetűnőbb a napi villamosenergia-termelés lefutása. Egy fotovillamos erőmű ugyan a direkt és szórt sugárzást is hasznosítja, de mindenképp az időjárási és sugárzási adottságokhoz kötött. A hektikus termelés megfelelő háttérkapacitásokat igényel a villamosenergia-rendszerben. Ezzel szemben a tárolással kiegészített naphőerőmű üzeme a hőtárolók, illetve az esetleg beépített fosszilis/biomassza kazánok révén nemcsak egyenletes termelést, hanem üzemidőben nyújtott termelést is jelenthet.

A gazdasági eredményeket nézve azonban a napelemek eredményei sokkal kedvezőbbek. A fotovoltaiikus fellendülés és a tömeggyártás hatására a beruházási költségek sokat csökkentek. Egy naphőerőmű beruházási költsége viszont jelenleg nagyon magas, ennek oka az is, hogy az iparág és a fejlesztések most vannak felívelőben, a speciális (például sivatagi) igényekre a berendezések még frissek és ebből adódóan drágák. Mivel az energetikai beruházások esetén

a gazdasági megtérülés a döntő, ezért a CSP erőművek elterjedéséhez mindenképp szükséges egyrészt a megfelelő támogatás biztosítása, másrészt a technológiai innovációkba való befektetés. További megfontolandó probléma az éves földbérlet, mely rendkívüli mértékben rontja a gazdasági mutatókat – ezen a téren például egy megoldás, ha rekultivációs területeket hasznosítunk energiatermelésre és nem kell fizetnünk a területért.

A megfelelő meteorológiai adottságokat keresve, hamar látszik, hogy a naphőerőműveknek realitása a sivatagos és félsivatagos területeken van. Európában ezek a potenciálok korlátozottak, döntően spanyol területekre. A spanyolországi támogatási rendszer átalakítását figyelembe véve a naphőerőmű beruházások döntései pedig eltolódhatnak vagy meghiúsulhatnak. Ebből a szempontból is érdemes megemlíteni következőkben kifejtett DESERTEC koncepciót.

5. DESERTEC KONCEPCIÓ

Maga a konkrét koncepció DESERTEC Concept néven 2003 és 2007 között fogalmazódott meg Marokkó, Algéria, Líbia, Egyiptom, Jordánia, Yemen valamint Németország megújuló energiatermeléssel foglalkozó intézeteinek közreműködésével. 2007-ben El Hassan bin Tatal jordániai herceg az Európai Parlament elé tárta az addig megszületett tanulmányok összefoglalóját (White Book – Fehér Könyv).

A 2009-es év elején megalakult a DESERTEC Foundation (DF) non-profit szervezet, melynek célja a közel-keleti és észak-afrikai energiatermelés ötletének fejlesztése, terjesztése. A 2009-es év végén a DF koncepciója és a cégek között összekötő kapocsként megalakult a Desertec Industrial Initiative (Dii) is, mely a téma iránt érdeklődő nagy energetikai vállalatokat, napenergiával foglalkozó cégeket és bankokat, kockázatelemzőket fogja össze. A két szervezet közös munkájának eredményeképp több projekt indult el, 2013 júniusában azonban együttműködésük vezetőségi döntés alapján megszűnt.

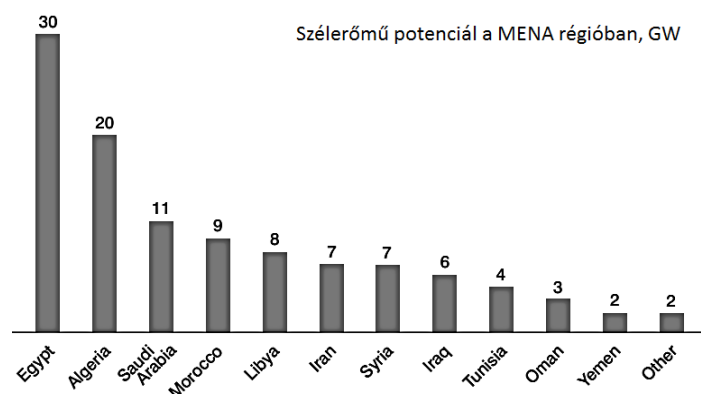
A sivatagi energiatermelés- és szállítás koncepcióját és a megvalósítás útját a Desert Power 2050 című tanulmány foglalja össze. A dél-európai régiók összekötését Észak-Afrika, valamint a Közel-Kelet (röviden MENA – Middle-East and North-Africa) energiatermelésével elsősorban a megújuló energiaforrások optimális kihasználása indokolja, az importálás környezetvédelmi és a megfelelő műszaki fejlettség elérése esetén gazdasági előnyöket is jelenthet az Európai Unió számára.

A MENA régió népességének várható növekedése esetén a terület pedig nemcsak termelőként, hanem fogyasztóként is megjelenik, így számára is előnyös egy biztonságos, fosszilis erőforrásoktól mentes villamosenergia-rendszer kiépítése. [23,24]

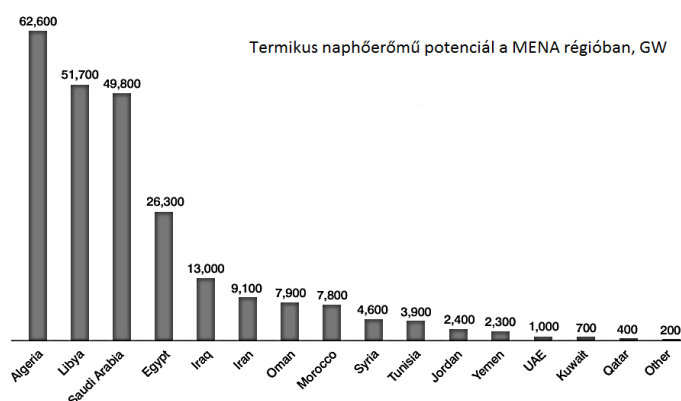
5.1. Villamosenergia-termelés és kapacitások

A MENA régió több szárazföldi területen (Marokkó, Egyiptom) és a tengeren is kiváló paraméterekkel rendelkezik szélenergia hasznosítás szempontjából. A területen jellemző, ahogy Európában is, hogy a tervezett és építés alatt álló turbinák már a nagyobb egységteljesítmények felé haladnak. Németország tapasztalatai ezen a terén nagyban segítik a MENA régió szélenergia-potenciáljának kihasználását. A másik ideális viszonyokkal rendelkező energiatermelés a sivatagi napenergia-hasznosítás, mind a fotovillamos, mind a termikus naphőerőművek révén.

A megújuló potenciálokat egy 2009-es tanulmány foglalja össze, a régió különböző országaira vonatkozóan az 5.1. ábra és az 5.2. ábra szemlélteti. [25]



5.1. ábra. Szélenergia potenciál a MENA régióban



5.2. ábra. Napenergia potenciál a MENA régióban

5.2. Villamosenergia-tárolás és szállítás

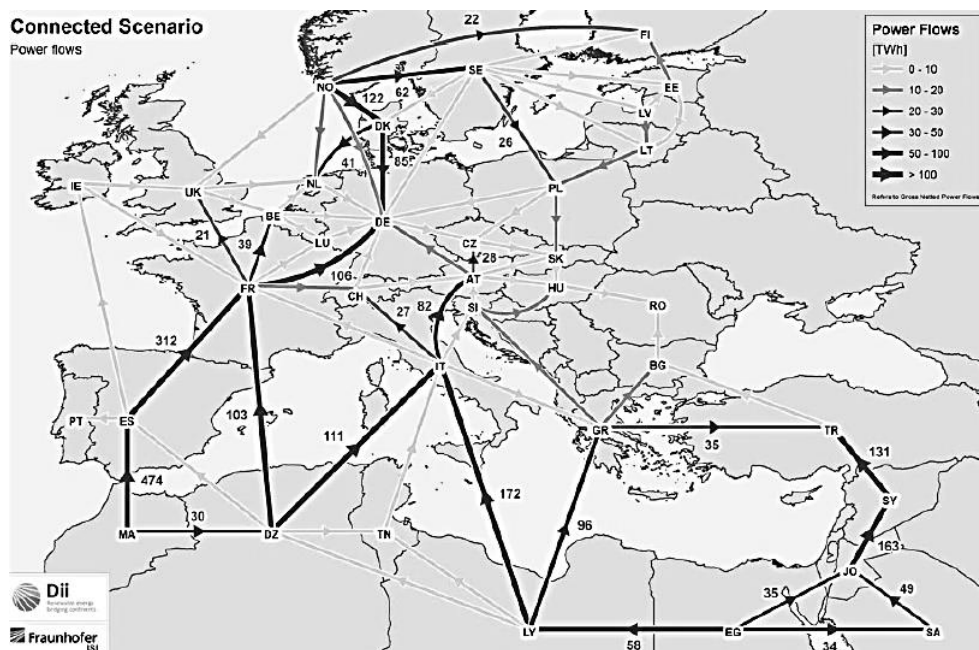
A sivatagos területeken megtermelt villamos energia több módon hasznosítható, illetve bekapcsolható az európai villamosenergia-rendszerbe, a hasznosítási módokat tekintve más-más érdekek élveznek prioritást.

A MENA régió érdekeit szem előtt tartva a megújuló energiaforrások optimális kihasználása saját villamosenergia-rendszerük fejlesztését eredményezné, melynek fontos a szerepe a várható népesség és energiaigény növekedés miatt. A kihasználatlan területek és az energiatermelési technológiák adottak és mivel ezekben a zónákban a meteorológiai viszonyok sokkal kedvezőbbek, mint Európában a koncentrátoros energiatermelés hatásfokjavításának és optimalizálásának sikeres jövőt jósolhatunk. Kérdéses lehet a villamos energia tárolása, mint minden időjárásfüggő megújuló energia hasznosítása esetén. A MENA régióban a szivattyús tározós erőművek kiépítése korlátozott, tárolókapacitásként a CSP erőművek hőtárolása lehet megoldás. Másik megoldás a hasznos termék előállítás (import vagy helyi felhasználásra), vagyis a megtermelt villamos energia segítségével hidrogén- és

metántermelés. Ezen kívül a terület népességének növekedése indokolhatja a megújuló villamos energia tengervíz sótalanításra való hasznosítását.

Az Európai Unió villamosenergia-rendszerébe kapcsolás az elképzelések szerint olcsó és környezetbarát import áramot jelentene az EU számára. A 2050-re tervezett összekapcsolt rendszer a következő elveken alapul:

- az EUMENA régióban 91% megújuló alapú és 9% földgázalapú villamosenergia-termelés,
- a megújuló energia 48% onshore szélenergia, 5% offshore szélenergia, 16% CSP napenergia és 9% PV napenergia hasznosításból származik,
- az összekapcsolt rendszer tervét az 5.3. ábra mutatja, melynek alapja hét dél-észak irányú és egy dél-kelet irányú nagyfeszültségű egyenáramú (HVDC - High-Voltage Direct Current) vezeték, melyen évi 1100 TWh villamos energia folyna keresztül,
- az EUMENA régió villamosenergia-igényének 33%-át adják az észak-afrikai és közel-keleti területek, a fő exportőr a Magreb régió,
- részletes vizsgálat alapján a rendszerben résztvevő országok megújuló potenciáljukat és villamosenergia-felhasználásukat tekintve három kategóriába lesznek sorolhatók – szupertermelők (például Norvégia, Magreb), importőrök (például Németország, Olaszország, Franciaország, Törökország) és a kiegyenlített termelő-fogyasztó országok (például Egyiptom, Szaúd-Arábia, Szíria, Spanyolország, Egyesült Királyság, Dánia).



5.3. ábra. Az összekapcsolt EUMENA villamosenergia-rendszer

Az összekapcsolt rendszerben fontos kérdés a műszaki és politikai ellátásbiztonság. Az összekapcsolás műszakilag előnyös abból a szempontból, hogy az eltérő napi és évszakos meteorológiai paraméterek az EU és a MENA területén kiegyenlítetté tehetik a megújuló források energiatermelését. További előny lehet a diverzifikált import (a jelenlegi orosz földgázfüggőséggel szemben), ellenben a MENA több országának politikai stabilitása erőteljesen megkérdőjelezi a rendszer kiépíthetőségét és biztonságos fenntarthatóságát, legalábbis rövidtávon. [26]

5.3. Költségek

A Desert Power 2050 című tanulmány azt is körüljárja, hogy az összekapcsolt EUMENA villamosenergia-rendszer alternatívái a jövőben gazdaságilag és CO₂ kibocsátás terén hogyan állják meg helyüket, ennek részletes elemzése azonban túlmutat jelen dolgozat témáján. A tanulmányban leírtakból azonban fontos lehet kiemelni, hogy milyen beruházási költségekkel számolnak 2050-ig a fosszilis és a megújuló energiatermelés területén, ezt mutatja be az 5.1. táblázat. [26]

A táblázatban összefoglalt adatok alapján látszik, hogy a karbonmentes energiatermelésben hosszú távon reális szerepet jósolnak a sivatagi energiatermelésnek, hiszen olcsóbb, mint a konvencionális erőművek karbonmentesítése CCS technológiákkal. Természetesen az is látszik, hogy a szoláris technológiák beruházási költségeiben milyen óriási mértékű csökkenéssel számolnak (viszonyításképp a gazdasági megtérülések számításánál, illetve a megvalósult erőművek adatai alapján is a PV technológiák fajlagos beruházási költségei 2 000-2 500 €/kW körül, a CSP technológiák fajlagos beruházási költségei 6 000-7 000 €/kW pedig körül voltak).

5.1. táblázat. Erőművek beruházási költségei 2050-ben

Technológia	Beruházási költség, €/kW
Kombinált ciklusú földgázerőmű	750
Szénerőmű	1 450
Lignit erőmű	1 500
Kombinált ciklusú földgázerőmű CCS technológiával	1 500
Szénerőmű CCS technológiával	2 900
Lignit erőmű CCS technológiával	3 000
Atomerőmű	4 000
CSP naperőmű 8 óra kapacitású hőtároló alrendszerrel	2 000

PV naperőmű	800
On-shore szél	300
Off-shore szél	1 660

Fontos kérdés továbbá a szállítói hálózat kiépítése és a fellépő veszteségek mértéke, mely határozottan befolyásolhatja a költségeket. A nagyfeszültségű egyenáramú vezetékek vesztesége 4-5% ezer kilométerenként, szárazföldön és tenger alatt is létesíthetők. A műszaki megvalósíthatóságra példa a tengeralatti Szardíniát a szárazfölddel, illetve a Skandináviát Közép-Európával összekötő már üzemben lévő HVDC kábel. A német DESERTEC tanulmányok alapján a sivatagos területek naperőművei 2020-2030-ra fedezni tudják a gazdaságos termelést és szállítást is, vagyis a szállítóvezetékek kiépítése nem jelent akadályt a versenyképességben.

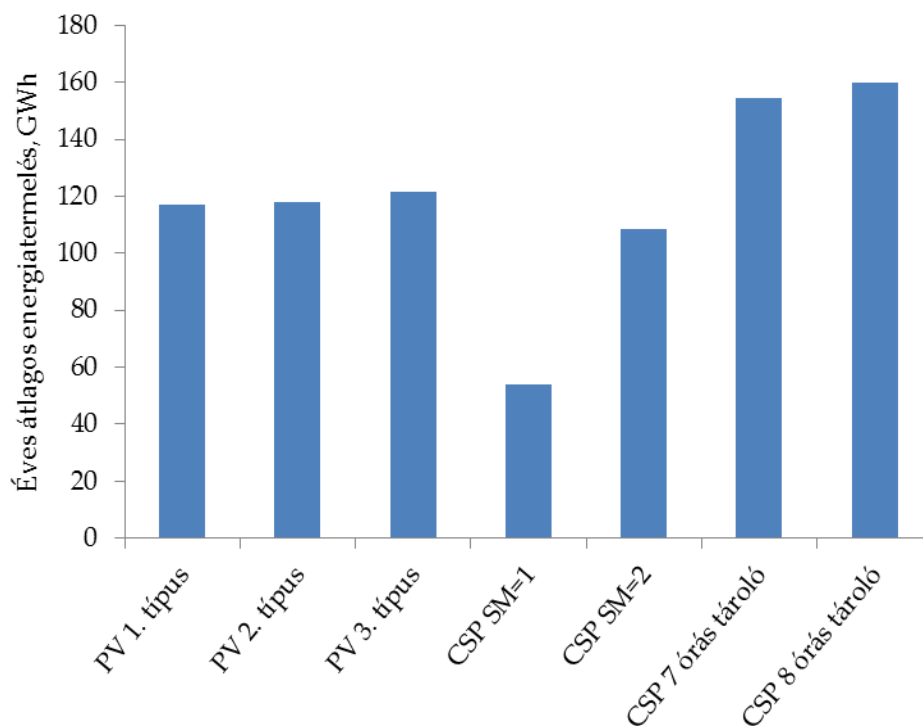
6. ÖSSZEFOGLALÁS

6.1. Eredmények

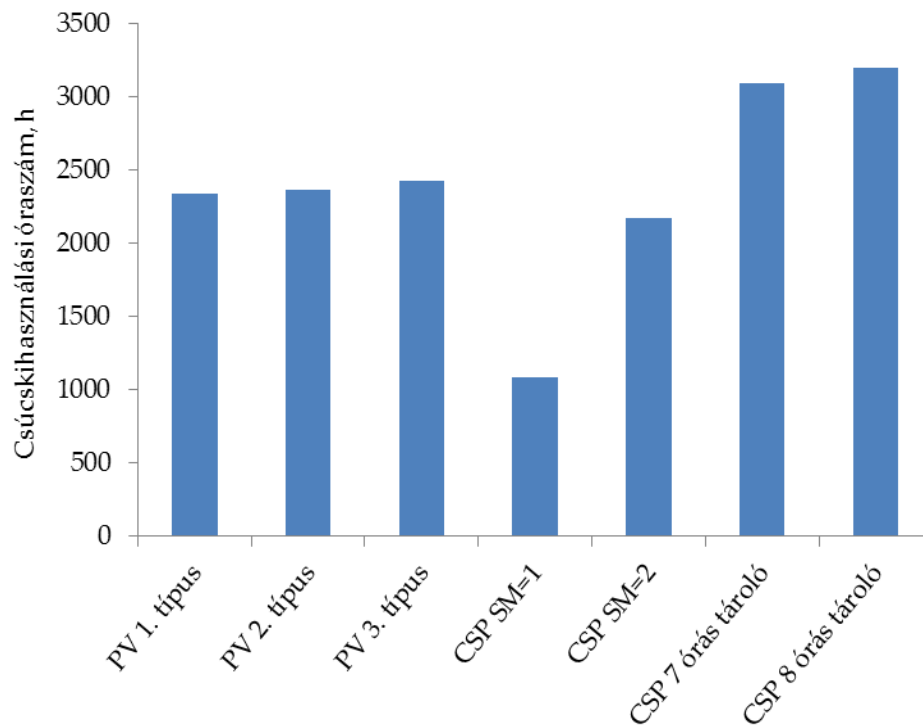
Dolgozatomban bemutattam a napelemek és a naphőerőművek különböző típusait, kiemelve ezek jellegzetességeit és előnyeit, hátrányait. Ezek után összehasonlítottam egy egyszerű közelítő számítással a két technológia területigényét. A hasonló földigények alapján a két technológia versenyképesnek bizonyult.

További összehasonlítást végeztem 50 MW_e beépített teljesítményű különböző fotovillamos erőművek és parabolavályús hőtároló nélküli illetve hőtárolóval rendelkező erőművekre. Összehasonlításom célja volt kiemelni a napelemek és a naphőerőművek éves és napi termelésének különbségeit, melyek alapján a jól megtervezett és megfelelő hőtárolóval rendelkező naphőerőművek könnyebb rendszerbe illeszthetőségét demonstráltam. Az elvégzett gazdaságossági számításokkal az erőműtípusok beruházási lehetőségeit vizsgáltam. Ugyan a naphőerőművek messze alul maradtak a gazdasági mutatóikkal, mégis érdemes a fejlesztési lehetőségeket figyelembe véve tovább vizsgálni a CSP erőművek realitását a világ energiamixében.

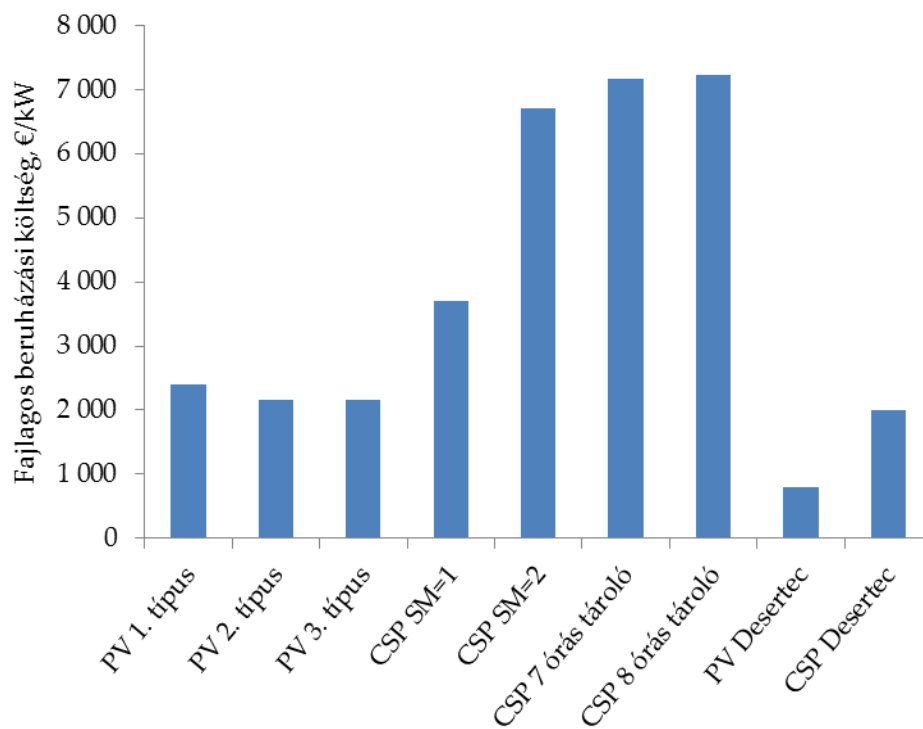
A vizsgált erőmű típusok éves átlagos energiatermelését a 6.1. ábra, a csúcskihasználási óraszámokat a 6.2. ábra és a fajlagos beruházási költségeket összevetve a DESERTEC 2050-es prognózisával a 6.3. ábra szemlélteti.



6.1. ábra. Éves átlagos energiatermelés a vizsgált erőműtípusokra



6.2. ábra. Csúskihasználási óraszám a vizsgált erőműtípusokra



6.3. ábra. Fajlagos beruházási költség a vizsgált erőműtípusokra

6.2. Tanulságok, javaslatok

Dolgozatom alapötletét a DESERTEC koncepció adta, témám továbbgondolási lépéseit is a koncepció ötleteinek, realitásának vizsgálatában látom. A naphőerőművek fejlesztése, gazdaságossága az Egyesült Államok és Kína mellett a MENA régió belépésével változhat mérvadóan, bár a 2050-re prognosztizált beruházási költség csökkenés mértéke erősen optimista.

Az összekapcsolt, megújuló energiahasznosításon alapuló terv megvan, de hogy is áll ma a DESERTEC koncepció, vannak-e lépések a napenergia és szélenergia optimális felhasználásának irányába?

A MENA régió 21 országában 2013 elejére megszülettek a 2030-ra előremutató megújuló energiapolitika célok, ebből a szél- és napenergia hasznosításra vonatkozó néhány példát foglalja össze az 6.1. táblázat.[27]

6.1. táblázat. A MENA régió megújuló energiapolitikai céljai 2030-ra

Ország	Napelem, MW	CSP naphőerőmű, MW	Szélerőmű, MW
Algéria	2 800	7 200	2 000
Egyiptom	700	2 800	-
Kuwait	3 500	1 100	3 100
Szaúd-Arábia	16 000	25 000	9 000
Marokkó		2 000	2 000
Tunézia	1 500	500	1 700
Jordánia	300	300	1 200

Ahogy a táblázatból is látszik, hosszútávon komoly kapacitások építését tervezik a régió országai, energiapolitikájuk mindemellett kiterjed a villamos hálózatok országok és kontinensek közti kiépítésére is (elsősorban állami vállalatok feladata lesz a biztonságos hálózat kiépítése). A MENA országai közül több is úttörő szerepet tölt be a megújuló projektek megvalósításában:

- Tunéziában 2 GW kapacitású TuNur naphőerőmű építését kezdik 2014-ben (export Olaszországba 2016-tól),
- Marokkóban már megkezdődött az összesen 500 MW kapacitású Ouarzazate naperőműpark kiépítése (400 MW naphőerőmű, 100 MW napcella), az első 125 MW teljesítményű részt 2014 júniusában tervezik üzembe helyezni, az exportot a már meglévő Marokkó- Gibraltár-Spanyolország hálózaton tervezik megvalósítani,

- Szaúd-Arábia célja a legambiciózusabb: 25 GW kapacitású CSP erőműpark, valamint 16 GW kapacitású fotovoltaiikus naperőműpark kialakítása 2032-ig, elsősorban saját tengervíz sótalanításukra összpontosítva, kezdő lépéseként 2013 első negyedévében meghirdették tendereiket a minimum 5 MW-os projektekre,
- az Egyesült Arab Emírségekben megépült a 100 MW kapacitású Shams 1 parabolavályús naphőerőművet 2013. március 17-én helyezték üzembe.

Ahogy a fenti példák is mutatják a DESERTEC koncepció a MENA régió céljait tekintve reális lehet és ahogy egyre több üzleti partner találja meg benne a potenciális lehetőséget (erre egy példa a sivatagi viszonyokra gyártott Siemens gőzturbinák), úgy várható a kitűzött célok megvalósítása. A hosszútávú szén-dioxid-mentes energiatermelésnek pedig tényleg egy meghatározó szeletét jelentheti majd a sivatagos területeken termelt várhatóan biztonságos és gazdaságos megújuló energia.

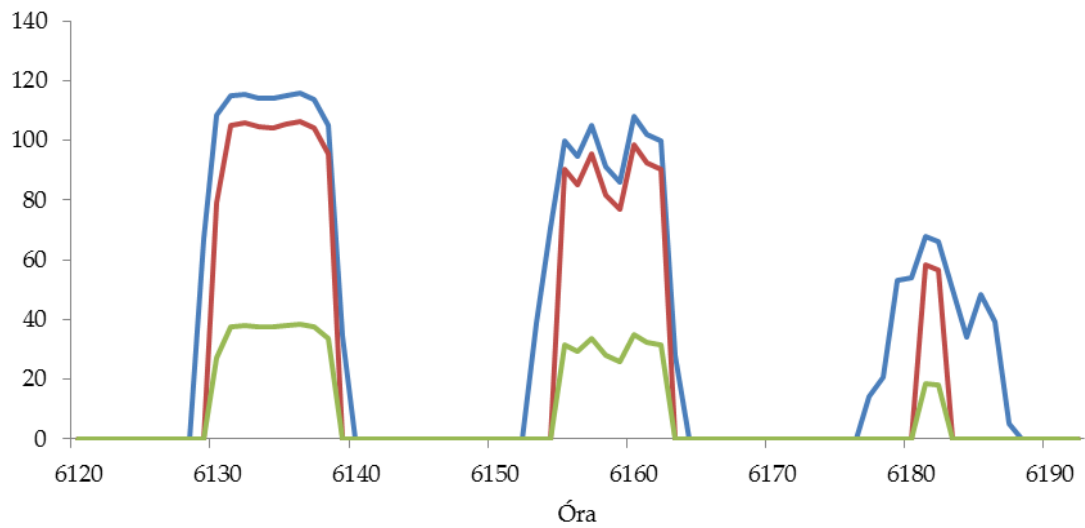
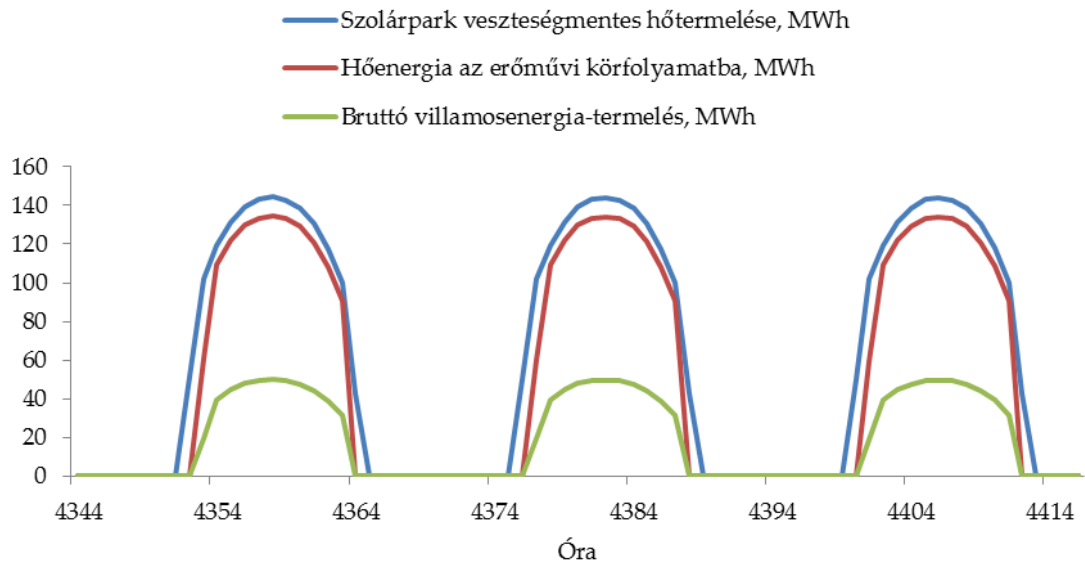
7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

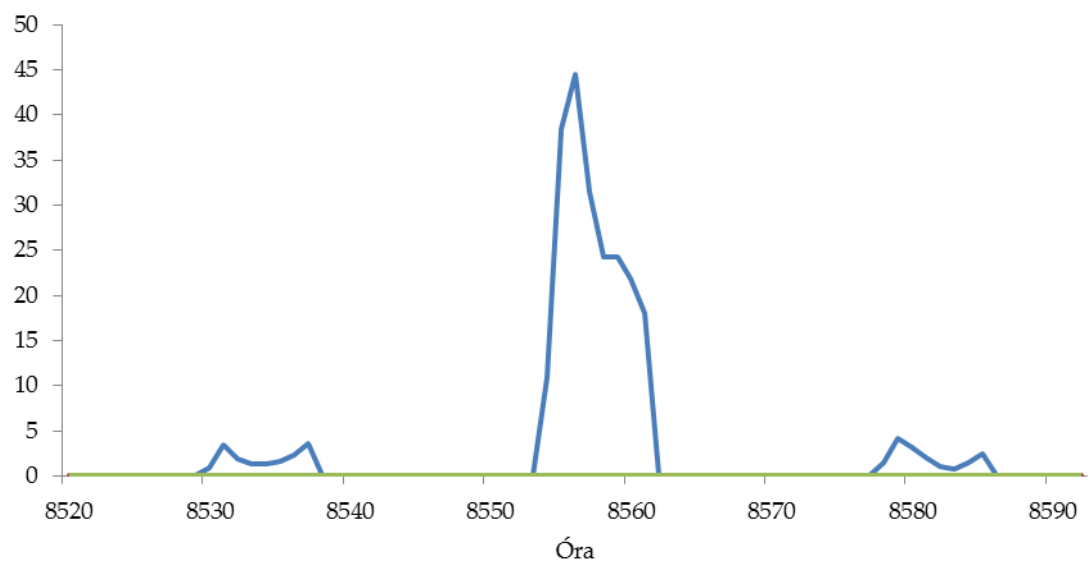
- [1] International Energy Agency (2010): *Tecnology Roadmap – Concentrated Solar Power*
- [2] N. Schlager, - J. Weisblatt szerk. (2006): *Alternative Energy*. Thomson Gale., China
- [3] K. Heinloth szerk. (2006): *Energy Technologies. Subvolume C: Renewable Energy*. Springer, New York
- [4] <http://napelem.net>
- [5] <http://ujenergiak.hu/>
- [6] System Advisor Model Version 2013.9.20 (SAM 2013.9.20). National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. Accessed October 16, 2013. <https://sam.nrel.gov/content/downloads>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations
- [8] W. B. Stine - M. Geyer: (2011): *Power From The Sun*. <http://www.powerfromthesun.net/book.html>
- [9] Dr. Gács Iván (2012): *Naphőerőművek*. Magyar Energetika, XIX. évfolyam 4. szám, 2012
- [10] <http://www.solaripedia.com/>
- [11] R. Abbas - M.J. Montes - M. Piera -J.M. Martínez-Val (2011): *Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays*. Energy Conversion and Management 54 (2012) p. 133–144
- [12] <http://www.novatecsolar.com>
- [13] <http://www.nrel.gov/csp/>
- [14] Tomjanovich Gergő (2010): *Magyarországi napsugárzási viszonyokra alkalmas naperőmű konstrukciók*. Szakdolgozat. BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
- [15] Bihari P. szerk. (2002): *Erőművek*. Oktatási segédanyag
- [16] Hegyfalvi Csilla (2010): *ORC kiserőmű telepítése a FŐTÁV Zrt. Észak-Budai Fűtőművébe*. Szakdolgozat. BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
- [17] Umberto Desideri, Pietro Elia Campana (2014): *Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant*. Applied Energy, Volume 113, January 2014, Pages 422–433
- [18] <http://www.panenerg.hu/szakmai-hirek/egyre-olcsobb-a-napsutes---komoly-valtozasok-az-europai-napenergia-piacon>
- [19] <http://megujulok-maskent.blog.hu/2013/02/17/spanyolnapboom>

- [20] https://docs.google.com/spreadsheet/ccc?key=0AgY4u9DZZBEudGI4akIwVEh0SEdBMTlwWHkwZHZsSVE&usp=drive_web#gid=0
- [21] M.J. Montes, A. Abánades, J.M. Martínez-Val, M. Valdés (2009): *Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors*. Solar Energy, Volume 83, Issue 12, December 2009, Pages 2165–2176
- [22] https://docs.google.com/spreadsheet/ccc?key=0AgY4u9DZZBEudGVoczUwS3FIOUR5SHN4UnRmUlZ1TEE&usp=drive_web#gid=0
- [23] <http://www.desertec.org/>
- [24] <http://www.dii-eumena.com/>
- [25] http://www.booz.com/media/file/A_New_Source_of_Power-FINAL.pdf
- [26] Florian Zickfeld, Aglaia Wieland: *Desert Power 2050 - Perspectives on a Sustainable Power System for EUMENA*. Dii GmbH, 2012
- [27] <http://www.ren21.net/>

8. MELLÉKLETEK

SM=1





SM=2

