Dr. Szodrai Ferenc

Megújuló energiaforrásokat hasznosító rendszerek

egyetemi jegyzet

Debreceni Egyetem Műszaki Kar
Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék

DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI
ÉS LÉTESÍTMÉNYMÉRNÖKI TANSZÉK

Dr. Szodrai Ferenc

MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOKAT HASZNOSÍTÓ RENDSZEREK

Egyetemi jegyzet

Debreceni Egyetemi Kiadó
Debrecen University Press
2023

Lektor:
Dr. Gabnai Zoltán

© Debreceni Egyetemi Kiadó Debrecen University Press, beleértve
az egyetemi hálózaton belüli elektronikus terjesztés jogát is

ISBN 978-963-615-117-1 (pdf)

Kiadta: a Debreceni Egyetemi Kiadó Debrecen University Press
Felelős kiadó: Karácsony Gyöngyi
Nyomdai előkészítés: M. Szabó Monika
dupress.unideb.hu
Készült a Debreceni Egyetemi Kiadó nyomdájában, 2023-ban

Tartalom

1. Bevezetés ... 6
1.1. Primer energiaforrások ... 7
1.2. Energetikai mérőszámok ... 7
1.3. Redundancia ... 9
1.4. Hálózatba kötött rendszerek ... 9
1.5. Szigetüzemű rendszerek ... 10
2. Szélenergia ... 11
2.1. A szélenergia-potenciál ... 11
2.1.1. Szélirány ... 11
2.1.2. Szélsebesség ... 11
2.1.3. Áramlást befolyásoló tényezők ... 12
2.1.4. A Weibull-diagram ... 14
2.1.5. Energiapotenciál vizsgálata ... 14
2.2. Szélturbinák ... 15
2.2.1. A szélturbina teljesítménye ... 15
2.2.2. A szélturbina teljesítménytényezője ... 17
2.2.3. Nyomatéktényező ... 19
2.2.4. Gyorsjárású turbinák ... 21
2.2.5. Lassújárású turbinák ... 22
2.2.6. Függőleges és vízszintes tengelyű turbinák ... 23
2.2.7. Szélturbinaparkok ... 24
2.3. Vízenergia ... 25
3. Napenergia ... 26
3.1. A napsugárzás intenzitása ... 26
3.2. Napszögek ... 29
3.3. Panel elhelyezése ... 31
4. Napelemek ... 33
4.1. A hatásfok ... 33
4.2. Kristályos napelemek ... 34

4.3. Vékonyrétegű napelemek ... 34
4.4. Napelemes rendszerek ... 35
4.4.1. A napelemek száma ... 35
5. Napkollektorok ... 36
5.1. Abszorberes kollektorok ... 36
5.2. Síkkollektorok ... 37
5.3. Vákuumcsöves kollektorok ... 39
5.4. További kollektorok ... 40
5.5. Napkollektoros rendszerek ... 41
5.5.1. A hőenergia-hasznosító felület ... 41
5.5.2. Az energiatároló ... 43
5.5.3. A folyadék ... 44
5.5.4. A hálózat ... 44
5.6. A szoláris részarány ... 47
6. Földhő ... 48
6.1. Anyagjellemzők ... 51
6.2. A fluidum hőhasznosítása ... 52
6.3. A geotermális rendszer ... 53
6.3.1. Termelés ... 54
6.3.2. Gáztalanítás ... 55
6.3.3. Visszasajtolás ... 56
6.4. Geotermikus rendszerek ... 57
6.4.1. Talajszonda ... 57
6.4.2. Talajkollektor ... 58
7. Biomassza ... 59
7.1. Szilárd tüzelőanyagok ... 59
7.1.1. A fa égése ... 59
7.1.2. Az égést befolyásoló tényezők ... 60
7.1.3. Fűtőérték ... 61
7.1.4. Termelődés ... 62

7.1.5. Tüzelőanyag-típusok 62
7.1.6. A tüzelőanyag ára 63
7.1. Biomassza hőtermelők 64
7.1.1. Vegyestüzelésű kazánok 64
7.1.2. Faelgázosító kazánok 64
7.1.3. Pellet- és faapríték kazánok 65
7.1.4. Az energiatárolás 65
8. Felhasznált irodalom 66

1. Bevezetés

A jegyzet célja a Létesítménymérnöki MSc szak hallgatói számára a Megújuló energiaforrásokat hasznosító rendszerek című tantárgyhoz ismertetés összeállítása, melyben főképp fogalmakat, általános összefüggéseket gyűjtöttem össze. A fejezetekben jelölt irodalmak bővebb tanulmányozása átfogó és részletesebb tudást adhat. A jegyzetben törekedtem tömör ismertetést adni valamely létesítmény körül alkalmazható megújuló energiaforrást felhasználó rendszerek primer oldali kialakításáról és azok fizikai hátteréről. Nem volt szándékom a létesítmény teljesítményigényénél nagyobb teljesítményű rendszereket ismertetni, mivel azok már önálló erőműveknek tekinthetők.

A tárgy indokoltságáról és fontosságáról leginkább az Energiewende program tanúskodik. Az Energiewende program a Németország által tervezett átmenet az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, környezetbarát, megbízható és megfizethető energiaellátás érdekében. Az új rendszer nagymértékben támaszkodik a megújuló energiaforrásokra (ezek között különösen a szél-, a fotovoltaikus és a vízenergia), az energiahatékonyságra és az energia-gazdálkodásra. Célja, hogy ha nem is mind, de a legtöbb meglévő széntüzelésre alapozott áramtermelést meg kell szüntetni. A program kulcsfontosságú része a német nukleáris reaktorflotta 2022-es megszüntetése, az üvegházhatást okozó gázok (GHG) 80-95%-os csökkentése 2050-re (1990-hez viszonyítva) és 60%-os megújuló energiaforrás részarány 2050-ig. Erre a német állam 1500 Mrd eurót különített el, ezzel a megújuló energiaforrások használatát támogatva. [1]–[3]

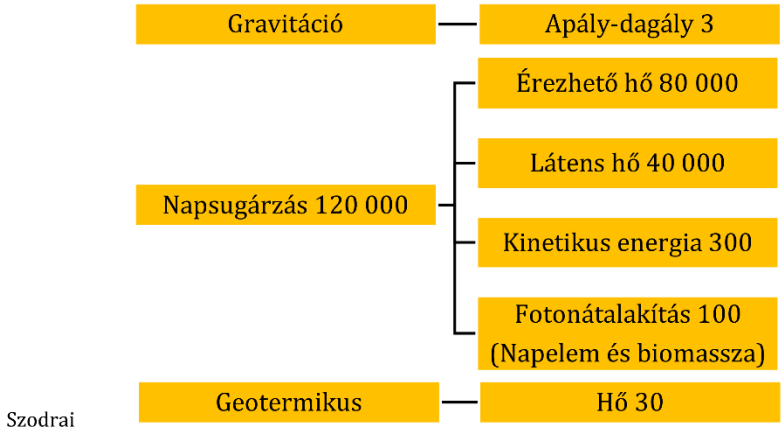
A jegyzet írása közben számos szakirodalmat jelöltem, viszont az irodalomjegyék előtt kiemelném az 1.1.-es táblázatban a témakörönként megjelölt jelentősebb irodalmakat.

1.1. táblázat. Főbb irodalmak

Általános energetika	Twidell és Weir 2015
Szélenergia	Twidell és Weir 2015
Napelemek	Planning and Installing Photovoltaic Systems 2008
Kollektorok	Naplopó 2008
Földhő	Banks 2012; Magyarország geotermikus felmérése 2016; Kalmár 2010 és 2011
Biomassza	Bai és Lakner 2015

1.1.Primer energiaforrások

Elsődleges, átalakítás nélküli (primer) energiaforrás lehet: a Nap elektromágneses sugárzása és az ebből közvetetten kialakuló energia; a Hold és a Föld mozgásából adódó vízszintváltozás; geotermikus energia a Föld belső hűléséből adódóan; nukleáris és kémiai reakciók. Ez az energia lehet hő, kinetikus, potenciál, illetve belső energia, amit a hasznosító rendszer vagy hő-, vagy villamos energiává alakít. A megújuló energiaforrás gyűjtőfogalom. A megújuló energiaforrás a természetben előforduló, természetesen ismétlődő és tartós energia forrása. A megújuló energiaforrás addig tekinthető megújulónak, míg az azt hasznosító rendszer üzemeltetése alatt a megújult energia mennyisége nagyobb mértékű, mint a vételezett energia.
Az 1.1. ábra alapján látható, hogy a legfőbb energiaforrás a Nap, ennek az energiának nagy részét a Földön látens és érezhető hőként hasznosítjuk passzív módon. Ennek szinte elenyésző, 0,3-0,4%-át tudnánk aktív rendszerekkel hasznosítani.



1.1. ábra. Megújuló energiaforrások eloszlása (egy egység 10^{12} W)

1.2. Energetikai mérőszámok

Az energiahasznosító berendezéseket különböző mérőszámokkal lehet jellemezni. Beépített teljesítmény ($\dot{P}_B$) [W] („kapacitás” -ként is ismeretes) az energiatermelő berendezés tervezésekor meghatározott névleges teljesítmény, ez elméleti érték. A csúcsteljesítmény ($\dot{P}_p$) [Wp] a berendezés alkalmazási helyén elérhető legnagyobb teljesítmény, ami már mért érték. A névleges teljesítmény ($\dot{P}_N$) [W] pedig egy vizsgált időszakban a pillanatnyi teljesítményeinek átlaga. A berendezések gazdaságossági számításánál a névleges teljesítmény ajánlott, mivel ez adott időszakra vonatkoztatott

átlag. A termelt energia úgy számolható, ha tudjuk, mennyi a névleges terhelésen működő időtartam (T_N) [h·év^{-1}], a termelt éves energia és a beépített teljesítmény hányadosa. Ennek a tényezőnek a százalékos értéke a kihasználtsági tényező (Z) [%], ami megadja, hogy az év hány százalékában működött névleges terhelésen az energiatermelő berendezés. Magyarországon ez az érték szolárrendszerek esetén körülbelül 12% ±2%, míg szélenergia-hasznosító rendszereknél körülbelül 25% ±5%.
A hatásfok energetikailag a hasznos és a befektetett teljesítmény hányadosa, gazdaságilag viszont mivel a legtöbb megújuló energiaforrás ingyenes, ezért nehezen értelmezhető. Így megújuló forrást hasznosító rendszernek a leginkább használható mérőszáma a fajlagos energiaár (c_M) [Ft·kWh^{-1}], ami a rendszer élettartama alatt felmerülő összes költség és a rendszer élettartama alatt termelt összes energia hányadosa. A rendszer élettartamát az egyes alkatrészek jótállási időtartama adhatja meg, hogy hány évente szükséges cserélni az adott berendezést. Feltételezve, hogy a legüzembiztosabb berendezést is 20-25 évente cserélni szükséges. Természetesen, ha ennél tovább működik a berendezés, a tervezettnél kedvezőbb értékeket fogunk kapni.
Létesítményeknél fontos, hogy az energiatermelő rendszer minél kevesebb helyet foglaljon, illetve minél kevesebb helyen minél több energiát termeljen. Így beszélhetünk bruttó és nettó fajlagos teljesítményekről. A bruttó fajlagos teljesítménynél a nevező a rendszer alapterülete (A_R) [m^2], ami megadja, mekkora felület szükséges, hogy az adott telken kiépíthessük a teljes megújuló energiaforrást hasznosító rendszert. A nettó fajlagos teljesítménynél a nevező az energiahasznosító felület (A_E) [m^2], ami a rendszer azon része, ahol a megújuló energiaforrásból az energiát „begyűjti". Ez a felülethasznosítás módjaiként más és más értéket vesz fel. Geotermikus és szolárenergiát hasznosító rendszereknél az abszorber a hasznos felület; geotermális energiánál és szilárd tüzelésnél a primer oldallal érintkező hőcserélő; szél- és vízenergia-forrásnál a lapáttal súrolt felület. A megújulóenergia-potenciál megmutatja, hogy egységnyi felületen hány kW-nyi teljesítmény hasznosítható adott típusú megújulóenergia-hordozóból.
A szélenergia-potenciál a létesítmény körül éves időszakban összegzett dinamikus nyomás értéke. A szolárenergia-potenciál a létesítmény körül beérkező éves sugárzásmennyiség. A geotermikus és geotermális rendszernél a kitermelés közelében lévő készlet hőtartalma. A biomassza-potenciál az éves hektáronkénti termelődő biomassza égéshője.

1.3. Redundancia

A sötét szélcsend (németül: Dunkelflaute) olyan időszakot jelöl, amikor sötét és szélcsend van, ekkor a megújuló energiaforrásokat hasznosító rendszerek alig vagy nem termelnek. Németországban évente körülbelül 600 óra Dunkelflaute van. 2017. január 16–25. között Németországban köd és szélcsend volt. Az erőművek 91 GW-ból 4,6 GW-ot termeltek, miközben az igény 63,1 GW volt [4]. Emiatt globális és lokális szinten is a megújulóenergia-forrás csak más alternatív forrásokkal lehet „redundáns".
Az energiatermelő rendszereket a redundancia szempontjából és a termelt energia szempontjából csoportosíthatjuk. Redundáns rendszer az, amikor az egyik energiatermelő megszűnése esetén az energiaigény más forrásból fedezhető. Ez olyan esetekben lehet, ha a kiválasztott rendszer egy hálózat része, vagy a kiválasztott rendszerben vannak alternatív energiatermelők. Az ilyen rendszerek jellemzően azok, amelyeknél valamilyen azonos típusú energiát termelő berendezéseket kombinálunk. A redundancia fontos az üzembiztonság miatt, illetve, ha egyidejűleg több alkalmazott energiaforrás változik. Több energiaforrás esetén továbbá kiválasztható a leggazdaságosabban termelő forrás is.
Nem redundáns energiatermelő rendszernél, ha az energiaforrás megszűnik, a rendszer működése bizonyos idő után leáll. Jellemzően ilyen rendszerek a biomassza vagy geotermikus alapú fűtési rendszerek vagy a szigetüzemű villamos energiát termelő rendszerek.

1.4. Hálózatba kötött rendszerek

A berendezés által termelt áram közvetlenül a hálózatra megy, hiány esetén a szükséges árammennyiség a szolgáltatótól vásárolható. Az önellátás megoldható, amennyiben különböző típusú rendszer termel energiát, ekkor az energiatermelés redundáns. A háztartási kiserőművek villamos felső teljesítményhatára 50 kVA.
A szaldó elszámolás esetén egy éven belül a rendszerünk által megtermelt energia, valamint a szolgáltatótól vételezett energia különbségét veszi az áramkereskedőnk, így a szolgáltató hálózata, mint akkumulátortelep energiatárolóként is működik számunkra, a megtermelt és általunk fel nem használt energia és a többletfelhasználás kiegyenlítődik.
A közműhálózathoz való csatlakozáskor mindenképpen szükséges inverter, az akkumulátor azonban ekkor megspórolható. A napelemek és a szélturbinák egyenáramot állítanak elő, ezt az inverter a hálózatba táplálásra alkalmas 230 V/50 Hz-es váltóárammá alakítja. Az inverterek méretezése feszültségtartományra történik. A méretezést úgy kell

elvégezni, hogy az inverter –15 °C és 70 °C-os környezetben is megfelelően tudjon működni. Az inverterekben az átalakítási veszteség kicsi, optimális esetben a termelő maximális teljesítménytartományában kell működnie.
Kialakítástól függően lehetnek az egész termelő rendszerhez csatlakozó központi inverterek, egy termelői kört átalakító string inverterek, minden egyes modulhoz tartozhat egy külön modulinverter. Az invertert lehetőleg hűvös, száraz, pormentes belső térben kell elhelyezni, például a villanyóra közelében. A túlmelegedés megelőzése miatt fontos a jó szellőzés.
Hőhasznosító rendszereknél a távhő tekinthető hálózatba kötött rendszernek, mivel a hőtermelés nem közvetlenül a felhasználás helyén van. Továbbá kivételes esetekben akár visszatermelés is megoldható. A vezetékhálózat nagy hőveszteség miatt így a távhő rendszer nagysága néhány kilométerre korlátozódik, így lokális léptékben működhet gazdaságosan.

1.5. Szigetüzemű rendszerek

Szigetüzemű rendszer esetén a redundancia növelése lényeges, energiatároló vagy alternatív energiaforrás alkalmazásával megoldható. Különböző energiaforrások esetén hibrid rendszerről beszélünk. Az energiatárolás célja általánosan az, hogy legalább egy napra tudja biztosítani az energiát.
Villamosenergia-termelés esetén az energiatárolást lítiumakkumulátorral lehet megoldani, mely több töltést-ürítést enged meg. Alternatív energiaforrás pedig napelem, szélturbina vagy egyéb villamos generátorral megoldható.
Hőtermelés esetén puffertárolóval lehet megoldani az energiatárolást, ahol a tárolóban lévő folyadékot a megengedett hőmérsékletig fel lehet fűteni. Fűtési rendszereknél az alternatív energiaforrás lehet biomassza tüzelésű hőtermelő, napkollektor, hőszivattyú vagy termálvíz, míg nem megújuló hőtermelő a gyakorlatban gázkazán lehet.

2. Szélenergia

2.1. A szélenergia-potenciál

A Föld sugara kb. 6371 km. A légkör a felszín körül nagyon „vékony”, időjárási jelenségeink csupán 11 km magasságig terjedő troposzférában történnek. Az 1000 m feletti légmozgásokat geosztrofikus szeleknek nevezzük. A légkörben létrejövő mozgások sebességvektora bármilyen időpontban felbontható egy függőleges és egy vízszintes komponensre, a vízszintes komponens a szél. A szél is vektormennyiség, irányával, nagyságával és időbeli gyakoriságával határozhatjuk meg.

2.1.1. Szélirány

A szélirány a szél mozgási irányának vízszintes vetülete (égtáj, fok). A légkör felső rétegeiben, olyan magasságokban, ahol már nem érvényesül a földfelszín és a légtömegek közötti súrlódási erő, geosztrofikus szélrendszerek uralkodnak. Jellemzőjük, hogy a szélrendszerek iránya viszonylag állandó és a sebességük csak a magasság függvényében nő. A szélrendszerek mozgása általában az izobárokkal párhuzamos.
A felszín közelében a földfelszín érdessége miatt az áramlás turbulens jellegű. A földfelszín közelében az áramlást befolyásoló tényezők nagy hatással vannak a szél irányára. A pillanatnyi szélirány meghatározása műszakilag megoldható, viszont akár 10 éves időtartamú, 15 perces lebontásokban meghatározott szélirányok ismeretében sem szabad levonni pontos következtetéseket a szél irányával kapcsolatosan.

2.1.2. Szélsebesség

A szélsebesség egy adott földrajzi és időbeli ponton a magasság függvényében más és más értékeket vehet fel. Ez a sebességérték a pillanatnyi szélsebesség, amit közvetetten vagy közvetlenül lehet mérni. Közvetett módszerrel a légtechnikában használatos berendezésekkel mérhetünk, ezek hátránya, hogy csak egy bizonyos irányban mérik a szélsebességet, továbbá egyes típusok bizonyos hőmérséklet-tartományban adnak kalibrált értékeket, ezért nem igazán javasolt. Szélsebességmérésre közvetlen módszernél a forgókanalas anemométer bizonyul a legalkalmasabbnak. A közvetett elven alapuló értékekre az OMSZ és repülőterek, illetve egyéb meteorológiai mérőállomás naplózott pillanatnyi sebesség-adatbázisából lehet hozzájutni. Ezek az adatok azonban általában egy magasságra vannak meghatározva. Azonban ismerve az adott tájegység

érdességét, a Hellman-függvény segítségével különféle magasságokra extrapolálhatók a sebességértékek.
A Hellman-függvény megadja, hogy semleges atmoszferikus stabilitási állapot (amikor állandósult, rétegződött a hőmérséklet) mellett adott h_1 magasságban mért v_1 pillanatnyi sebesség mellett mekkora a v_2 sebesség h_2 magasságban, ha ismerjük a Hellman-féle kitevőt (α).

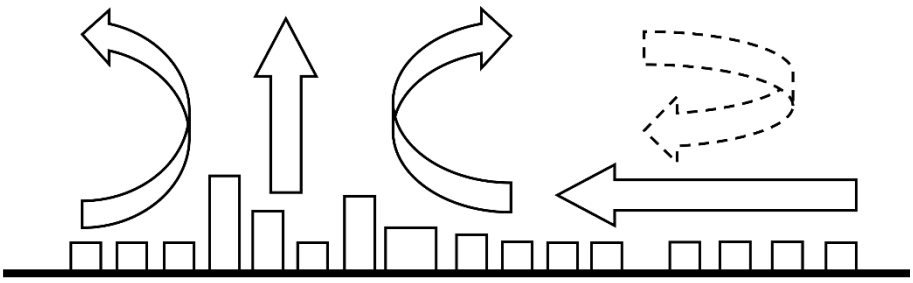
$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\alpha} \tag{2.1}$$

A Hellman-féle kitevő (α) dinamikus paraméter, a napszak, az évszak, a hőmérséklet, a szélsebesség is befolyásolja. Tehát ezt a tényezőt több méréssel viszonylag pontosan megbecsülhetjük.
Az érdességi magasság az a magasság, ahol az átlag szélsebesség lecsökken 0 $m \cdot s^{-1}$-ra. Az érdességi magasság vertikális helyzetét a földfelszíntől a felületi érdesség határozza meg. Ez az érték a vízfelszín közelében alacsony, sűrűn beépített városrészeken felveheti az épületek magasságát is. Tehát ez jelentheti azt, hogy sűrűn beépített épületek között valószínűsíthető a gyakori szélcsend.
A Nagy-Alföld szélrajzáról általánosan elmondható, hogy nem lehet meghatározni egyetlen uralkodó szélirányt. A szélmozgásokat erőteljesen befolyásolják a kontinensen egymást váltó ciklonok és anticiklonok. A ciklonok és anticiklonok által kialakult légmozgásokra jellemző, hogy erejük és irányuk is igen változékony. Az átlagos szélsebesség a Nagy-Alföld egész területén mérsékelt, körülbelül 3-3,5 $m \cdot s^{-1}$ körül ingadozik [5].

2.1.3. Áramlást befolyásoló tényezők

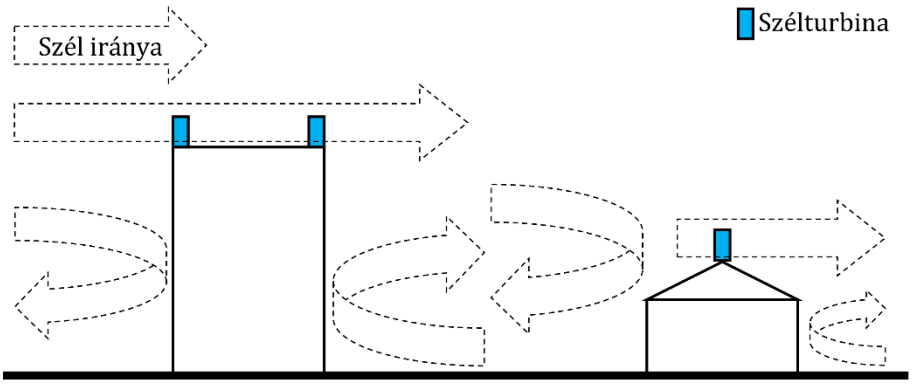
Az áramlást befolyásoló tényezők a földfelszín érdessége és a légellenállás. A számunkra releváns légellenállások a szélturbinák és a létesítmények, mivel közvetlenül mögöttük rendkívüli módon lassul a szélsebesség. A mértékének a csökkentését a test porozitásának növelésével lehet elérni, ha műszakilag lehetséges.
A város felszínének tagoltságából és érdességéből adódóan az érdességi magasság magasabban van, továbbá a szélsebesség alacsonyabb, viszont egyedi szélmozgások tudnak kialakulni. Magas házakkal övezett utak felett felgyorsult légáramlás jöhet létre. Továbbá, ha nincs külső befolyásoló légáramlat, akkor a sűrűbben lakott területeken feláramlás jöhet létre, amely hűtő légáramot indít be a város központja felé. A hőmérséklet-különbség megszűnésével az áramlás leáll, ezért újra megteremti egy újabb légmozgás feltételeit. [6]
Ebből következően a városközponton kívüli területeken állandó, napközben viszonylag tartós légáramlat jöhet létre. Ennek a légáramnak az útját a 2.1-es ábra szemlélteti. Ezek a légáramok termokonvekció útján jönnek létre,

mely jellemzője az alacsony légsebesség. Bár ez a városi szélhatás kedvező, de nem feltétlenül jelentős.
A városközeli, létesítményszintű szélenergia-felhasználás több kihívást is állít a kialakítandó rendszer elé. A lehető leghatékonyabbnak kell lennie, mivel méretének növelése rontja a rendszer integrálhatóságát. A turbina biztonságtechnikai és akusztikailag előnyös kidolgozása kiemelten fontos a lakosság közelsége miatt [7].



Szodrai

2.1. ábra. A városi hősziget által keltett cirkuláció vázlata [6]



Szodrai

2.2. ábra. Nagy teljesítményű szélturbina kedvező elhelyezése

A városias környezetből kiemelkedő épületek felett kedvező szélviszonyok alakulhatnak ki, melyek növelhetik a szélenergia-potenciált, ahogy a 2.2 ábra mutatja. Az épület felső élénél az áramvonalak sűrűsödnek, így a sebesség is nagyobb, viszont az épület szélvédett helyén a szélsebesség jóval kisebb, ezeken a területeken a potenciál is alacsony.

A szélturbina tetőre építésénél a tetőgerinctől 3 m-nél nem lehet magasabban a lapát legfelső pontja. Árbócra való telepítésnél a maximális tengelymagasság számít, ami 9 m. Ezt középen és fent is 4-4 pontra kikötve kell elhelyezni. A generátor (árbóc) nem lehet a telekhatárhoz 5 m-nél közelebb. Tehát sok esetben a városias környezetben a szélturbinák lapátjai az érdességi magassághoz közel helyezkednek el.

2.1.4. A Weibull-diagram

A relatív szélsebesség-gyakoriság egy adott szélsebesség (tartomány) mért vagy számított előfordulása, vagy annak valószínűsége.
A szélsebesség a föld felszíne közelében rendkívül változó, és az is, hogy az egyes sebességek milyen gyakran fordulnak elő. A szélsebességet és annak gyakoriságát összegezhetjük, a kapott értékre pedig függvényt illeszthetünk. A szélenergetikával kapcsolatos szakirodalmak sok esetben a Weibull-eloszlás sűrűségfüggvényével közelítik az egyes szélsebességek előfordulásának gyakoriságát.

$$f(v) = \kappa \cdot \lambda^{-1} \cdot v^{\kappa - 1} \cdot \lambda^{-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^{\kappa}} \qquad (2.2)$$

ahol:

f (v; κ; λ) [%] a valószínűsége a szélsebességnek. A függvénynél kikötés, hogy a gyakoriság csak pozitív számot vehet fel
v [m·s^{-1}] a szélsebesség
κ [%] a függvény alakját módosító paraméter, ez a szél gyakoriságára utal
λ [m·s^{-1}] a függvény léptékét meghatározó érték, az átlagos szélsebességre utal.

A függvény segítségével meghatározható, hogy egy év hány százalékában fúj a szél egy adott érték alatt.

2.1.5. Energiapotenciál vizsgálata

Energetikai hasznosításra ugyanakkor csupán a felszín feletti kb. 150-200 m magasságig terjedő légrétegek mozgásai jönnek számításba, melyeket a domborzat és a tereptárgyak akadályozó hatásai nagymértékben befolyásolnak!
A széleloszlást becslő sűrűségfüggvény segítségével kiszámolható a teljes vizsgált időszak alatt egységnyi felületen a szél potenciális munkavégző képessége. Az energiakinyerésre optimalizált szélturbina kiválasztásánál a cél, hogy olyan hatásfokgörbével rendelkező turbinát válasszunk, hogy a lehető legnagyobb területet fedje le a szél potenciális munkájának görbe alatti területéből. Az optimalizált kialakítás következménye, hogy az adott

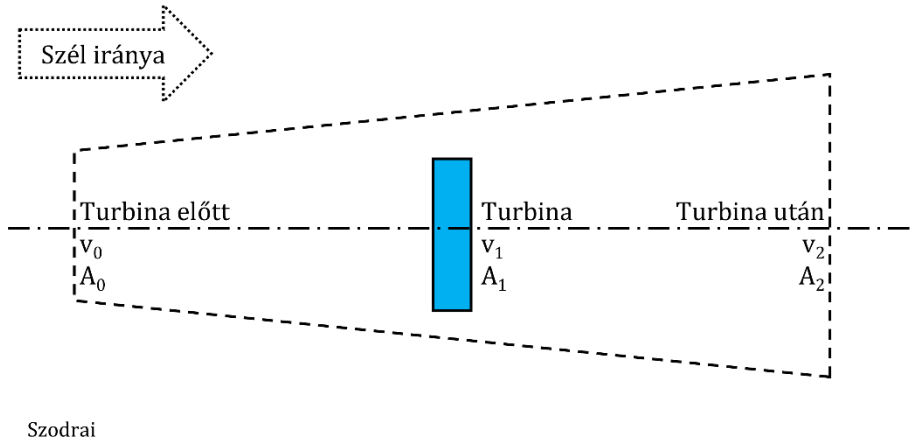
szélviszonyok mellett a vizsgált időszak egy jelentős részében a turbina nem, vagy csak rossz hatékonysággal termel energiát.
Tehát a maximum energia kinyerése és az egyenletes termelési görbe célja nincs összhangban. Itt a kiszolgálandó létesítmény tulajdonságai határozzák meg azt, mennyiben tér el a tervezett szélturbina az energetikailag optimálistól.

2.2. Szélturbinák

A szélenergiát hasznosító eszközöknek nincs egységes elnevezése. Kerülendő elnevezések: szélenergia-konverter (szélenergia-átalakító); szélgép (szélcsatornában, stúdióban); szélkerék (kisebb eszköz); szélmotor (mechanikai energiát termel); szélerőgép (mechanikai, ritkán villamos energia). Használható elnevezések: szélgenerátor (villamos energia); szélturbina (villamos energia); szélerőmű (villamos energia).

2.2.1. A szélturbina teljesítménye

A szélturbinák a szél kinetikus energiáját alakítják át, amivel egy tengelyt meg tudnak forgatni. Ezután a fordulatszám és nyomaték függvényében ez az energia tovább hasznosítható. Az összes, kinetikus energia kinyerésén alapuló szélturbinát az alábbi vázlat alapján szemléltethetjük. A turbina mozgatásával az áramlási térben a v_0 szélsebességet v_2-re lassítja.



Szodrai

2.3. ábra. A szélturbina működési vázlata

Turbinalapátozásra ható erő:

$$F = \dot{m} \cdot v_0 - \dot{m} \cdot v_2 \qquad (2.3)$$

Ahol az m a turbinán áthaladó tömegáram [kg·s^{-1}]

Megszorozva a turbinán áthaladó légsebességgel megkapjuk a turbina teljesítményét.

$$\dot{P}_T = F \cdot v_1 = \dot{m} \cdot (v_0 - v_2) \cdot v_1 \tag{2.4}$$

A szél mozgási energiaváltozása a dinamikus nyomások különbsége és a turbinán áthaladó térfogatáram szorzata.

$$\dot{P}_{Szél} = 0{,}5 \cdot \left({v_0}^2 - {v_2}^2\right) \cdot \rho \cdot \dot{V}_1 \tag{2.5}$$

Feltételezve, hogy a turbina által kinyerhető teljesítmény azonos a szél mozgási energiaváltozásával, kifejezhetjük a szélsebességet a turbinánál.

$$\dot{P}_T = \dot{P}_{Szél} \tag{2.6}$$

$$\dot{m} \cdot (v_0 - v_2) \cdot v_1 = 0{,}5 \cdot \dot{m} \cdot \left({v_0}^2 - {v_2}^2\right) \tag{2.7}$$

$$v_1 = 0{,}5 \cdot (v_0 + v_2) \tag{2.8}$$

Továbbá a turbina után fellépő szélsebesség is meghatározható:

$$v_2 = 2 \cdot v_1 - v_0 \tag{2.9}$$

A további cél csak a turbina előtti zavartalan szélsebességgel kifejezni a turbina teljesítményét, mivel így szélméréssel és a turbinahatásfok ismeretében tudjuk, mekkora teljesítmény nyerhető ki egy turbinából.

$$\dot{P}_T = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_2) \cdot v_1 \tag{2.10}$$

$$\dot{P}_T = \rho \cdot A_1 \cdot {v_1}^2 \cdot (v_0 - v_2) \tag{2.11}$$

$$\dot{P}_T = \rho \cdot A_1 \cdot {v_1}^2 \cdot \left(v_0 - (2 \cdot v_1 - v_0)\right) \tag{2.12}$$

További egyszerűsítések érdekében bevezetésre kerül egy „a” indukciós tényező, amelyek az alábbi módokon definiálhatók:

$$a = (v_0 - v_1) \cdot {v_0}^{-1} \tag{2.13}$$

$$a = (v_0 - v_2) \cdot 2 \cdot {v_0}^{-1} \tag{2.14}$$

Ezt a tényezőt felhasználva v_1 és v_2 sebességek felírhatók v_0 és „a” függvényében.

$$v_1 = v_0 \cdot (1 - a) \tag{2.15}$$

$$v_2 = v_0 - 2 \cdot v_0 \cdot a \tag{2.16}$$

Így a turbina teljesítménye:

$$\dot{P}_T = \rho \cdot A_1 \cdot {v_1}^2 \cdot \left(v_0 - (2 \cdot v_1 - v_0)\right) \tag{2.17}$$

$$\dot{P}_T = 2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot {v_1}^2 \cdot (v_0 - v_1) \tag{2.18}$$

$$\dot{P}_T = 2 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot \left(v_0 \cdot (1 - a)\right)^2 \cdot \left(v_0 - v_0 \cdot (1 - a)\right) \tag{2.19}$$

$$\dot{P}_T = 2 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot {v_0}^3 \cdot (1-a)^2 \cdot \big(1-(1-a)\big) \tag{2.20}$$

$$\dot{P}_T = 2 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot {v_0}^3 \cdot (1-a)^2 \cdot (1-1+a) \tag{2.21}$$

$$\dot{P}_T = 2 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot {v_0}^3 \cdot (1-a)^2 \cdot a \tag{2.22}$$

2.2.2. A szélturbina teljesítménytényezője

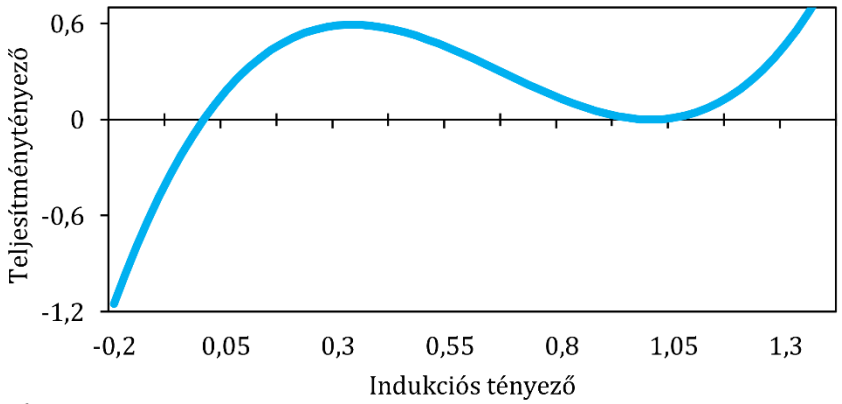
A szélturbinák hatásait a teljesítménytényezővel (C_P) tudjuk szemléltetni a turbina által termelt teljesítmény és a szél mozgásából adódó teljesítmény hányadosával.

$$C_P = \text{Turbina által termelt teljesítmény} \cdot \text{Szél mozgásából adódó teljesítmény}^{-1} \tag{2.23}$$

$$C_P = (0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot {v_0}^3 \cdot 4 \cdot (1-a)^2 \cdot a) \cdot (0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot {v_0}^3)^{-1} \tag{2.24}$$

$$C_P = 4 \cdot a \cdot (1-a)^2 \tag{2.25}$$

Ezzel a képlettel meghatározható bármely turbina hatásfoka, amely turbina lapátjai kinetikus energiát termelnek vagy hasznosítanak egy nyílt térben.



Szodrai

2.4. ábra. Teljesítmény- és indukciós tényezők függvénye [8]

A 2.4. ábra az „a” indukciós tényező függvényében írja le a teljesítménytényezőt. Ez alapján ezeknek a turbináknak 4 üzemmódjuk van. Az első, amikor az „a” és a C_P negatív, tehát a turbina gyorsul és teljesítményt ad le, ez repülőgépekre jellemző tartomány. A C_P tényező a=0-1 érték között vesz fel pozitív értéket, itt lehetséges a szélenergia-hasznosítás. Megfigyelések alapján viszont 0,5-ös „a” érték felett az örvényképződés jelentős lesz, ami teljesítményromláshoz vezet. Az a=1-es érték felett pedig a C_P tényező megint negatív értéket vesz fel, ami a

repülőgépeknél landolásnál jellemző. Maga a függvény nem ezt az alakot adja, viszont a=1-es érték fölött a turbina ellentétes áramot kelt. [8]
A Betz-féle leírás idealizált turbinát mutat be. Feltételezzük, hogy a lapátoknak nincs tömege, tehetetlensége, így a kezdeti indítás és v_1 sebességre való felgyorsulás azonnali. A 0,5 MW feletti turbináknál már jelentős tehetetlenség tapasztalható a lapátozás miatt, emiatt ezeknél a turbináknál bizonyos szélsebesség alatt nem is definiálható a C_P. A lapátozásnak ideális esetben nincs légellenállása, a lapát geometriájából adódóan légellenállással rendelkezik, ami lassítja a turbina tengelyforgását, maximális nyomatékát. A központi tengelyátmérő ideális esetben 0 mm, mivel így a teljes átmérő által meghatározott területen tudjuk hasznosítani a szélenergiát. A lapátozás rögzítése miatt viszont ez nem kivitelezhető. A lapátok száma ideális esetben végtelen. Amerikai típusú szélturbináknál magas lapátszám van, viszont ezekre jellemző a kis tehetetlenség és a kis teljesítmény is. Nagyobb teljesítményű turbináknál a lapátozások száma a nagy tehetetlenség miatt 3 darabra korlátozódik. Az ilyen turbinák legkisebb meghatározható C_P értéke λ=4 körül van.
Megvizsgálva a $C_P = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2$ függvényt, a 2.4-es ábrán látható, hogy az a=1/3-nál veszi fel a maximumot, aminek az értéke 16/27 vagy 59,26%. Ez a szélerőművek elméleti legjobb hatásfoka, az érték másik neve a Betz-limit.
Turbinalapátozásra ható erő C_F tényezővel kifejezve:

$$F_A = \dot{m} \cdot v_0 - \dot{m} \cdot v_2 = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_2) \quad (2.26)$$

$$F_A = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_2) \quad (2.27)$$

$$F_A = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_0 + 2 \cdot v_0 \cdot a) \quad (2.28)$$

$$F_A = \rho \cdot A_0 \cdot v_0 \cdot (1 - a) \cdot (2 \cdot v_0 \cdot a) \quad (2.29)$$

$$F_A = 0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_0^2 \cdot 4 \cdot a \cdot (1 - a) \quad (2.30)$$

Fajlagossá téve megkapjuk az erőegyütthatót (C_F):

$$C_F = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \quad (2.31)$$

A képlet alapján, ha C_F=1, úgy az a=0,5, és v_2=0 $m \cdot s^{-1}$. Ez azt jelenti, hogyha teljes mértékben hasznosítjuk a szél kinetikus energiáját, a turbina utáni sebesség zérus. Abban esetben, ha v_2=0 $m \cdot s^{-1}$, a kontinuitás miatt v_1=0 $m \cdot s^{-1}$, így a C_P=0. Másik eset, amikor v_1=v_1 C_P, ebben az esetben is zérus, mivel nem történik teljesítményfelvétel.
Betz-kritérium esetében a=1/3 C_F=8/9, ez azt jelenti, hogy a lapátozás terhelését felhasználva hatékonyabb turbinát lehet alkotni.

Teljesen tömör lemez (végtelen sok lapát) esetén $C_F \neq 1$, hanem: $C_F \approx 1{,}2$ áramlástani okok miatt. A lemez szélén kialakuló örvények megnövelik a lemez felületét. Hasonló okok miatt F_A számításánál számolhatunk a teljes súrolt felülettel, ahol d_0 a turbina átmérője (a központi tengely részt vesz a termelésben) [8].

$$A_0 = 0{,}25 \cdot D_0^2 \cdot \pi \tag{2.32}$$

Ha a lapátokra túl nagy erő hat, olyan üzemállapot is létrejöhet, ami maradandóan tudja deformálni a turbinát. Ezért lehetőség szerint valamilyen módon ezt korlátozni kell.
Olyan berendezéseknél, ahol a lapátozás forgási síkon helyezkedik el, ezt a síkot párhuzamosra állíthatjuk az áramlási iránnyal. A lapátozás szögét állíthatjuk (Pitch-mechanizmus). Speciálisan adott szélsebességre kialakított lapátozásnál a turbina nagy szélsebességnél nem képes elnyelni az energiát. Fékezni szükséges a tengelyt, noha kerülendő megoldás, általában nehéz ekkora fékező energiát biztosítani.

2.2.3. Nyomatéktényező

A nyomatéktényező (C_T) a turbina lapátozás által generált és a legnagyobb lehetséges nyomaték aránya. A maximális nyomaték a turbinán:

$$F_{max} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_0^2 \tag{2.33}$$

$$T_{max} = F_{max} \cdot R \tag{2.34}$$

$$T_{max} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_0^2 \cdot R \tag{2.35}$$

$$T = T_{max} \cdot C_T \tag{2.36}$$

$$C_T = \text{Turbina tengelyre leadott nyomaték} \cdot \text{Turbina tengelyére maximálisan leadható nyomaték}^{-1} \tag{2.37}$$

A tényezők szemléltetésére a gyorsjárati tényező (λ) használatos, ami a turbinalapát mozgása és a szélsebesség alapján számolható.

$$\lambda = \text{turbinalapát sebessége} \cdot \text{szélsebesség}^{-1} = R \cdot \omega \cdot {v_0}^{-1} = v_t \cdot {v_0}^{-1} \rightarrow R \cdot \lambda \cdot v_0 \cdot \omega^{-1} \tag{2.38}$$

ahol ω a turbina szögsebessége [s^{-1}]

$$T_{max} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_0^2 \cdot \lambda \cdot v_0 \cdot \omega^{-1} = P_0 \cdot \lambda \cdot \omega^{-1} \rightarrow P_0 = T_{max} \cdot \omega \cdot \lambda^{-1} \tag{2.39}$$

A turbinatengelyre leadott teljesítménye:

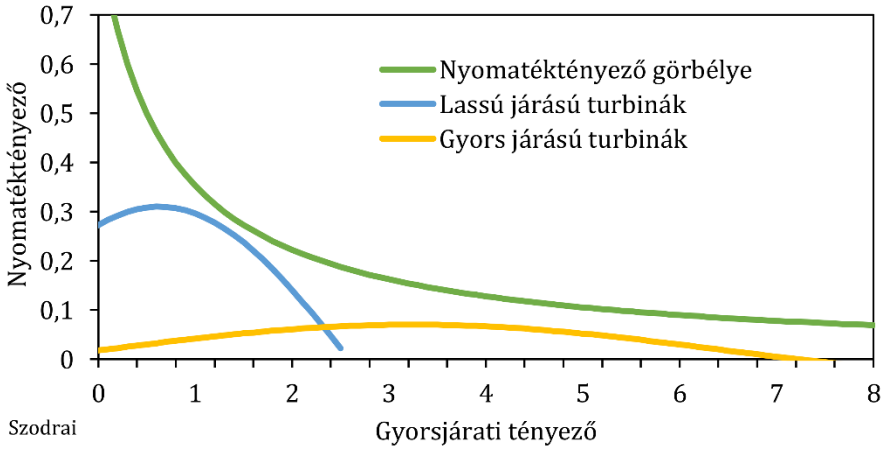
$$P_T = T \cdot \omega \tag{2.40}$$

$$C_P = P_T \cdot {P_0}^{-1} = T_{max} \cdot C_T \cdot \omega \cdot (T_{max} \cdot \omega \cdot \lambda^{-1})^{-1} = C_T \cdot \lambda \tag{2.41}$$

A nyomatéktényező és gyorsjárati tényező kapcsolata

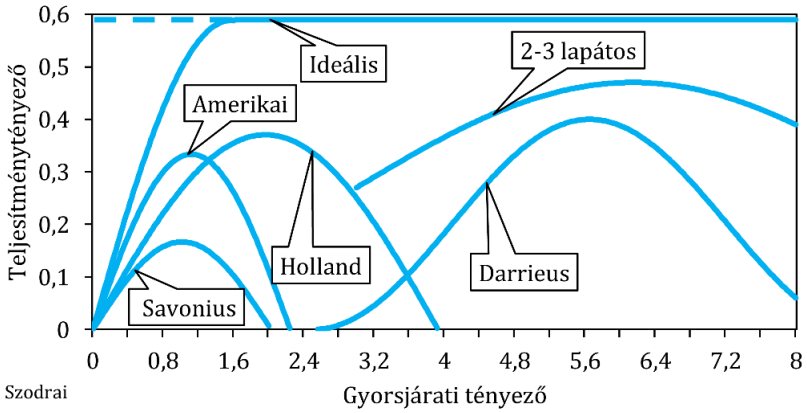
$$C_P = C_T \cdot \lambda \qquad (2.42)$$

A 2.42-es összefüggés alapján megállapítható, hogy a nyomaték és a gyorsjárati tényező fordítottan arányos. A 2.5-ös ábrán az elméleti és a valóságos turbinák görbéjét láthatjuk. Általánosságban elmondható, hogy a lassú járású turbinák nagyobb nyomatékot tudnak leadni, így mechanikai munkavégzésre alkalmasabbak. A gyorsjárású turbinák pedig a kis nyomatéknak és nagy fordulatszámnak köszönhetően kiválóak villamosgenerátorok meghajtására.



2.5. ábra. Lassú és gyorsjárású turbinák nyomatéktényező-értékei

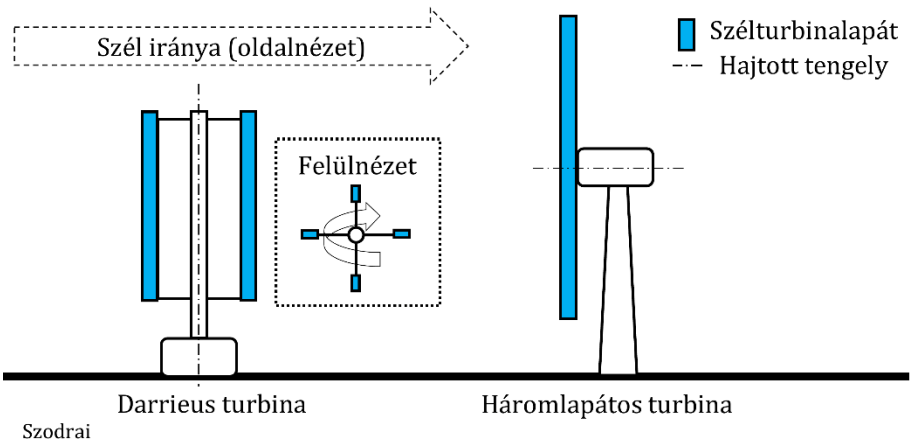
A 2.5. ábrán látható a két fő csoport jelleggörbéje. A λ=0-4 tartományban helyezkednek el a lassújárású turbinák, amelyeket nagy nyomaték és alacsony fordulatszám jellemez. A λ=4-8 tartományban pedig a gyorsjárású turbinák tartózkodnak, jellemzőjük a kis nyomaték és a magas fordulatszám.



2.6. ábra. Turbinatípusok a gyorsjárat és teljesítménytényezők alapján

2.2.4. Gyorsjárású turbinák

A gyorsjárású turbinák a légellenállás mellett a felhajtóerőt is képesek hasznosítani, mint a vitorlás hajók. Ekkor a szélsebességnél is gyorsabban tud mozogni a lapát. Ha a turbina lassan forog, nem tudja kinyerni az összes energiát. Nagy gyorsjárati tényező esetén a hosszabb lapátok végén 80 $m \cdot s^{-1}$ kerületi sebesség is kialakulhat, ekkor a porszemcsék rongálják a lapátokat.
A gyorsjárású turbinák legfőbb ismertetőjegye a szárny alakú forgórész. A szárnyakból általában hármat használnak. Kevesebbnél rezonancia alakulhat ki, több lapátnál pedig túlságosan megnő a turbinalapátok légellenállása. A környezettől függően nagyobb teljesítményű (2-4 MW) turbináknál külön radart, fűtést és tisztítóberendezéseket is telepíthetnek a szárnyba.
A gyorsjárású szélturbinák a magas fordulatszámnak köszönhetően alkalmasak közvetett vagy közvetlen hajtással villamos energiát termelni. Fontos megjegyezni a közvetett és közvetlen hajtás előnyeit és hátrányait. Közvetett hajtásnál egy váltóművet helyezünk a turbinagondolába. Ez megnöveli a gondola méretét, viszont rendkívül széles tartományban lehet a turbina fordulatszámát változtatni. A közvetett hajtás hátrányaként annyi hozható fel, hogy a nagyobb (2-4 MW) turbináknál jó adottságú területeken nem éri meg alkalmazni, és csak hibaforrásként van jelen a rendszerben.
Közvetlen hajtásnál rendkívül fontossá válik a turbinaméret kiválasztása, mert a turbina hatékonyan csak a megfelelő méretezéssel fog szélsebességen működni. Az ilyen turbinák meghibásodásának valószínűsége rendkívül alacsony.
Villamos termelésnél (ami a gyorsjárású turbinákra jellemző) csak bizonyos szélsebesség-tartományban tud működni. Alacsony szélsebességnél a nagy inercianyomatékból adódóan nem képes áramot termelni. Nagyobb szélsebességen pedig azért nem jó üzemeltetni, mivel a szélsebesség-gyakorisága alacsony és a villamosáram-elosztó hálózatot váratlanul terheli. A turbinákat általában a helyhez kötött szélsebesség-tartományokra kell kiválasztani, mivel ekkor biztosított a stabil, előre jelezhető termelés.
Létesítmények villamosenergia-termeléséhez kisebb méretű Darrieus vagy többlapátos turbina javasolt.



2.7. ábra. Függőleges tengelyű (Darrieus) gyorsjárású és háromlapátos szélturbina

2.2.5. Lassújárású turbinák

Az ókori evezős vitorlás hajókhoz hasonlóan a lassújárású turbinák is csak a légellenállást használják fel. Ezért a turbinák lapátjai sosem lehetnek gyorsabbak a szélnél. Az ilyen típusú turbinák a Savonius, amerikai és holland típusú turbinák.
A lapátozásra ható erő az az erő, ami csökkenti a szélsebességet.

$$F_A = \rho \cdot A_1 \cdot (v_0 - v_t)^2 \tag{2.43}$$

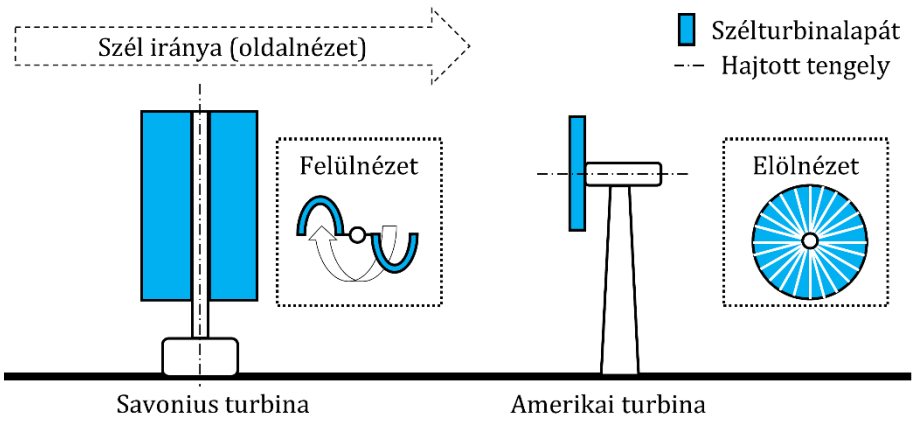
Ahol a v_0 a szélsebesség és a v_t a turbinalapát sebessége. Betz-kritérium esetén:

$$v_t = v_0 \cdot 1/3 \tag{2.44}$$

Így a teljesítménytényező a légellenállással lesz csak arányos.

$$C_P = 4/27 \cdot C_D \tag{2.45}$$

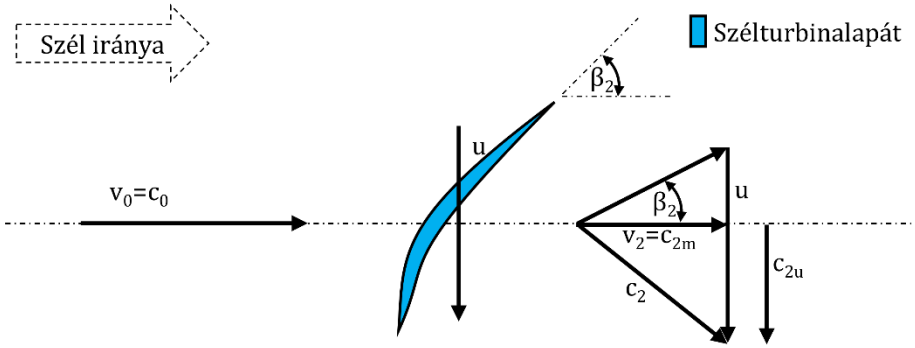
A maximálisan elérhető légellenállás turbináknál C_D=1,5. A lassújárású turbinák hatásfoka elméletben maximum 22%, gyakorlatban ez az érték 5% alatt van [8].
Az ilyen turbinák alacsony szélsebességnél is képesek nagy nyomatékot leadni, viszont képtelenek nagy sebességgel forogni. További negatív hatás, hogy magasabb szélsebességnél a lapátok negatívan hatnak egymásra, így hatékonyságuk tovább romlik. Kis szélsebességen instabil üzemet eredményez, ezért olyan helyre szükséges telepíteni, ahol nem terheli a hálózatot, pl. alkalmazható szivattyúzásra, akkumulátortöltésre vagy a villanytermelést kihagyva olyan helyekre kell telepíteni, ahol forgó mechanikai munkaigény van.



2.8. ábra. Savonius és amerikai típusú szélturbina

2.2.6. Függőleges és vízszintes tengelyű turbinák

A turbinák azon tulajdonsága, hogy a forgó része függőlegesen vagy vízszintesen forog, annyit jelent, hogy függőlegesen forgó tengelykialakításnál a turbinalapát a szél irányától függetlenül mozog.
A vízszintes tengelyű turbinák szélirányra való érzékenységének jellemzője, hogy gondolaforgató mechanizmus kell, a torony és a gondola között legalább 3-4 körbefordulást biztosító kábelhossz szükséges, ami szélcsendben beáll az alaphelyzetbe. Fontos, hogy a lapátok vége elforgatható legyen, ami aerodinamikai biztonsági fékként működhet.



2.9. ábra. A turbinalapát sebességei

Lehetséges, hogy az egész lapátot ki lehet alakítani, hogy csak a névleges szélsebességen működjön. Ekkor a lapátprofil változik a hossz mentén. Ehhez az alábbi képlet szükséges:

$$\Delta p_r = \rho \cdot u_{(r)} \cdot \left(c_{2u(r)} - c_{1u(r)}\right)_{c_{1u}=0} = \rho \cdot (2 \cdot r \cdot \pi \cdot n) \cdot (2 \cdot r \cdot \pi \cdot n - c_{2m} \cdot \tan \beta_2{}^{-1}) \quad (2.46)$$

Ebben az esetben a gondola magasabbra helyezhető a függőleges turbinákhoz képest úgy, hogy a lapát és torony aránya max. kb. 1/2–2/3 legyen.

2.2.7. Szélturbinaparkok

A szélenergia villamosenergia-termelés céljából történő hasznosításának műszaki követelményeit az 55/2016. (XII. 21.) NFM-rendelet szabályozza. Kialakítása az MSZ EN 61400-1 szabvány előírásai vagy azzal egyenértékű műszaki követelmények szerint történjen. Továbbá az éves csúcskihasználási óraszám 50 kW feletti névleges toronyteljesítmény esetén haladja meg a 2500 óra·év^{-1} értéket, ez Z_{min}= 29%-ot jelent. Világszinten ez az érték helyszíntől és széljárástól függően az onshore telephelyeken 17-35%, az európai kontinens átlaga 23-25%, az offshore telephelyeken kedvező elhelyezésnél akár a 40-45%-ot is meghaladhatja. A 253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet módosításának 1. §-a szerint: „(4) Beépítésre szánt területen és beépítésre szánt terület határától számított 12 km-en belül – a háztartási méretű kiserőműnek számító szélerőmű kivételével – szélerőmű, szélerőműpark nem helyezhető el."

Amennyiben egyszerre több turbinát telepítünk, egymáshoz képest védőtávolságot kell tartanunk: egymás mellett 3-5× toronymagasság távolságra és egymás mögött 5-9× toronymagasság távolságra. Mindemellett a turbinák egymásra való hatása miatt várhatóan 5% teljesítménycsökkenés várható.

A turbinatelepítéskor műszaki szempontból a turbinákat nehéz szállító járművel jól megközelíthetővé kell tenni, s esetleges cserénél, hálózatra termelésnél előny, ha 10-30 kV vezetékhálózathoz csatlakozik.

Környezeti szempontokat figyelembe véve a gondola környékén akár 120dB hangteljesítményű zaj is kialakulhat, továbbá a mozgó lapátok árnyékhatást (disco-effektus) fejtenek ki a környezetre, további irányelv, hogy madárvonulási utat ne keresztezzen a rotorlapát. Szélviszonyok tekintetében az állandóan nagy erősségű szelek a kedvezőek, amelyek legalább 15 éves mérés eredményeit adják. Jelenleg Magyarországon 2010 óta nem épült új szélerőmű. A 171 erőmű beépített teljesítménye 329 MW.

2.3. Vízenergia

A szélenergiához hasonló energiaforrás a vízenergia. A vízierőművek energiaforrása lehet hullámenergia; árapályhatásból eredő potenciális energiaváltozás; folyók, tenger alatti áramlások kinetikus energiája vagy magasságkülönbségből adódó potenciálkülönbség. Magyarországon csak a folyóvizekben lévő energiapotenciál hasznosítható. Vízesésekhez vagy szorosokhoz való duzzasztógátak építése és egy nagy víznyomással működő Pelton-turbina telepítése valamely létesítmény energiaigény-fedezésére fölösleges, mivel ezek beépített teljesítménye sokszorosa a létesítmény igényéhez képest. Nagy léptékű tározós erőműnek kiváló lenne, viszont a környezetet nagymértékben módosítja, így kevésbé támogatott a technológia.

Létesítmény vízenergia-hasznosítása olyan esetben lenne lehetséges, amikor az épület közelében kisebb patak vagy folyóág hasznosítható kisebb magasságkülönbséggel. Ekkor kisebb Francis- vagy Kaplan-turbinával megvalósítható az energiatermelés. Mivel ez Magyarországon nem jellemző (a vízimalmok is inkább muzeális jellegűek), így a jegyzet ezzel a témával bővebben nem foglalkozik.

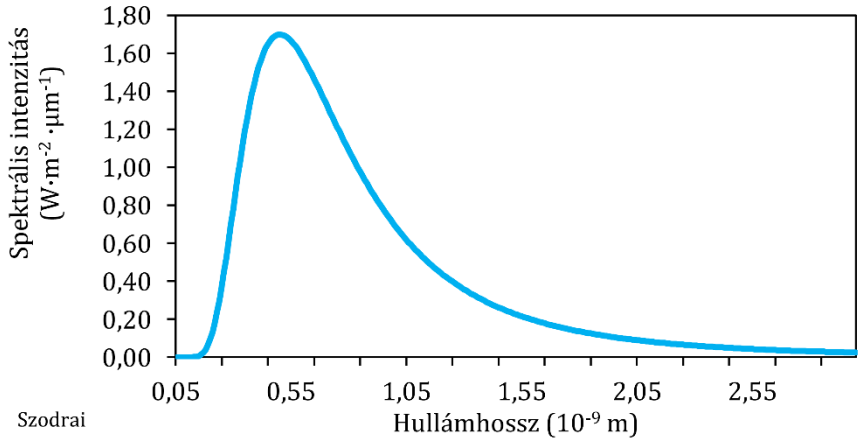
3. Napenergia

A napsugárzást passzív és aktív módon lehet hasznosítani. A passzív módszer alatt az épületek tájolását és egyéb, napsugárzást átereszt ő épületszerkezeteket értünk. Az aktív módszernél pedig vagy villamos energiát termelünk, vagy valamilyen folyadékot fűtünk fel. A passzív módszert a magyar szakirodalom nem tekinti megújuló energiaforrásnak.

3.1. A napsugárzás intenzitása

A Nap elektromágneses sugárzást bocsát ki, kb. $2{,}4\cdot10^{-7}$ és $30\cdot10^{-7}$m hullámhossz között T=5780 K-on. A látható fény tartománya $4\cdot10^{-7}$ és $8\cdot10^{-7}$m között van, alatta ultraibolya sugárzás van, felette infravörös. A sugárzás energiáját a Planck-törvény fejezi ki, ahol a Planck-állandó ($h=6{,}626\cdot10^{-34}$ J·s), a Boltzman-állandó ($k=1.38\cdot10^{-23}$ J·K^{-1}) és a fénysebesség ($c=2.9\cdot10^{8}$ m·s^{-1}) ismeretében ki lehet számolni adott hőmérsékletű felülethez és hullámhosszhoz tartozó sugárzásintenzitást az alábbi módon:

$$I_{\lambda T} = (2 \cdot c^2 \cdot h) \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{c \cdot h \cdot (k \cdot \lambda \cdot T)^{-1}} - 1\right)^{-1} \tag{3.1}$$



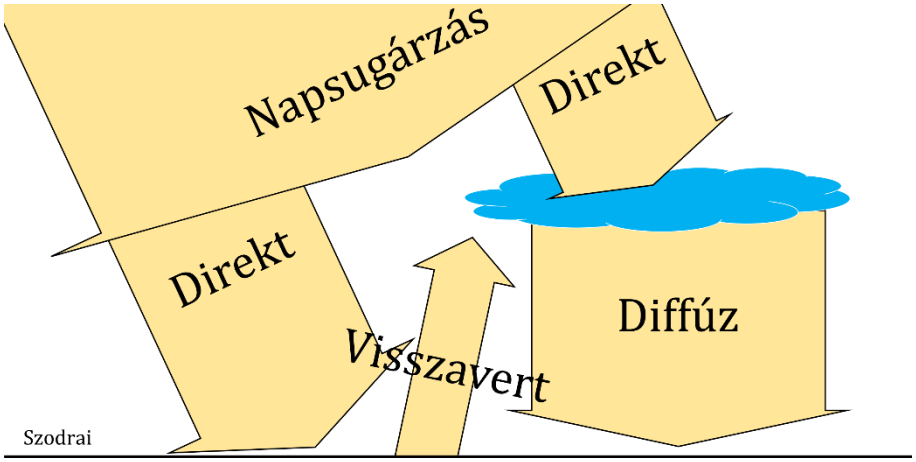
3.1. ábra. A Nap sugárzási spektruma

A függvény alakját a 3.1-es ábrán láthatjuk, ez alapján az ultraibolya tartományban hasznosítható a legtöbb energia, míg az infravörös tartományban a legkevesebb. Mivel az infravörös tartományban egészen a vörös színig a fotonok mennyisége nagy, kis intenzitású, de sok foton érkezik, ami megfelelő a hőhasznosításra. Az UV-tartományban erősebb sugárzás érkezik kis mennyiségben, ami a hőhasznosításban kevésbé kedvező. A nagy frekvenciához tartozó energiák el tudnak indítani bizonyos

folyamatokat a félvezetőkben, ami a napelemek működéséhez kell. Az UV-tartományban a Wien-féle összefüggéssel határozható meg a sugárzás jellege, mivel kimondja, hogy a fekete test hőmérsékletéhez mekkora a legnagyobb kibocsátott hullámhossz, továbbá, hogy a két érték szorzata állandó, tehát egymással fordítottan arányos.
Egy szoláris energiát hasznosító berendezés hatásfokán azt értjük, hogy a napsugárzás hány százalékát tudja hasznos energiává átalakítani. Ha a szoláris berendezés a napenergiát hővé alakítja, kollektorról beszélünk, ha villamos energiává, akkor napelemről beszélünk, és ha mindkettőt tud termelni, hibrid kollektornak hívjuk.
A Stefan–Boltzmann-törvény azt fejezi ki, hogy pont alakú forrásból a koncentrikusan elhelyezkedő gömbfelületek egységnyi felületére kisugárzott energia a távolság négyzetével fordítottan arányos. Az érték meghatározásához a Stefan–Boltzmann-állandó (σ=5,67·10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4}) szükséges továbbá a Nap sugara (R=6,96·10^{8}m) és az átlagos távolság a Földtől (D=1,496·10^{11} m).

$$I_{total} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{T=5780K} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \cdot R^2 \cdot D^{-2} \tag{3.2}$$

Mindkét módszerrel megkapjuk, hogy a Föld atmoszféráját 1,36 kW·m^{-2} nagyságú direkt sugárzás éri, ezt nevezik napállandónak. Ekkor a légköri jelenségekből adódó csillapítás AM=0. Európában a földfelszínen a légköri jelenségekből adódó csillapítás AM=1,5, emiatt nappal átlagosan 1 kW·m^{-2} hőteljesítmény mérhető.
A különböző sugárzási módokat a 3.2-es ábra szemlélteti. A direkt sugárzás párhuzamos, a Nap irányából érkező sugarakból áll, melyek határozott árnyékot okoznak. Derült idő esetén jellemző. A diffúz (szórt) sugárzás ezzel szemben borult időben jellemző, nincs határozott iránya és árnyéka, energiatartalma is lényegesen kevesebb. Ha az idő változékony, előfordulhat, hogy a felhők között kibukkan a Nap, ilyenkor a direkt sugárzás mellett a felhők által okozott szórt sugárzás hatása egyszerre érvényesül. A sugárzás lehet visszavert is, azaz egy szabad vízfelület esetén ennek határozott iránya lehet, de a földfelszín és a felhők is okoznak visszavert sugárzást.



3.2. ábra. Sugárzási fajták

A teljes vagy globál sugárzás a direkt és diffúz sugárzás összege valamekkora légköri csillapítás esetén.
Egy felületen a sugárzás 4-féle jelenséget írhat le:

- transzmisszió
- abszorpció
- reflexió
- emisszió.

Ezeket a nevükhöz köthető tényezőkkel jellemezhetjük:

- A transzmissziós tényező (τ) megadja, hogy a sugárzás hányad része tud átjutni a testen. Az olyan ideális anyagnak, amely tökéletesen átlátszó, a transzmissziós értéke 1. Optikailag tömör anyagoknak, angolul opaque anyagoknak a transzmissziós tényezőjük 0.
- Az abszorpciós tényező (α) megadja, hogy az adott test felülete mekkora mértékben tudja elnyelni a sugárzást. A sugárzás elnyelése szoros kapcsolatban van a sugárzáskibocsátással, azaz az emisszióval. Ideális fekete testnél ez a két érték közel azonos (Kirchhoff törvénye).
- A reflexiós tényező (δ) megadja, hogy egy test felülete mekkora mértékben tudja visszaverni a rá eső sugárzást.
- Az emissziós tényező (ε) megadja, hogy egy test által elnyelt sugárzást mekkora mértékben sugározza ki a környezetbe.

A transzmissziós, abszorpciós és reflexiós tényezők összege mindig 1, azaz 100%.

3.2. Napszögek

Mint minden napenergia-hasznosító rendszer esetén, a beeső napsugárzás maximalizálása a cél. A Napból érkező határozatlan irányú szórt fény mellett az energia döntő hányada a direkt sugárzásból származik, melynek iránya és erőssége a Nap járásának megfelelően nap- és évszakonként változik. A maximális energiát akkor kapjuk, ha a hasznosító felület merőleges a direkt sugárzásra. Ezt a jelenséget a Lambert-féle koszinusztörvénnyel írhatjuk le, ami megmondja, hogy a hasznosító felület normálisa és a direkt fényforrás iránya közötti szög koszinusa ideális esetben 1.
Az ideális dőlésszöget napszögekkel számolhatjuk ki úgy, hogy definiáljuk a szolár rendszer üzemeltetési idejét és a felhasználás helyét. Ezt meg lehet tenni adatbázis segítségével „http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#DR" [5] vagy a napszögek ismeretében szögfüggvényekkel.
A szélességi foknak (Latitude φ) megállapodás alapján északi irányba pozitív, déli irányba negatív az értékelőjele. Az azonos szélességű pontok alkotta vonal a szélességi kör. A szélességi körök síkjai párhuzamosak egymással és az Egyenlítővel. Az Egyenlítő (φ=0 °) a leghosszabb szélességi kör, a szélességi körök a pólusok felé rövidülnek. A pólusok a 90 ° találhatók: Északi-sark: +90°; Déli-sark: –90 °. (Debrecen: 47,506 °)
A földrajzi hosszúság (longitude λ): egy pont meridiánsíkjának a kezdőmeridián síkjával bezárt (megállapodás szerint keleti irányban pozitív, nyugati irányban negatív) szöge.
A deklináció (δ) az égi egyenlítőtől a pólusok felé haladva mért szögtávolság. Értéke az égi egyenlítőn 0 °, az északi égi póluson +90 °, a délin –90 °. Az égi egyenlítő és az ekliptika metszéspontja a tavaszpont és az őszpont. A deklinációs fok az év során folyamatosan változik, hiszen értéke az év adott napjától függ. A szög értéke a téli napfordulókor (december 21.) –23,45 °, míg a nyári napforduló (június 21.) esetében 23,45 °. Nap-éj egyenlőségek: tavaszi március 20. és őszi szeptember 23., az érték ekkor 0°.

$$\delta = 23{,}45° \cdot sin(360° \cdot (284 + D) \cdot 365^{-1}) \tag{3.3}$$

A látszólagos szoláris idő (ω) vagy óraszög az Egyenlítő síkjában mért szög a megfigyelő meridiánja és a Nap között. Ez a szög a nap folyamán az idő függvényében változik.

$$\omega = 15° \cdot (t_{Solar} - 12) \tag{3.4}$$

A szoláris idő (t_{Solar}) a napszöghöz tartozó elméleti idő, a tényleges idő és a szoláris idő különbözik. Szoláris idő szerint akkor van dél, amikor a deklinációnak maximuma van.
A Nap beesési szöge (b) alatt a napsugár és a horizont síkja között mért szöget értjük.

$$b = arcsin(\cos\varphi \cdot \cos\delta + \sin\varphi \cdot \sin\delta) \quad (3.5)$$

Az azimuth (γ) a Nap felé mutató egyenes függőleges vetületének a déli iránnyal bezárt szöge.

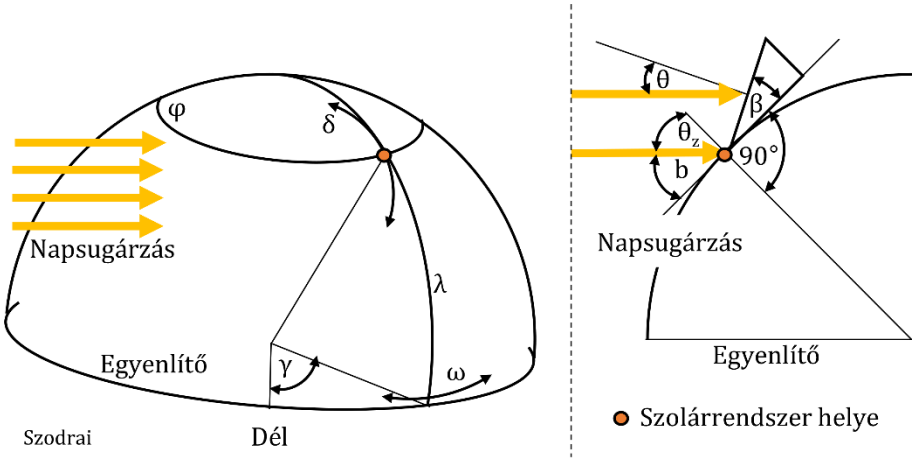
$$\gamma = arcsin(\cos\delta \cdot \sin\omega \cdot (\cos b)^{-1}) \quad (3.6)$$

A beesési szög és azimuth segítségével kiszámolható a Nap pozíciója az égbolton. A földfelszín normálisa és a Nap közötti szög a zenit (θ_z), az érték 0 ° és 90 ° között értelmezhető, ezen kívül a Nap nem látszódik.

$$\theta_Z = arcos(\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\varphi \cdot \sin\delta) \quad (3.7)$$

Ezeknek az ismeretében meghatározható az, ha ezt a normálist β szögben megdöntjük, mennyi lesz a dőlt felület normálisa és a napsugár közötti szög (θ).

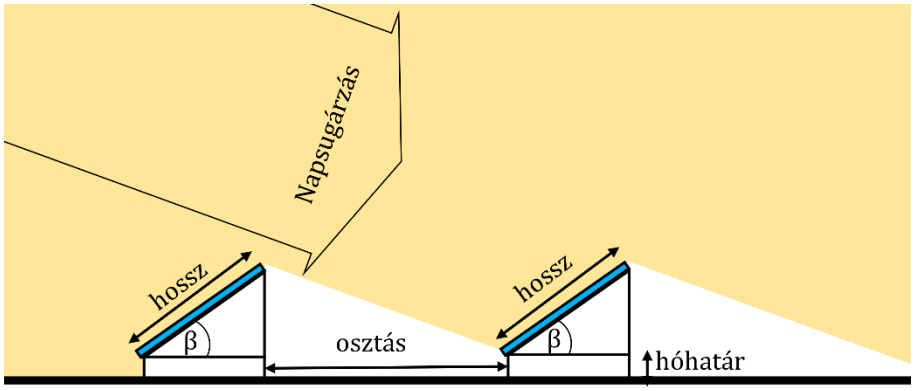
$$\theta = arcos(\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta) \quad (3.8)$$



3.3. ábra. Napszögek

3.3. Panel elhelyezése

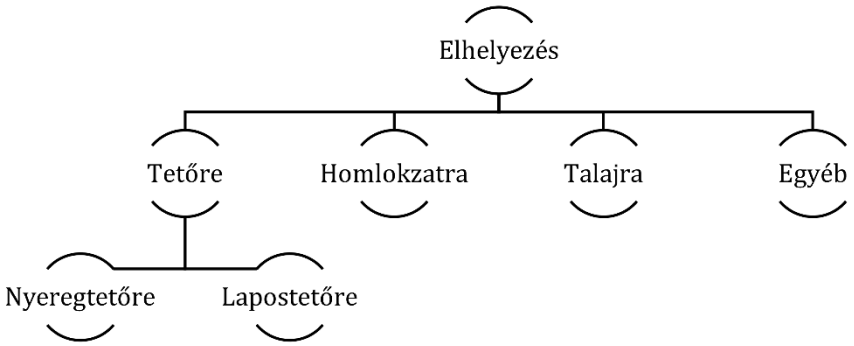
A napenergiát hasznosító berendezés kedvező dőlés (β)-szöge az év folyamán változik. Egy szoláris energiát hasznosító rendszernél, ha ismert a felhasználási időszak és a létesítmény helye, a hasznosítható szoláris energia maximalizálható a β-szög változtatásával. Viszont ezzel a módszerrel nem becsülhető meg a tényleges szoláris energianyereség, mivel az AM-tényező a felhőzet kiszámíthatatlansága miatt rendkívül nagy eltéréseket adhat a mérési eredménytől. Csak a β-szög optimalizálására alkalmas a szögfüggvényes módszer.
Egész éves, egyenletes használat esetén a kedvező dőlésszög megközelítőleg 35-45 °. Elsősorban a téli félévben történő használat esetén a kedvező dőlésszög megközelítőleg 55-60 °. Elsősorban a nyári félévben történő használat esetén a kedvező dőlésszög megközelítőleg 25-30 °.
A Nap-követő rendszerekkel elsősorban nyáron növelhetjük a hozamot, amikor nagy a direkt sugárzás aránya és abszolút értékben is nagy a lesugárzott energia. A Nap pillanatnyi helyzete vagy a beesési szög és azimuth segítségével kiszámolható, illetve szenzorokkal kereshető meg az égbolt legfényesebb pontja. Ez utóbbi esetben például teljesen borult égbolt esetén vízszintes helyzetbe állnak, hogy a szórt sugárzást minél jobban hasznosítsák. Az összefüggések alapján programozott rendszer hátránya, hogy borult időben is jár a hajtómotor.
Ideális esetben a szolárpanel teljesen árnyékmentes, városi környezetben ez azonban gyakran nem megoldható.
Ideiglenes árnyékot vetnek a lehulló levelek, a hó, a madárpiszok, szennyeződések, melyek normál körülmények között 2-5%-os veszteséget okoznak. 12°-os hajlásszög felett a modulok öntisztulóak. Minél meredekebb a modul, annál hatásosabban tisztítja a csapadék.
Az épületen lévő akadályokat is figyelembe kell venni (pl. kémények, antennák, villámhárítók, szatellitantennák, kilógó eresz, kiszögellések).



Szodrai

3.4. ábra. Panelek osztásközei

Maga a rögzítő rendszer is okozhat árnyékot. Ahogy a 3.4-es ábrán látható, a lapostetőn egymás mögött sorakozó panelok egymásra is vethetnek árnyékot. Ezért javasolt két sor panel között legalább 3 panelhossznyi távolságot hagyni. Ezt az értéket szögfüggvénnyel számolhatjuk ki, ahol a panel mögötti tér derékszögű háromszöget alkot, az átfogó a napsugár, a két befogó a panel magassága és a keresett távolság. A szögeket pedig a felhasználás során jellemző legkisebb deklináció adja meg.
Az elhelyezést tekintve nyeregtetőn kedvező, a tető természetes dőlése révén és szerencsés esetben a tájolással is kedvező irányban állhatnak a panelok.
Ellenkező esetben tartószerkezetre van szükség. Talajon és lapostetőn általában könnyű, stabil keretre kell helyezni a panelokat. Magyarországon a szélnyomás értékét a paneloknak megfelelő alaki és biztonsági tényezők figyelembevételével kb. 1 $kN \cdot m^{-2}$ értékkel lehet számításba venni.



Szodrai

3.5. ábra. A panel elhelyezésének módjai

4. Napelemek

A napelem cellái félvezető anyagból készülnek, mely napsugárzás hatására feszültségkülönbséget hoz létre. Áramkörbe kapcsolva villamos egyenáramot tud termelni. A napelem nem azonos a napkollektorral, a napkollektor hőenergiát termel, míg a napelem villamos energiát.

4.1. A hatásfok

A napelemes rendszer legkisebb eleme a cella. A cellák különböző méretű és alakú egységekké, úgynevezett modulokká építhetők össze, melyek összekapcsolásával jön létre a napelempanel. Több napelempanel együtt napelemmezőt alkot. A napelem hatásfokát a cella anyaga határozza meg.
A félvezető anyag alapján dől el, hogy a napsugárzás mely hullámhossztartományát tudja hasznosítani. A hatásfok további növelése érdekében több, kedvező anyagú réteget is egymásra lehet tenni. Ekkor úgynevezett tandem cellát kapunk, melynek jobb a hatásfoka.
A többi veszteség, mely a kialakításból vagy cella öregedéséből fakad, hozzávetőlegesen a hullámhosszveszteségek fele. Ezen tényezők miatt általánosságban kijelenthető, hogy a napelemek hatásfoka típustól függetlenül 5-40% között változhat, a gyakorlatban inkább (2020-ban) 10-20% között. A legfrissebb napelemhatásfokokat az amerikai nemzeti megújuló energia laboratórium a honlapján közli. (https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html)
A napelemek jellemzőit az összehasonlíthatóság céljából szabványos tesztkörülmények (STC – standard test conditions) között mérik, azaz 1000 $W \cdot m^{-2}$ függőleges sugárzás, 25 °C cellahőmérséklet és AM 1,5 légköri csillapítás mellett. A szabványos körülmények között leadott maximális teljesítményt ($\dot{P}_m$) Wp-ben mérik (watt peak, azaz csúcs) a cellák, illetve hasonlóképpen a modulok esetén is. Ez az érték a névleges teljesítmény, ami a napelem legfontosabb jellemzője. A napelem a hatásfok érzékenységét tekintve a napsugárzásra kevésbé érzékeny, a napsugárzás függvényével egyenesen arányosan tud termelni villamos energiát. A hőmérséklet változása viszont jelentősen módosítja a napelemek hatásfokát. SCT hőmérséklet felett átlagosan 0,5%-kal csökkenti a hatásfokát fokonként [9]. Viszont ez a hatás visszafelé is igaz, hidegebb napelemfelületi hőmérsékletnél a hatásfok növekszik.

4.2. Kristályos napelemek

A napelemeket két nagy csoportba tudjuk sorolni, kristályosak és vékony rétegesek. A kristályos napelemcellák kb. $250 \cdot 10^{-6}$ m vastag szilíciumréteg segítségével hasznosítják a napenergiát. A vékony réteges cellák anyaga változhat, a vastagsága kb. $25 \cdot 10^{-6}$ m.
A kristályos napelemcellákat kristálynövesztéssel állítják elő. A szilíciumkristály növesztésével lehetséges egykristályos (monokristályos) napelemcellát létrehozni, illetve polikristályos napelemcellát. A hatékonyság növeléséhez a szilíciumkristályt általában ionokkal lehet szennyezni. A szennyezőanyagok többnyire bór és foszfor, amelyekkel a két oldalon lévő töltéskülönbséget fokozni lehet. Működés közben az úgynevezett rekombináció miatt a potenciálkülönbség idővel csökkenni fog. Napelemeknél ez az egyik öregedési tényező. A kristályos napelemcellák hatásfoka kedvező, 2020-ban 15-18% körül van átlagosan egy napelem cella hatásfoka. Olcsónak mondható az alapanyaga, mert a szilícium a Föld harmadik leggyakoribb anyaga. A 80-as évektől van forgalomban a napelem, azóta az előállításhoz szükséges nyersanyag ára exponenciálisan csökken. Hátránya a rendkívüli érzékenység, a hatásfoka évente 1-2%-ot csökken. Inkább direkt sugárzást tud hasznosítani, miközben felületi hőmérsékletének növekedésével csökken a hatásfoka. Koszolódásra, részleges eltakarásra rendkívül érzékeny. Jelenleg a forgalomban szinte kizárólagosan mono- és polikristályos napelemek kaphatók.

4.3. Vékonyrétegű napelemek

A szilíciumot olvadt formában túl lehet hűteni, ekkor amorf kialakítás jön létre, s jellegzetessége, hogy a kristályos kialakításhoz képest jóval kisebb az előállítási költsége és a hatásfoka. Vékonyrétegű napelemcellát nem csak amorf szilíciumból lehet előállítani, kadmium-tellúrid vagy réz-indium-gallium-szelenid vegyületéből is készülnek vékonyréteg-technológiával előállított napelemek. Ha a cella vastagsága néhány 10^{-6} m körül van, vékonyrétegű napelemnek tekinthető.
Előnyük, hogy a hatásfok kevésbé módosul a külső körülmények következtében. Magas cellahőmérsékleten a kristályos cellákhoz képest csekély a hatásfokromlásuk. A leárnyékolásnál a vékonyrétegű cellák kedvezőbben viselkednek. A kristályos napelemcellák sorban, azaz string vagy füzérekben vannak összekötve a panelon belül. Ha bármely sorba kötött cellát letakarunk, az adott string áramköre zár. Ha egy panel egy füzérből áll, egy cella letakarásával az egész panel teljesítménye nulla lesz. Ellentétben a vékony rétegű kialakításokkal, kiemelten az amorf cellás napelemeknél a cellák nem vezetékkel vannak összekötve, hanem hosszban egymás mellett helyezkednek el. Így, ha az árnyékolás nem teljes

szélességben történik, a teljesítménycsökkenés csak a felülettel arányos mértékű.

4.4. Napelemes rendszerek

A napelemekre vonatkozó követelményeket az 55/2016. (XII. 21.) NFM-rendeletben rögzítették. A napelem egyenáramot termel, váltóáramigény esetén átalakító inverter szükséges. Az inverter kiválasztásánál az alábbi szempontokat vehetjük figyelembe:

- Egy füzérre köthető minimális napelemek számát az inverteren megengedhető legkisebb feszültség és a hőmérséklet-emelkedés során bekövetkező feszültségváltozás hányadosa adja meg.
- Egy füzérre köthető maximális napelemek számát az inverteren fellépő legnagyobb feszültség és a hőmérséklet-csökkenés során bekövetkező feszültségváltozás hányadosa adja meg.

A napelemes rendszerhez telepített invertereknek meg kell felelniük az MSZ EN 62116 szabvány előírásainak vagy azzal egyenértékű műszaki követelményeknek.

4.4.1. A napelemek száma

A napelempanelok számát több módon is meg lehet határozni, erőművi és háztartási esetekben más módszer szükséges és más korlátai vannak. Abban az esetben, ha a vizsgált létesítmény villamosenergia-igényét akarjuk fedezni napelemmel, a következő módon számolhatunk.
Az éves villamosenergia-igényt [kWh] méréssel meghatározzuk az előző 3 év átlagából vagy az alkalmazandó berendezések névleges teljesítménye és a tervezett éves üzemidők alapján.
Az átvételi rendszer árszabása miatt szaldós elszámolásnál, ha csak saját célunkra termelünk áramot, az éves villamosenergia-igény 80-90%-ára méretezünk. Ez a lépés akkor szükséges, ha a hálózatra betáplált áram ára kevesebb, mint a hálózatról vételezetté.
A napelem gyári adata az STC csúcsteljesítmény. Az éves energia fedezéséhez energiaadat szükséges. Különböző kiválasztószoftverek segítségével vagy tapasztalati értékekkel meg lehet határozni, hogy az adott létesítményhez hány kW villamos teljesítmény beépítése szükséges. Méréssel szintén meg lehet határozni a kW-értéket, ekkor egy meglévő rendszer adatait kell használni. Az éves termelt energiát elosztva a rendszer beépített teljesítményével egy időt kapunk. (Debrecen közelében ez 1150 h.) A létesítmény kWh-ban kifejezett energiaigényét elosztva az idővel megkapjuk, mekkora beépített teljesítményre van szükségünk. Meg kell jegyeznem, ez az érték nem azonos a napsütéses órákkal, továbbá az értéket további mérések segítségével az adott földrajzi területen korrigálni kell.

A gyártók az STC teljesítményértéket adják meg, várhatóan ez egy év során elérhetetlen. Mérések alapján viszont láthatunk kiugró értékeket, amelyek megközelíthetik az STC-teljesítményt.
Ha a napelemes rendszer által megtermelt energiát elosztjuk az adott helyen, a kapott teljesítmény az éves átlagos teljesítmény lesz.
Ezek alapján a szükséges napelemek száma:

$$\text{napelemek száma} = \text{éves energia igény} \cdot \text{méretezési arány} \cdot (\text{mért üzemidő} \cdot \text{STC teljesítmény})^{-1} \quad (4.1)$$

A mért üzemidő szimulációk, helyi adottságok, napelemhatásfok, mérések segítségével határozható meg. A darabszámok és méretek ismeretében meg kell nézni, hova férhet el (3.3-as fejezet).
Részletesebb tervezési leíráshoz a Planning and Installing Photovoltaic Systems használható [10].

5. Napkollektorok

5.1. Abszorberes kollektorok

A legegyszerűbb napkollektor egy sötét felület, mely mögött a melegítendő folyadék található. Az ezen berendezések által kinyerhető hő két módon definiálható. Megadható az abszorpciós tényező függvényében és a hőátadás függvényében is, ahogy az egyenletben látjuk:

$$\dot{I}_{be} \cdot \alpha = \dot{I}_{ki} = \dot{I}_s + \dot{I}_k \cong h \cdot (T_e - T_k) \quad (5.1)$$

ahol

- $\dot{I}_{be}$ – sugárzásból származó hőteljesítmény [W·m^{-2}]
- $\dot{I}_{ki}$ – felületegységről eltávozó hőteljesítmény [W·m^{-2}]
- α – abszorciós tényező [-]
- $\dot{I}_s$ – sugárzásos veszteség [W·m^{-2}]
- $\dot{I}_k$ – konvekciós veszteség [W·m^{-2}]
- h – hőátadási tényező [W·m^{-2}·K^{-1}]
- T_e – az anyag állandósult hőmérséklete [K]
- T_k – külső környezeti hőmérséklet [K]

A képletből látható, hogy a berendezés felületi hőmérséklete és a külső környezeti hőmérséklet közti különbség rendkívüli módon befolyásolja a berendezés hatásfokát.
Ha ismerjük a sugárzási intenzitást (I_{be}), az előző képlet segítségével kiszámolható az elnyelő felület hőmérséklete.

$$T_e \cong \left(\dot{I}_{be} \cdot \alpha\right) \cdot h^{-1} + T_k \quad (5.2)$$

A képlet alapján látható, hogy a berendezés rendkívül érzékeny a külső hőmérsékletre és a napsugárzás intenzitására. Ebből az következik, hogy a berendezés akkor használható hatékonyan, ha a napsugárzás nagy, viszont

a hőátadás alacsony. A hőátadás alacsonyan tartásához a felület előtt szélcsendnek és alacsony hőmérséklet-különbségnek kell létrejönnie a felület és a környezet között. Ha ezek a feltételek nem teljesülnek, a berendezés hűti a benne tárolt folyadékot.
Léteznek úgynevezett szelektív bevonatok, ezeknek az anyagoknak a jellemző tulajdonságuk, hogy az abszorpciós tényezőjük jóval magasabb, mint az ezzel nem rendelkező anyagoknak. Ezek a felületek a porózusságukkal növelik az abszorpciót.
Egy szoláris berendezés optikai hatásfokán az abszorpciós tényezőt értjük. Az abszorberes berendezéseket a magas optikai hatásfok, jó hővezetés és a többi kollektorhoz képest alacsony bekerülési költség jellemzi.
Olyan időszakban, amikor a folyadék hőmérséklete közel van a környezeti hőmérséklethez és a sugárzási intenzitás is magas, nagy hatékonysággal tud üzemelni. Jellemzően az abszorberes berendezés egy fekete színű tartály, másik jellemző kivitele a fekete színű tömlő (másik nevén szolárszőnyeg).
Az abszorberes kollektoros rendszer medencefűtésre van optimalizálva. Költséghatékonyan az év nagy részében (késő tavasztól kora őszig) képes langyos vizet előállítani, ezzel a medencefűtés energiaigényét csökkenteni. 30 °C fölötti víz előállítására inkább a nyári időszakban lehet alkalmas.

5.2. Síkkollektorok

Ha a napsugárzást elnyelő abszorber felületet egy üveglemezzel lefedjük (úgy, hogy kb. 20-30 mm légréteg válassza el a felülettől), a hőveszteség jelentős mértékben lecsökken, a test hőmérséklete megnövekszik azonos sugárzásintenzitás mellett. Ennek az üveg szelektív áteresztőképessége az oka, azaz az üveg a rövidebb hullámhossztartományban átlátszó, de hosszabb hullámhossztartományban átlátszatlan. Az üveg ugyanakkor a test konvekciós veszteségét is csökkenti. Az üveg viszonylag jól átengedi a Nap sugárzását. Egy 2-3 mm vastag ablaküveg transzparenciája τ=0,8, kétrétegű üvegé τ= 0,75-0,8, így a hővé alakult teljesítmény $\dot{I}_{be}\cdot\tau$ értékű lesz.
Az üvegrétegek hatását a veszteségi tényezővel közelíthetjük, melyet jelöljünk β-val, egyrétegű üvegnél 5 $W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$, kétrétegű üvegnél 2,7 $W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$.

$$\dot{I}_{be} = \beta \cdot (T_a - T_k) \tag{5.3}$$

Az elnyelő felület hőmérséklete:

$$T_e \cong \left(\dot{I}_{be} \cdot \tau \cdot \alpha\right) \cdot \beta^{-1} + T_k \tag{5.4}$$

Ha az elnyelő felületből elvezetünk, $\dot{P}_h$ teljesítményt hasznosítunk felületegységenként, akkor az egyensúlyi egyenlet a következőképpen alakul:

$$\dot{I}_h = \dot{I}_{be} \cdot \alpha \cdot \tau = \beta \cdot (T_a - T_k) \tag{5.5}$$

$$T_e \cong \left(\dot{I}_{be} \cdot \tau \cdot \alpha - \dot{P}_h\right) \cdot \beta^{-1} + T_k \tag{5.6}$$

$$\dot{P}_h = \dot{I}_h \cdot A_k \tag{5.7}$$

$$\dot{P}_{be} = \dot{I}_{be} \cdot A_a \tag{5.8}$$

Ahol: A_k a hőhordozó közeg abszorberrel érintkező felülete, az A_a az abszorber felülete. Abszorberes kollektornál ez a két érték közel azonos, míg sík- és vákuumcsöves kollektornál kialakításfüggően más és más értékek lehetnek.

$$\eta = \dot{P}_h \cdot \dot{P}_{be}{}^{-1} \tag{5.9}$$

Ismerve az abszorpciós transzmissziós és egy úgynevezett hőmérséklet-tényezőt (hővezetéshez hasonló tényezőt), megkapjuk a pillanatnyi hatásfokot. Látható, hogy a hatásfok a környezettől, a túlhőmérséklettől és a sugárzás intenzitásától is függ.

$$\eta = \left(\dot{I}_{be} \cdot \alpha \cdot \tau - k \cdot (T_a - T_k)\right) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} = \mu_0 - (k \cdot \Delta T) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} \tag{5.10}$$

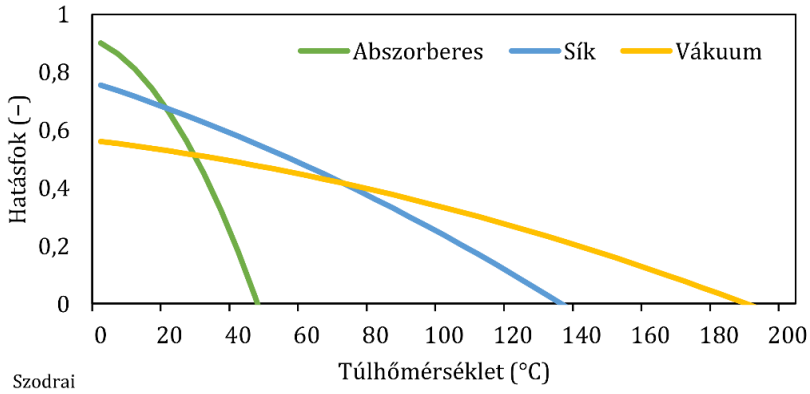
Mérésekkel igazolták viszont, hogy ez nem egy lineáris változás, ezért a hőmérsékletfüggő tényezőt egy lineáris és egy négyzetes tagra bontják. A η_o; k_1 és k_2 gyártói adat.

$$k_{eff} = k_1 + k_2 \cdot \Delta T \tag{5.11}$$

Az így kapott képlet adja meg a kollektor tényleges elméleti hatásfokát:

$$\eta = \eta_0 - (k_1 \cdot \Delta T) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} - (k_2 \cdot \Delta T^2) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} \tag{5.12}$$

Az éves kollektorhatásfok a pillanatnyi hatásfokok átlaga.



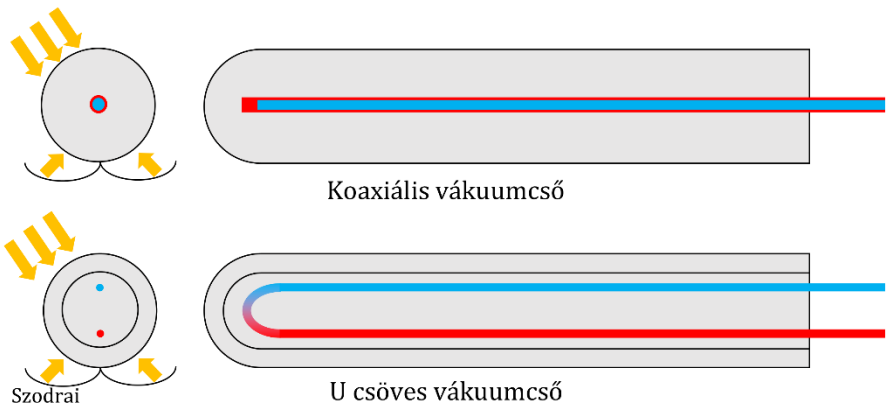
5.1. ábra. Kollektorhatásfok diagram

A diagramról látható, hogy a leghatékonyabb berendezés nyáron az abszorberes kollektor. Viszont megvizsgálva a túlhőmérsékletet a legnagyobb értéket télre kaphatjuk, amikor a léghőmérséklet pl. –20 °C és a közeg 120 °C-on kering, ez az eset extrémnek számít, de látható a

diagramról, hogy a 140 °C-os túlhőmérsékletnél még a síkkollektornak is van egy minimális hatásfoka.

5.3. Vákuumcsöves kollektorok

A vákuumcsöves kollektorok rendkívül nagy túlhőmérsékleten is tudnak üzemelni. Éves hatásfokuk magas az alacsony k_1 és k_2 tényezőjüknek köszönhetően. Termoolaj közeg esetén akár 300 °C-os közeg is lehet a berendezésben.
A vákuumcsőnek két kialakítása ismeretes, koaxiális és U cső (5.2 ábra). A koaxiális cső egy vákuumozott hengerben helyezkedik el. A koaxiális cső egy belső csőből és egy külső köpenyrészből áll. A belső cső célja eljuttatni a folyadékot a vákuumcső végére, míg a köpeny rész felveszi a hőt, majd továbbadja a belső csőnek. A vákuumcső és a külső köpeny illesztésénél a tömítés hibaforrásként jelentkezhet, így manapság a biztosabb üzemű U csövet használják. Az U cső függetlenül helyezkedik el egy harang alakú (Sydney-típusú) vákuumcsőben. Az előnye, hogy a vákuumcső meghibásodása esetén könnyebben cserélhető. Az U cső a koaxiális kialakításhoz képest egyszerűbb, a gyártása könnyebb. Mindkét vákuumcsőtípus alján tükröződő felületek találhatók. A tükröződő felületek miatt az optimális dőlésszög tágabb tartományban mozoghat, akár 0 °–90 ° lehet. A légzsák kialakulására érzékeny, vízszintes kialakítás csak feltételesen lehetséges.



5.2. ábra. Vákuumcső típusok

5.4. További kollektorok

Az 55/2016. (XII. 21.) NFM-rendelet előírása alapján az éves megtermelt energiának síkkollektor esetében nagyobb, mint 550 $kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, vákuumcsöves kollektor esetében nagyobb mint 650 $kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ kell lennie.

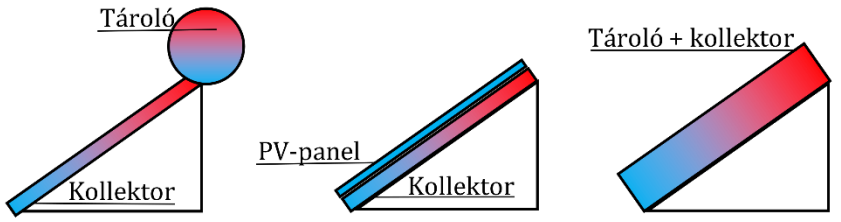
Léteznek további, kevésbé használt kollektortípusok is, mint a parabola, termoszifon, ICS és hibrid kollektor (5.3 ábra).

A parabolakollektor tartós magas hőmérséklet termelésére alkalmas. Előnye, hogy csak akkor működik, amikor a Nap fele néz, így nem tárol felesleges hőt. Hátrányaként említhető, hogy a hasznosító felület folyamatos mozgatást igényel.

A termoszifon főként mediterrán térségben használt, ott rendkívül előnyös. Magyarországon az ilyen berendezés olcsó és kompakt. Lényege, hogy a kollektor felett közvetlenül egy tároló található. A tároló a hőszigetelés ellenére hidegebb környezetben nagy hőt ad le. A mediterrán helyeken az előnye abban jelentkezik, hogy a környezeti hőmérséklet mindig magas, így a tároló akár egy gyengébb optikai hatásfokú kollektorként is működik.

Az Integral Collector Storage (ICS) kollektornál maga a kollektor szolgál folyadéktárolóként. Ez akár tekinthető egy modernebb kerti zuhanyzónak vagy nagyobb kivitelben talajkollektor módjára is üzemelhet, ahol a felső talajréteg a kollektor abszorber felülete.

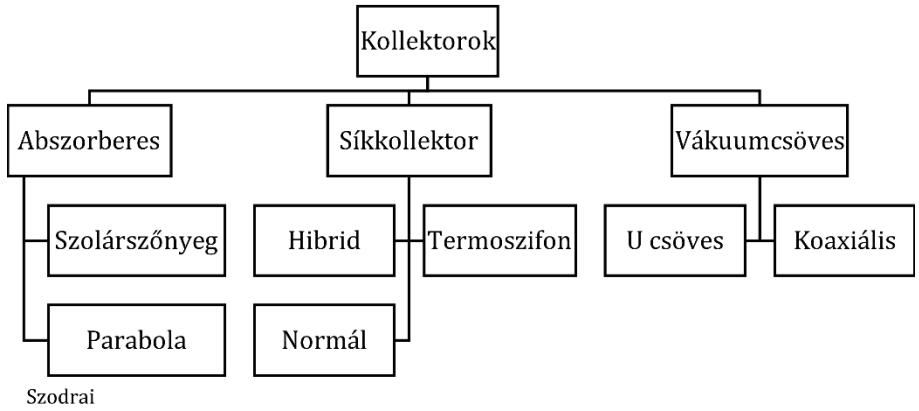
A hibrid kollektor egyszerre napelem- és napkollektorként üzemelő berendezés. A két üzem ellentétes igényei miatt csak feltételesen használható ki hatékonyan. Az ok, hogy a napelem legfeljebb 25 °C körüli hőmérsékletet igényel, míg a kollektor legalább 45 °C-ot igényel melegvíz-igény esetén.



Termoszifon síkkollektor Hibrid síkkollektor ICS-kollektor

Szodrai

5.3. ábra. Termoszifon, hibrid, ICS kollektortípusok



5.4. ábra. Kollektortípusok

Ahogy az 5.4-es ábra is mutatja, három fő kollektortípus létezik, abszorberes, sík és vákuumcsöves. A további kollektortípusok csak ezeknek valamilyen kombinációi. Hatásfokukat tekintve viszont a leírt módon számolhatjuk, ahol a k_1 és k_2 változik. Magyarországon az U csöves és a síkkollektor a legelterjedtebb kollektortípus.

5.5. Napkollektoros rendszerek

Az 55/2016. (XII. 21.) NFM-rendelet a napenergia termikus hasznosítására vonatkozó műszaki követelményeket rögzíti. A kollektoros rendszerek öt alapvető részre bonthatók, melyek különböző feladatokat látnak el. Vannak olyan esetek, amikor az alapvető részeket kombinálni lehet. A fő részek a hőenergia-hasznosító felület, a hőenergia-tároló, működtető rendszer, a folyadék és a csőhálózat.

5.5.1. A hőenergia-hasznosító felület

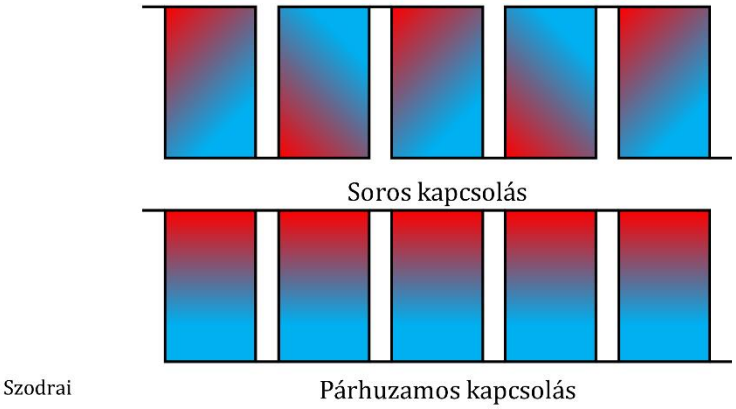
A kollektorhatásfok, a túlhőmérséklet, és a teljesítményképleteket felhasználva adott üzemállapotra ki lehet számolni a hőenergia-hasznosító felület hatékonyságát. Az egyenletrendszerben két ismeretlen van, a kollektorhatásfok és a visszatérő hőmérséklet. Viszont ez a két érték egymásnak függvénye, így csak iterációval számolható.

$$\eta = \eta_0 - (k_1 \cdot \Delta T) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} - (k_2 \cdot \Delta T^2) \cdot \dot{I}_{be}{}^{-1} \tag{5.13}$$

$$\Delta T = 0{,}5 \cdot (T_e + T_v) - T_k \tag{5.14}$$

$$P = \eta \cdot A_{koll} \cdot \dot{I}_{be} = \dot{m} \cdot (T_e - T_v) \cdot c_f \tag{5.15}$$

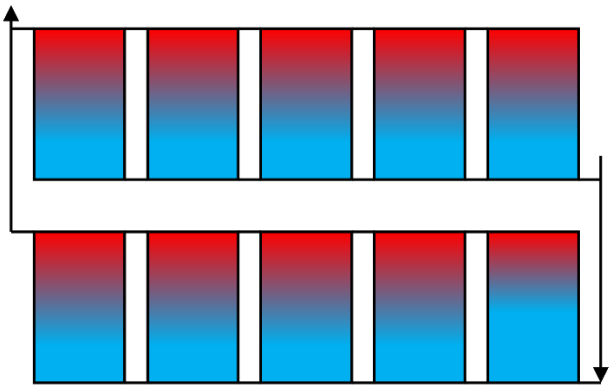
A kollektorok kapcsolási módjukat tekintve köthetők sorba és párhuzamosan (5.5. ábra). A sorba kötött kollektorok magasabb folyadék-hőmérsékletet tudnak elérni, viszont ezzel arányosan a nyomásesés is növekszik.



5.5. ábra. Soros és párhuzamos kapcsolásra példa

Ha több kollektort sorba kötünk, az első kollektor hatásfoka akkora, mintha csak 1 kollektort kötnénk be. Viszont a második kollektor már magasabb hőmérsékletet kap, így a hatásfok nagyobb. Tehát ha n számú kollektort sorba kötünk, akkor az átlaga adja a kollektoros rendszer tényleges hatásfokát.

Párhuzamos kapcsolásnál a kollektorok mindegyike azonos hatásfokkal működik, előnye, hogy nagyobb térfogatáram érhető el. Viszont a sorba és párhuzamosan kötött paneloknál a hidraulikai veszteségek összeadódnak, emiatt maximum öt darab kollektort szokás összekötni. Ötnél több kollektor esetén Tichelmann-kapcsolás (5.6. ábra) alkalmazása szükséges, mivel így a hidraulikai veszteség csökkenthető. A Tichelmannba kötött kollektorok száma áganként nem térhet el.



Szodrai

5.6. ábra. Tichelmann-kapcsolásra példa

5.5.2. Az energiatároló

A hasznosítás hatásosságát a szükséges tárolótérfogat és a fogyasztás jellege (időbeli eloszlása) befolyásolja.
Ennek alapvetően két csoportját különböztetjük meg, egyik az, amikor sugárzás nélküli időszakban van fogyasztás, illetve amikor a teljes napon keresztül folyamatos fogyasztás van.
Az energiabetárolás szempontjából a komfortigényű létesítményeknél egynapi melegvíz-igényt kell betárolni, mégpedig egy olyan napra, amikor a legnagyobb energiahozamot várhatjuk. Az energiahozam nagyságának meg kell egyezni az aznapi igénnyel. Tehát egy júliusi nap energiahozamára való méretezés csak akkor megfelelő, ha azt a létesítményt abban az időszakban is használják. Ellenkező esetben túlmelegedés léphet fel a rendszerben, ami további műszaki megoldást igényel. A használati melegvíz-tároló belseje higiéniai okok miatt zománcozott, ezért a 60 °C-nál magasabb hőmérséklet roncsolódáshoz vezethet. Tehát egy kollektoros rendszernél feltételezzük, hogy egy nap alatt 60 °C-ra fűtjük fel. Ha nem közvetlenül fogyasztásra használjuk fel, a vizet fűtési puffertárolóba is helyezhetjük, melynek a megengedett maximális hőmérséklete 95 °C. Fontos arra odafigyelni, hogy a magára hagyott kollektorban a hőhordozó felforrhat, ez károsíthatja a rendszert, így figyelembe kell venni az üresjárati hőmérsékletet. Az üresjárati hőmérséklet a megengedhető legnagyobb hőmérséklet, amit a rendszer kibír.
Az üresjárati túlmelegedés és a túlnyomás kiküszöbölésére több lehetőség ismert: a szükségesnél nagyobb energiatároló alkalmazása, a folyamatos fogyasztás fenntartása és nagy forráspontú hőhordozó közeg alkalmazása.
A tágulási tartály gumimembránjának védelme miatt előtéttartály használata ajánlott, a sokkszerű tágulás esetén a forró víz az előtéttartályba folyik, ezzel védi a gumimembránt. Állandósult állapotban viszont

előfordulhat, hogy a hő eljut a gumimembránig, tehát a védelem nem tökéletes.
A tárolót, hogy minél több hőt tudjon elnyelni nappal, éjszaka hűteni lehet. Ez úgy érhető el, hogy a keringtetőszivattyúk éjjel is működnek. Így a kollektorban lévő 15–95 °C közötti folyadék a 6 K-es égboltra sugározza ki a hőt. Ezzel a méretezési időszakban is garantálható, hogy a nap elején a tároló teljesen ki van sütve. Másik módszer a primer és szekunder oldal közötti hőcserélő beépítése. A hőcserélő veszteségként jelentkezik, viszont a veszteség miatt kevesebb hő jut a tárolóba. A módszer nagyban csökkenti a rendszer hatásfokát, akkor indokolt, ha a tároló mérete tovább nem csökkenthető és a primer oldalt kell illeszteni a HMV-tartályhoz.

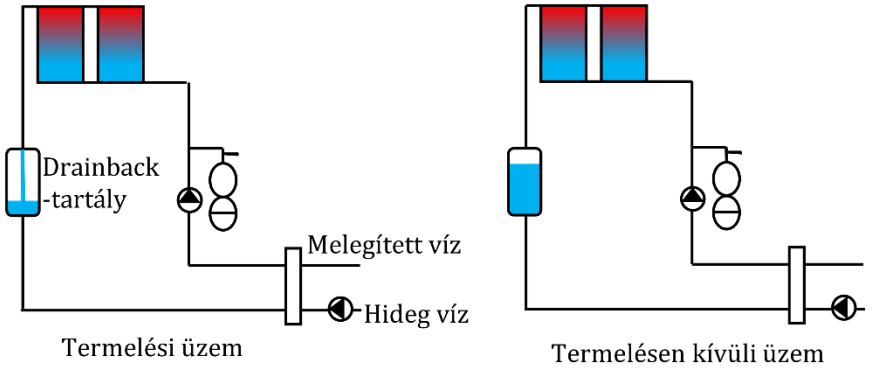
5.5.3. A folyadék

A kollektorban lévő közeg működés közben magas hőmérsékleten van alacsony nyomáson, így a fázisváltás feltétele folyamatosan adott. Ezért automatikus légtelenítés esetén a rendszerből folyamatosan szökne a folyadék, ezt megelőzendő kézi légtelenítő szelep használata javasolt, így töltés-ürítés esetén szükséges a légtelenítő szelepet nyitni. Az ideális folyadék ilyen rendszerekben egy olyan közeg, amely magas hőmérsékleten forr, fagyálló, az üzemi tartományban megfelelő a viszkozitás, kémiailag stabil, ne legyen sem tűz-, sem biológiailag veszélyes. Az általában propilén-glikol-víz 40%$_v$ oldata használatos, ez a közeg –20–140 °C között alkalmazható. Biztonsági okokból legfeljebb 120°C legyen a legmagasabb hőmérséklet a kollektorban. A forrás elkerülése végett legalább 6bar nyomás ajánlott. Magasabb hőmérsékletigények mellett szintetikus olajok használhatók.

5.5.4. A hálózat

A termelő kollektorkör és a fogyasztókör a tárolóhoz kétféleképpen kapcsolódhat: Közvetlen kapcsolatnál a kollektorban áramló víz jut el a tartályba és onnan a fogyasztóhoz. Ez a típus az abszorberes kollektoros, más néven szolárszőnyeges medencefűtésre jellemző. A többi esetben közvetett (kétkörös) kapcsolat használatos, mert a hőhordozók eltérőek vagy a közvetlen összeköttetés nem valósítható meg. A hálózat anyaga a magas hőmérsékletű folyadék miatt mindig vörösréz.
A drainback kollektor működésének lényege az, hogy a kollektor primer oldali folyadéktérfogata kisebb, mint a rendelkezésre álló térfogat. Így ha a kollektor üzemen kívül van, a primer oldali folyadék ki tud ürülni a kollektorból, így a túlmelegedés elkerülhető (5.7. ábra). Ezzel kiküszöbölhető az energiatároló méretezése, mivel a kollektor így csak a szükséges meleg vizet állítja elő. Olyan esetekben használható a drainback-rendszer, amikor a termelt energia jelentősen kisebb, mint a felhasznált

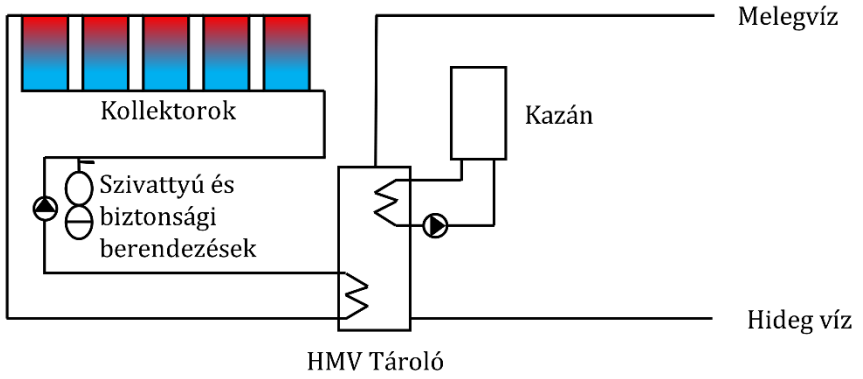
energia. Ez főként kisebb (medence nélküli) családi házakra jellemző. Mivel a kollektorból kiüríthető a folyadék, így fagyálló folyadék használata nem indokolt, viszont a primer oldal hermetikus zárást igényel.



Szodrai

5.7. ábra. A drainback-rendszer vázlata

A napkollektoros rendszerekben a nemzetközi terminológiát elfogadva alapvetően kétféle térfogatáramelv használatos: „high flow" (magas térfogatáram) 30-40 $l \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ és „low flow" (alacsony térfogatáram) 15-20 $l \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. A hazai gyakorlatban a „high flow" elv a legelterjedtebb kollektoros rendszer kialakítás (5.8 ábra).

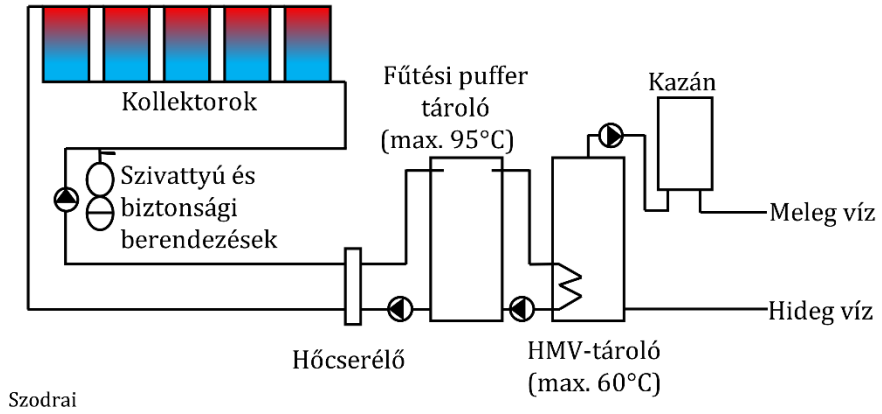


Szodrai

5.8. ábra. A high flow rendszer vázlata

A célja, hogy a napkollektorok hőmérséklete csak a szükséges minimális értékkel legyen magasabb a fűtött tároló hőmérsékleténél, s így biztosítható legyen a minél magasabb napkollektor-hatásfok. Megfelelő napsugárzás esetén a napkollektorok és a tároló hőmérséklete fokozatosan, együtt emelkedik, a kollektorok a teljes tárolótérfogatot homogén módon fűtik. A

hőmérséklet-különbség a napkollektor köri előremenő és visszatérő ág között jellemzően 10-15 °C. Az elvet általában kisebb energiaigényeknél használjuk.
A „low flow" elv alkalmazása esetén viszont az a cél, hogy a kollektorokban a hőhordozó közeg egy átfolyás alatt felmelegedjen annyira, hogy ezzel a tároló felső részében előállítható legyen a kívánt felhasználási hőmérséklet. Az ilyen elvű kollektoros rendszert akkor használjuk, amikor egy HMV-tároló térfogata nem elég, és szeretnénk további energiát betárolni. Ekkor a további energiát fűtési puffertárolóba tudjuk betárolni. Mivel magasabb a megengedett hőmérséklet, így több hőt kevesebb helyen is be tud tárolni. Ilyen esetben legalább három kör van a rendszerben: egy fagyállós primer, egy fűtővizes szekunder és egy HMV tercier kör (5.9. ábra).

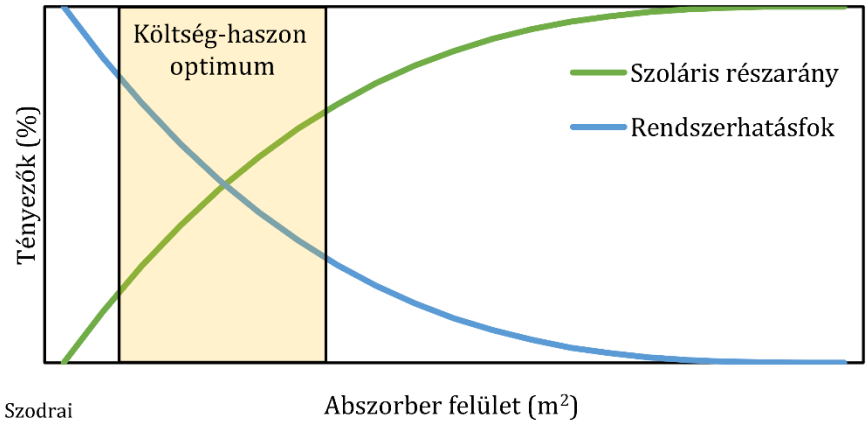


5.9. ábra. A low flow rendszer vázlata

A szezonális tároló egy Magyarországon kevésbé használt kialakítás, lényege, hogy rendkívül nagy kollektorfelülettel egy évre tároljuk be a szükséges hőt, és esetenként hőszivattyúval rásegítünk. A rendszer nagyságrendje miatt nem használatos.
Továbbá a parabolakollektoros rendszer sem használatos, amelynek elve az, hogy energiatermelés csak igény esetén van, így az energiabetárolás nem szükséges. A Nap-követő rendszerhez hasonlóan nagy pontszerű terhet ad a födémre, így használata előtt meg kell vizsgálni az alkalmazhatóságot.
Részletesebb tervezési leíráshoz a Naplopó Kft. által készített Tervezési segédlet [11] használható.

5.6. A szoláris részarány

A gázkazánnal párosított napkollektoros rendszerek esetén, ha a szoláris részarány a kollektorok felé nő, akkor az abszorber felületek a rendszer hatásosságával ellentétes irányban nőnek (5.10. ábra). A redundanciája miatt a termelés a napsugárzás függvényében működik, tehát a redundancia nem megoldott. Tiszán gázkazános rendszer esetén redundáns rendszert kapunk, viszont a szoláris rásegítés ekkor nincs jelen.
A szoláris részarányt mindig egy adott időszakra számoljuk. A szoláris energianyereséget mért vagy modellezett adatok segítségével határozhatjuk meg. (A kollektorfelület nagysága az 5.5.1. fejezet alapján számolható ki.)
Az energiaigényt a melegvíz-igény alapján határozzuk meg, az egyszerűsítés érdekében itt javasolt egy arra az időszakra vonatkozó napi átlagértékkel számolni.
Feltételezve, hogy a tervezési állapotban nem akarunk túlmelegedést elérni és a kollektorfelület nagyságát állandónak vesszük, a szoláris részarány 1/3–2/3 arányban oszlik el a kollektoros rendszer javára.



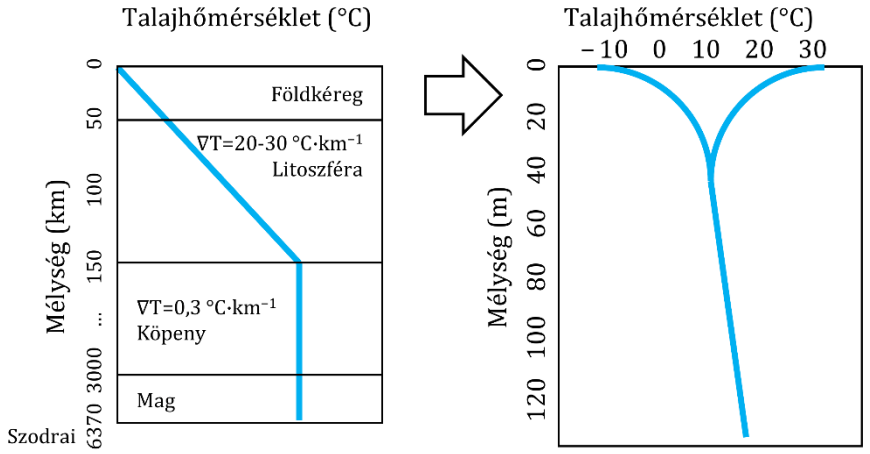
5.10. ábra. Kollektorok optimuma

6. Földhő

A Föld hőmérséklet-eloszlására néhány becslés adható, de nem mérhető. A Föld belsejének legfelső része a litoszféra, mely 150-200km vastag, ennek a legfelső, 15-50km vastag részét földkéregnek nevezzük. A litoszféra alatt az asztenoszférában folyadék található. [12]
A folyadék-termokonvekció miatt a Föld 6000°C-os magjától a litoszféra aljáig 1000°C-ra hűl le a hőmérséklet. A litoszférában további hűlés következik be a környezeti hőmérsékletig. A hőmérsékletváltozás rohamosságát hőfokgradiensben (∇T) adhatjuk meg. Ez a gradiensérték így a mélyebb rétegekben alacsony, míg a földkéregben akár százszor is nagyobb lehet (6.1. ábra). Ismerve a kőzet anyagát, a hőáram kiszámolható a Fourier I. törvénye alapján:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T \tag{6.1}$$

Ahol: q̇ – a hővezetéssel terjedő hőáram [W·m^{-2}]; ∇T – hőmérséklet gradiens [K·m^{-1}]; λ – hővezető képesség [W·m^{-1}·K^{-1}]. A gradiens változását a 6.1. ábra szemlélteti.



6.1. ábra. Hőfokgradiens diagram

A geotermikus energia a föld alatt adott térfogatban lévő belső hő. A geotermikus energiakészlet a felhasználása alapján 5 kategóriába sorolható [13].
A kezdeti földtani készlet (1) a földkéreg teljes energiája egy meghatározott terület alatt. A geotermikus energiakészletek meghatározásakor csak mint elméleti felső határt értelmezhetjük. Ez a tartomány a legnagyobb és egyben legbizonytalanabb energiatartalmú rész, mivel nincs hőmérséklet-eloszlási adat.

A hozzáférhető földtani készlet (2) az a geotermikus energiamennyiség, amelyet a földkéregnek fúrással elérhető tartománya tartalmaz. Ez a különböző mélyfúrási iparágak által elért legnagyobb mélység, több 10 km-nél, a becsült hőmérséklet miatt rendkívül nagy potenciál lehet benne, viszont gazdaságosan nem hasznosítható innen energia.
A felhasználható készlet (3) vagy geotermikusenergia-vagyon a feltételezések szerint a belátható jövőben gazdaságosan kitermelhetővé válik. Ennek a készletnek a határa a felszíntől 4km mélységig terjed.
A gazdaságosan kitermelhető készletet (4) a jelenlegi technológiák segítségével a fosszilis tüzelőanyagok jelenlegi árával megegyezően vagy olcsóbban lehet kinyerni. Ez a mélység jelenleg 1,5-2 km körül van, a technológia fejlődésével a felhasználható készlet nagyságával kellene megegyeznie. Ebbe a készletbe a földfelszín alatt lévő folyadékok hőhasznosítása tartozik. A magas hőmérséklet révén a hő mellett villamos energia is termelhető. Amikor a fölfelszín alatti folyadék, azaz fluidum hőjét közvetlenül hasznosítjuk, geotermális energiahasznosításról beszélünk. A fluidumot geotermikus tárolóból (rezervoárból) nyerjük ki.
Ha a Föld hőjét közvetetten egy zárt szondával hasznosítjuk, geotermikus energiahasznosításról beszélünk. Ez a készlet a hőszivattyúval felszínre hozható geotermikus energiakészlet (5). Ennek a készletnek a mélysége a felszíntől számított 200m-ig terjed. A készlet további két alrészre bontható, a földfelszíntől 20-30m mélységben éves szinten a napsugárzásnak van hatása a hőmérséklet eloszlására. A hőmérséklet-ingadozás a hőkinyerés és a réteg fajhőjétől függ főként. Ebben a mélységben a hőkinyerés vízszintes irányban talajkollektorokkal (utal a napkollektor kifejezésre) nyerhető ki gazdaságosan, míg mélyebben geotermikus szondákkal lehetséges hőt kinyerni.
A geotermikus energiatartalom számításánál feltételezhetjük, hogy a geotermikus rezervoár folyadékból és porózus kőzetből áll. A folyadékkal telített porózus kőzettest egységnyi térfogatú darabjának fajlagos belső energiatartalma:

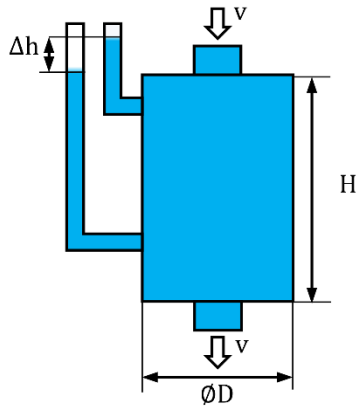
$$E = (1-\omega)\cdot c_{kőzet}\cdot \rho_{kőzet}\cdot V_{kőzet}\cdot T_{kőzet} + \omega\cdot c_{fluidum}\cdot \rho_{fluidum}\cdot V_{fluidum}\cdot T_{fluidum} \quad (6.2)$$

ahol E – adott fluidummal telt kőzettestben tárolt hőenergia [J]; c – fajhő [$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$]; ω fluidumtartalom [-]; T – hőmérséklet [K]
A porózus kőzetek sok esetben zárt térrészeket is tartalmaznak, ami tényleges fluidumot nem tartalmaz. Ezért a számításokban nem is porozitást érdemes használni, hanem nedvességtartalmat. A szemcsés szerkezetű vagy finom repedések hézagait kitöltő folyadék mozgását szivárgásnak nevezzük. A permeabilitás a kőzet áteresztő képessége. Kisebb részecskéknél nagyobb felület több vizet tud megkötni, nagy a kapilláris

ereje. Durva szemcséjű, tehát hatékony belső erőkkel nem rendelkező talajokban, a vízszemcsehalmaz szabad hézagterében a hézagok nagyságától, alakjától és a szemcsék felületi érdességétől függően szabadon tud mozogni. A porózus kőzetben a folyadék mozgása Darcy-törvénnyel írható le, ami csak a lamináris szivárgásra jó, nem alkalmazható a szivárgás nélküli és a mikroszivárgási állapotra (pl. agyagokra) és turbulens folyadékáramlásra (pl. karsztvizeknél).

$$\dot{Q} = K \cdot D^2 \cdot \pi \cdot \Delta h \cdot 4H^{-1} \tag{6.3}$$

A K tényező az alábbi ábrán látható vázlat alapján a Darcy-kísérlettel mérhető meg.



Szodrai

6.2. ábra. A Darcy-kísérlet

A Darcy-kísérlet lényege, hogy porózus kőzeten átfolyó cseppfolyós folyadék nyomásesést eredményez. A nyomásesés csak a szemcseszerkezettől függ adott geometriánál. Így a mérés során meghatározott alaki ellenállás-tényező általánosítható a K tényezővel.

A hőáram, hőmérséklet-gradiens és hőtartalom három különböző fogalom. Energetikai szempontból nagy hőtartalmú készletek a kedvezők számunkra, ezeket geotermikus mezőknek nevezzük. Ha itt kellően nagy a hőáram a felhasználás folyamán, akkor a készlet megújuló.

A geotermikus hőtartalom és gradiens egymással sokszor nem egyenesen arányos. Olyan helyeken, ahol a kőzet porózus és nagy a hőáram, nagy hőtartalmú geotermikus mezők alakulhatnak ki. Ha nincs folyadék a közelben, a kőzet nem mindig rendelkezik akkora hőtároló képességgel, hogy az a hő gazdaságosan kitermelhető legyen. A geotermikus mező elengedhetetlen feltétele a nagy geotermikus hőáram-betáplálás.

A földi hőáram világátlaga 60 $mW \cdot m^{-2}$, az őskori kontinentális pajzsokon ezt az értéket sem éri el. Magyarországon 100 $mW \cdot m^{-2}$, ami meghaladja a kontinentális átlagot [13].

6.1. Anyagjellemzők

Földhőt hasznosító rendszer két esetben lehet gazdaságosan alkalmazható megújuló energiaforrás:

1. Geotermikus rendszereknél a földfelszínhez közel (a fagyhatár és a legmélyebb szondamélység között) nagynak kell lennie a hőáramsűrűségnek. (Fő mérhető anyagjellemző a kőzet hővezetési tényezője.)
2. Geotermális rendszereknél, ha a gazdaságosan kitermelhető rétegben akkora mennyiségű és hőfokú fluidum található, ami hosszú távon folyamatos kitermelés mellett zavartalanul biztosított. (Fő mérhető anyagjellemzők a kőzet és a fluidum fajhője és sűrűsége.)

Az anyagjellemzőket mérésekkel lehet meghatározni, viszont a kőzetrétegekben más-más nedvességtartalommal rendelkeznek a kőzetek, amelyek befolyásolják az anyagjellemzőket. A táblázatban összegyűjtöttem az anyagjellemzők számítási módjait. A hővezetési tényezőre feltételezett a lineáris összefüggés, és hogy a Z egy ismert érték [14]. A Z érték kimérése kevés anyagra adott. A teljesen száraz anyagok hővezetési tényezőjét, sűrűségét és fajhőjét számos adatbázisban meg lehet találni. A nedvességtartalmat viszont minden esetben mérni kell.

6.1. táblázat. Anyagjellemzők és számítási módjaik

kőzetjellemző	számítási mód
hővezetési tényező	$\lambda_\omega = \lambda_0 \cdot (1 + 0.01 \cdot \omega \cdot Z)$
sűrűség	$\rho_\omega = 0.01 \cdot (\rho_0 \cdot (100 - \omega) + \rho_{víz} \cdot \omega)$
fajhő	$c_\omega = 0.01 \cdot (c_0 \cdot (100 - \omega) + c_{víz} \cdot \omega)$
nedvességtartalom	ω=mérhető

6.2. A fluidum hőhasznosítása

A geotermikus energiafelhasználás lehetőségeit összefoglaló ábra a Lindal-diagram [15]. Az eredi elgondolást tovább fejlesztve hőfokintervallumokat is hozzá lehet rendelni a technológiákhoz. Így egy módosított Lindal-diagramot kapunk [13]. A lehetőség akármilyen technológia lehet, a lényeg, hogy a működéséhez a fluidum hőmérsékletét csökkentse. Egy részletes adott helyhez tartozó módosított Lindal-diagram sok ötletet adhat az energetikusnak vagy tervezőnek, hogyan aknázza ki a legjobban a rendelkezésre álló hőt.

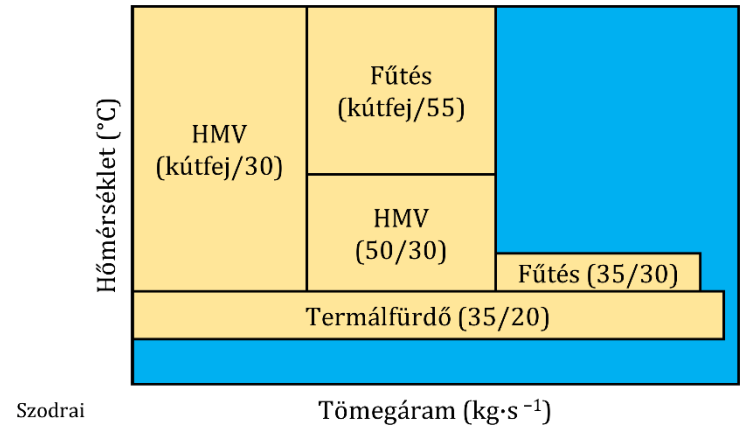
6.2. táblázat. A fluidum hőhasznosításának lehetőségei

Fluidum hőmérséklete	Fluidum	Felhasználás	Entalpia
120 °C és felette	Gőz, nagy nyomású magas hőtartalmú folyadék	Villamosenergia-termelés Abszorpciós hűtés	Nagy entalpia
120–70 °C	A fluidumot 30 °C felett hévíznek, 30–60 °C között meleg hévíznek, 60 °C felett forró hévíznek nevezhetjük	Távhő Hagyományos fűtés	
70–45 °C		HMV-fűtés	Átmenet vagy közepes entalpia
45–30 °C		Felületfűtés Medencefűtés	Kis entalpia
30-20 °C	„Hideg” víz, amit hűteni kell	Hőszivattyú hőforrása	

A diagram alapján az energetikai hasznosításnak két döntő aspektusa állapítható meg:

1. A hőhasznosítás lehetőségeit alapvetően a készletek hőmérséklete, pontosabban a kútfejhőmérséklet határozza meg;
2. a kombinált integrált kaszkád rendszerű energiahasznosítás segíti a megvalósíthatóságot és növeli a gazdaságosságot.

A módosított Lindal-diagram lényege a 6.3. ábra, viszont egy tényleges geotermális rendszerhez a módosított Lindal-diagram szerkesztéshez ismerni kell a kitermelt fluidum tömegáramát is. Így a tömegáramok és a hőfoklépcsők függvényében hatékony üzemállapot alakítható ki.



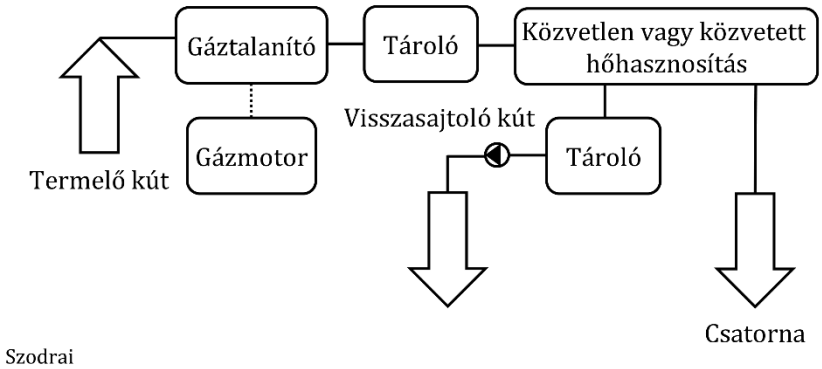
6.3. ábra. Módosított kétdimenziós Lindal-diagram egy mintarendszerre

A 6.3-as ábrán a négyzetek függőleges méreteit a primer oldali előre menő és visszatérő hőmérséklet adja, a szélességét pedig a tömegáramigény. A tömegáram méretezési állapotban állandónak tekinthető, ekkor a legszélesebb, kisebb igények esetén viszont ez csökken. Energetikailag a geotermális rendszer akkor működik a leghatékonyabban, ha a kék terület nagysága a legkisebb.
Bizonyos esetekben a fluidum kitermelése kizárólagosan az ivóvízigény fedezésére szolgálna. Ekkor olyan különleges eset jöhet létre, hogy a melegvíz-igény fedezve van, viszont a hideg vízhez külön aktív módszer szükséges. A módosított Lindal-diagramot ilyen esetben is használhatjuk.

6.3. A geotermális rendszer

A geotermális rendszer a földfelszín alól fluidumot termel ki és annak a hőjét hasznosítjuk. A fluidum ebben az esetben lehet gőz, nyersvíz vagy más folyadék. Magyarországon a fluidum többnyire valamilyen ásványösszetételű víz.
Gőzös rendszer Magyarországon nem jellemző, erőmű jelenleg Turán működik és Jászberényben tervezett további egy erőmű. A gőzt, ha egyszer vezetjük át a turbinán, egyszeres kigőzölögtetésről beszélünk, sarjúgőz hasznosítása esetén kétszeres kigőzölögtetés történik. A gőzturbinába mindig szárazgőznek kell beérkeznie.
A nyersvizes rendszereket alapvetően két további részre bonthatjuk fel, sekély és mély vizes rendszerre. A különbség a két rendszer között, hogy a sekély vizes a talajvizet használja, a mélyvizes rendszer pedig rétegvizet használ. A sekély vizes rendszer kisebb léptékű, egyszerűbb kialakítást jelent, viszont a kinyerhető energia is kisebb. Sekély vizes talajvizes

rendszert leginkább a mezőgazdaságban alkalmaznak. Ekkor viszonylagosan melegnek mondható 30 °C körüli vizet keringtetnek a primer oldalon, majd visszasajtolják a fluidumot a környezetbe. A kitermelésre a helyi önkormányzatok szabnak korlátot, mely településenként változó. Ilyen típusú berendezések alkalmazási korlátját a vízjogi szabályok korlátozzák. A mély vizes rendszer nagyobb léptékű létesítmények működtetésére szolgál.

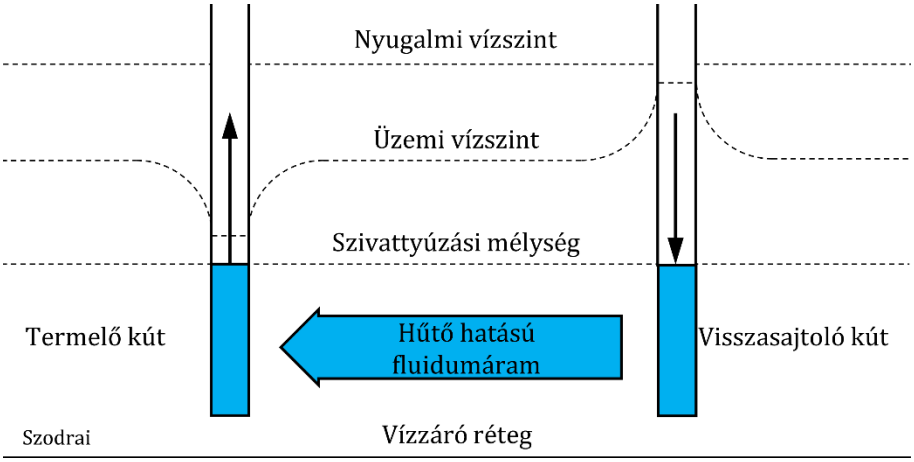


6.4. ábra. A nyersvizes rendszer primer oldali vázlata

A mély nyersvizes rendszer az alábbi főbb modulokból áll: termelés, gáztalanítás, tárolás-felhasználás, visszasajtolás. Részletesebb tervezési leíráshoz a Geotermális rendszerek Tervezési segédlet I-II használható [16], [17].

6.3.1. Termelés

A mély vizes rendszernél termelésnél mindig a rétegvíz kinyerését értjük. Különböző rétegnyomások gáztartalom- és fluidum-összetétele határozza meg, hogy mennyi hő nyerhető ki. A szivattyú a kőzetviszonyoktól függően hatással van a rétegvízkészletre. A szivattyú térfogatárama torzítja a rétegvízszintet, a következő, 6.6-os ábra ezt szemlélteti. A kitermelés helyén az üzemi vízszint nyelőként divergál, míg a visszasajtolás helyén ez forrásként divergál. Az üzemi vízszint mélysége az adott hely függvényében változik. Létezik olyan eset is, amikor a túlnyomásos fluidum két vízzáró réteg között van, ekkor a víz a furatokon feljut, így magasabb lesz a nyugalmi vízszint, mint a rezervoár legmagasabb pontja.



6.5. ábra. Termelési vízszint vázlata

A nagy mélységből kinyert vizet általában nem a legmélyebb pontról szükséges szivattyúzni, elegendő az üzemi vízszint alatt néhány méterről kinyerni a folyadékot, mely a szivattyú elhelyezését könnyíti meg. Kis mélységig, kb. 4 méterig a termelést egy örvényszivattyú szívóerejével biztosíthatjuk. Nagyobb mélységeknél csőszivattyút alkalmazunk, mely nagy emelőmagassággal rendelkezik a több, sorba kötött járókerék miatt. Ha a fluidum regenerációja biztosított, a rezervoárban az üzemi vízszint állandó lesz az év folyamán. A kútból kitermelhető fluidum mennyiségét és hőmérsékletét a rezervoár paraméterei határozzák meg, ez a termelés helyétől függ. A rezervoár hőmérsékletének mérése nehézkes, viszont a kitermelt fluidum felszíni hőmérsékletét, a kútfejhőmérsékletet könnyebb mérni. Általában ez a paraméter elegendő is az energetikai számításokhoz.
Általános cél, hogy a hasznosítandó mennyiség mindig legyen kisebb, mint a kút hozama. Ellenkező esetben a hozamot két módon lehet növelni: további mélyítéssel és új kút fúrásával. Ezek többnyire akkora volumenű beruházások, hogy új kitermelő kút létesítése jobban megéri.

6.3.2. Gáztalanítás

A fluidumban oldott gázok is találhatók, a mértékük helyfüggő. Az oldott gázok a nyomás csökkenésével távoznak a fluidumból. Azt a parciális nyomásszintet, ahol a gáz kiválik a fluidumból, buborékpontnak nevezzük. A szivattyú üzembiztossága érdekében a szivattyút a buborékpont alá kell helyezni. Ellenkező esetben a gázok mennyiségétől függően gázdugókat képes beszívni, ami rövid ideig tartó szárazon futást, majd az ismételt vízszívás miatt gyakori ütéseket, lengéseket okoz a nyomóvezetékben.

A buborékpont felett már tartalmazhat kioldott gázt a fluidum. A fluidumot gáztalanítóba vezetve megnövelt folyadékvízszint segítségével meg lehet fosztani a gáztartalmától. Ellenkező esetben a rendszer további pontjain is jelentkezni fog a kigőzölgés. Amennyiben a gáztalanítás során jelentős mennyiségű szénhidrogén távozik, indokolt lehet gázmotor használata. Kevesebb szénhidrogén-mennyiség esetén fáklyázás, minimális szénhidrogén esetén pedig akár a környezetbe való kiengedés történhet. Emiatt viszont a geotermális energiahasznosítás nem tekinthető teljesen szénhidrogén-semlegesnek. A kutak veszélyforrást jelenthetnek, ha fenoltartalmuk nagy, az ilyen jellegű probléma Magyarországon jellemző.

6.3.3. Visszasajtolás

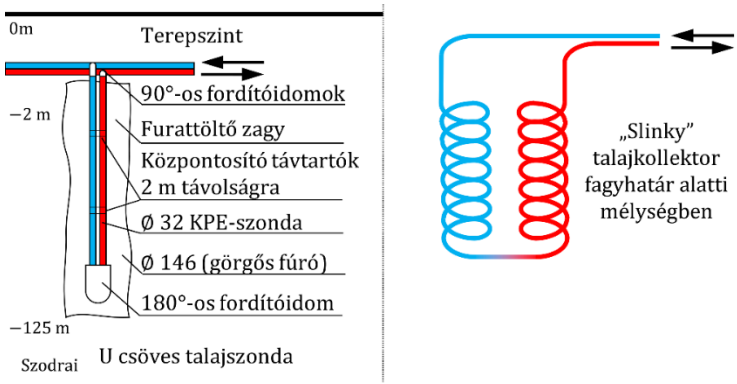
A kitermelés során a rétegnyomás és a hozam biztosítása, valamint a rétegvízkészlettel való takarékosság érdekében a kitermelt vizet vissza lehet sajtolni. Jelenleg 2025-ig nem kötelező visszasajtolni a kitermelt fluidumot. Visszasajtolással növelhető a fenntarthatóság, melyet a kút nyelőképessége és a visszasajtolt víz minősége szab meg. Nyelőképességen egységnyi túlnyomással besajtolható vízhozamot értünk. A nyelőképességet befolyásoló tényezők: a szivattyú nyomása; a nyugalmi vízszint; a terepszint között rátölthető víznyomás; a rétegnyomás; a fajsúlykülönbség; a gáztartalom emelőmagassága. A nyelőképesség a kitermelés elején egyenlő a vízadó képességgel, viszont ez az idő múlásával romlik. A gazdaságossági határ 20 bar körül van. Ennél nagyobb visszasajtoló nyomásnál a szivattyú túl nagy teljesítményt igényel. A romlás a fluidumban lévő szilárd anyagok távozásából adódik. [12]
A termelő és besajtoló kútpár általánosan használt kifejezése a doublet. A 6.6-os ábrán látható a kitermelés és visszasajtolás vázlata. Kedvező esetben a rétegvízáramlásnak köszönhetően a visszasajtolt hideg víz elkerüli a kitermelést. Ilyen esetben akármilyen közel lehet a két kút. A másik eset, amikor a kitermelés magához ragadja a visszasajtolt fluidumot, ezzel a kitermelt vízmennyiség hidegebb lesz. Ilyen esetben rendkívül nagy távolság kell a kitermelés és a visszasajtolás között.

6.4.Geotermikus rendszerek

A geotermikus rendszer lényege, hogy fluidumkitermelésről nem beszélünk. Így olyan helyeken is alkalmazható, ahol a talajban nincs fluidum vagy nem igényel fluidumot. A hőkinyerés kisebb mélységben talajkollektorral vagy nagyobb mélységekben geotermikus szondákkal történik. A kinyert hő általában nem elég, ezért hőszivattyúval növelik.
A hőszivattyú egy elektromos berendezés, a hatásosságát COP-számmal lehet jellemezni. A COP-szám a hőszivattyú fűtési és a felvett teljesítményének a hányadosa. Ez az érték akkor gazdaságos, ha 1 kW hőt hőszivattyúval, elektromos áram segítségével olcsóbban állítunk elő, mint ugyanennyi teljesítményt kondenzációs gázkazánnal. Hőszivattyút fűtési esetben egy épület legnagyobb fűtési hőigényére választunk ki, hűtésnél pedig, hogy a napi hőterhelést el tudja szállítani. A hőszivattyúk részletesebb működésével a „Hőszivattyúk" tárgy foglalkozik.

6.4.1. Talajszonda

A talajszonda egy földben elhelyezett DN32-es csőátmérőjű csőpár. A szonda mélysége általában 100 m körül van, talajviszonyok függvényében a mélység változhat. Általánosan az ilyen szonda 4-5 kW hőt tud kinyerni, nagyobb teljesítmény mellett akár hűtheti a környezetet, így rontja a COP-számot. Rendkívül fontos, hogy hosszú távon (20-30 év) ne hűtse a környezetet, ezért az MSZ–EN 378-1-2-3-4 szabvány 3,0m sugarú védőtávolságot ír elő a talajszondák között. Továbbá a furatok minimum 4,0 m-re létesülnek a telekhatártól. Ezek az értékek 30 kW-ig helytállóak, nagyobb teljesítmény felett a VDI 4640 előírásaira kell támaszkodni, hogy elkerüljük a túl- vagy alulméretezést. A VDI 4640 úgynevezett szondatesztet ír elő, ennek a lényege, hogy hosszabb mérés után megbecsüli, az adott kialakítás mennyire őrzi meg a réteg hőtechnikai megújuló tulajdonságát. Tehát az ökölszámok helyett helyre vonatkozó értéket ad, mellyel pontosabb tervezés végezhető.
Egy ilyen talajszonda főbb elemei, ahogy a 6.6-os ábrán látható is: a 90 °-os fordító idő a gyűjtőcsőre csatlakozás miatt, egy csőpár és a csőpárat összekötő 180 °-os fordítóidom. A hőátadás rendkívül fontos, ezért hogy a furatban a csőpár ne érjen össze, 2 m-enként távtartók használata indokolt. A furat fala és a csőpár között a hőátadás fokozása érdekében homok és bentonit keverékét szükséges elhelyezni.



6.6. ábra. Talajszonda és talajkollektor vázlata

Több szonda esetén a szondákat Tichelmann-kötésben egyenként vagy bizonyos mennyiséget sorban kötve, majd Tichelmann-kötésben az osztó-gyűjtőre lehet csatlakoztatni. Ha az osztó-gyűjtő a házon belül van, rendkívül sok pontszerű hőveszteséget jelentene, ezért külön a ház mellett egy osztó-gyűjtő akna kialakítható, így csak a két fővezeték csatlakozik be az épületbe.

6.4.2. Talajkollektor

A talajkollektor kialakítása lényegesen egyszerűbb, viszont használata kötöttebb. A talajkollektor egyszerre kis mélységű talajszonda és abszorberes napkollektor. Mélységét tekintve fagyhatár alá kell tenni, mélyebben a szoláris energiahasznosítása gyengül. A kollektor talajszinti területét nem érheti árnyék, mivel a hatásosságát rontja. Árnyék adódhat a növényzetből vagy a környező házakból. A kollektorok felett álló nehezebb járművek kockáztathatják az üzembiztonságot. További hátránya a kis hőáram, ezért nagy kollektorfelület szükséges. Így olyan épület fűtésére alkalmas, aminek vagy alacsony a fűtési energiaigénye, vagy a telken nagy kollektorfelület biztosított. Léteznek tavi kollektorok is, ezek különlegessége, hogy egy tóban kerül elhelyezésre a kollektor a talaj helyett. Feltétele, hogy a tó ne fagyjon be teljes mélységig a leghidegebb időszakban sem. A csőfektetés leghatékonyabb módja az, amikor a tekercselésből megmaradt hurkos, angolul „slinky" alakban helyezzük el (6.6. ábra).

A talajkollektor közege lehet levegő, ekkor légkezelő rendszerbe csatlakozik, vagy lehet víz, ekkor egy hőszivattyúba csatlakozik. A rendszer télen folyamatosan üzemel, továbbá a hőmérséklete fagypont felett várható megfelelő üzemvitel esetén, így fagyálló használata primer oldalon a gyártói előírástól függ. A hőszivattyús geotermikus/geotermális rendszereknek sok kombinációja van, különböző talajviszonyoknál és épületléptékben más és más kombináció javasolt. Ezek listázása a jegyzetben nem teljes.

7. Biomassza

A biomassza egy adott élettérben található élő és élettelen szerves anyag. Magába foglalja a növényeket, állatokat, elhalt szervezeteket és szerves hulladékot. A biomasszát rendkívül sok módon fel lehet használni, létesítmények számára az energetika, azon belül is a hőellátás a lényeges. Erre a célra természetben és az erdészetben képződő melléktermék vagy speciálisan erre a célra termesztett növény lehet a forrás. Energetikai célra a biomassza összes fázisát fel lehet használni (biogáz, bioetanol, biodízel, hasábfa vagy biobrikett/tűzipellet). Fűtésre alacsony nedvességtartalmú és magas fűtőértékű növényi anyagot vagy az előzővel megegyező és felaprított növényi anyagot biobrikettet vagy tűzipelletet tüzelhetünk el. Az említett három szilárd halmazállapotú biomasszát szilárd tüzelőanyagoknak is nevezhetjük. A folyadék halmazállapotú biomasszákat (bioetanol, biodízel) más, a létesítmények fűtésén kívüli célokra használják inkább, így a jegyzet nem foglalkozik ezek hasznosításával. [18], [19]

7.1. Szilárd tüzelőanyagok

A gáz halmazállapotú tüzelőanyagok (pl. földgáz) ideálisnak tekinthetők, a szilárd tüzelőanyagok tulajdonságaikat tekintve ezeket csak közelítik. A halmazállapotukból adódóan viszont helyi tárolás szükséges. A tüzelőanyag akkor gazdaságos, ha az adott energiatartalom előállítása olcsóbb a földgázéhoz képest. [18]

7.1.1. A fa égése

A szilárd tüzelőanyag égése két fázisból áll, egy endoterm és egy exoterm fázisból. Gazdaságos esetben az endoterm energiaigény kisebb, mint a felszabaduló exoterm energia. [18]
Az endoterm fázis helyi hőmérsékletről indul és tart a gőzfejlődésig (kb. 100-135 °C-ig). A gőzfejlődési, száradási szakaszban a tüzelőanyag elveszti a nedvességtartalmát, ez a szakasz nedves tüzelőanyag esetében a legmeghatározóbb, mivel a párolgáshő nagyon meg tudja növelni az energiaigényeket. A második szakaszban az éghető gázok égése közben keletkező hő hatására további bomlás megy végbe, pirolízisgázok keletkeznek, kigázosodás történik. A kigázosodás nagyon intenzív, ezért ilyenkor az égés tökéletlen.
A harmadik szakaszban pirolízises bomlás megy végbe, a hosszú láncú összetevők bomlása rövid láncúakra.

230-500 °C körül az exoterm folyamat beindul (4. szakasz), a vízmentes összetevők elgázosodnak. Az elsődleges levegő reakcióba lép a gáznemű pirolízistermékekkel, mely elég hőt termel a szilárd és folyékony pirolízistermékek reakciójának elindításához. A pirolízisgázok égése közben keletkező hő hatására oxigénszegény környezetben CO, $C0_2$, CH_4 stb. keletkezik, miközben szenesedés megy végbe. Erre a szakaszra a kék színű láng a jellemző.
500-700 °C körüli hőmérsékleten az égés az anyag teljes elgázosodásáig folytatódik (5. szakasz). A többlet 0_2 adagolása nélkül ilyenkor sok CO keletkezik. Ettől a fázistól kezdve a másodlagos levegő utánpótlásával csökkenthető a CO képződése. A kigázosodás és az elgázosodás a viszonylag alacsony hőmérsékletű parázságyban megy végbe.
Végül a 6. fázisban a keletkezett gázok elégnek, ekkor a hőmérséklet 700-1400 °C körül van, s tökéletes égés megy végbe. A másodlagos levegő ebben a fázisban is kedvező hatással van a gázok égésére. [18], [19]

7.1.2. Az égést befolyásoló tényezők

Az égéshez fajlagosan nagyobb felület szükséges a fajlagos térfogathoz képest. A nagyobb felszínről a gázok gyorsabban felszabadulnak. A felületen létrejövő szenesedés mértéke csökkenthető, ha a tüzelőanyag térfogata kicsi. Közvetetten ezt a tulajdonságot lehet javítani, ha a tüzelőanyag sűrűsége alacsony, porozitása magas, hővezetési tényezője magas, fajhője alacsony. Az anyag hővezetési anizotrópiája tekintetében a rostokkal párhuzamosan gyorsabb, mint keresztirányban.
A levegő mennyiségével az égés teljesítményét és a károsanyag-kibocsátás jellemzőit lehet módosítani. Az elődleges levegővel a kezdeti égésfázisokban történő folyamatoknak biztosítunk O_2-t, míg a másodlagos levegővel az 5-6 fázisban végbemenő folyamatokhoz biztosítunk O_2-t. A kezdeti fázisoknál az égés teljesítménye módosítható, a végfázisokban pedig a tökéletes égés biztosítása a cél. Ha biztosított az alacsony nedvességtartalmú és felület-térfogatarányú tüzelőanyag, amit megfelelő mennyiségű elsődleges és másodlagos levegővel ellátunk, továbbá a szilárd égésterméket folyamatosan eltávolítjuk, az égési folyamat optimálisnak tekinthető, ami alacsony károsanyag-kibocsátást (emissziót) és gyors égési ciklust jelent.
Ellenkező esetben CO, korom (C), szénhidrogének, kátrányösszetevők (C_mH_n), NO_x, el nem égett részecskék keletkeznek.

7.1.3. Fűtőérték

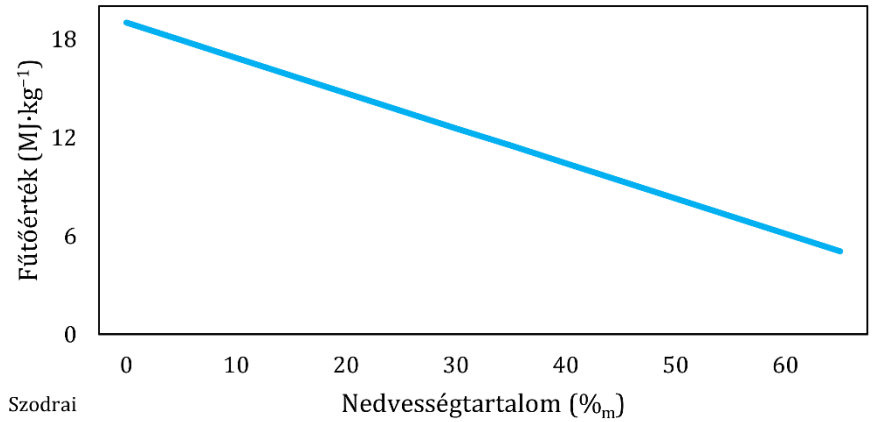
A szilárd tüzelőanyagok két legfontosabb tulajdonsága a fűtőérték és az ezt befolyásoló nedvességtartalom (u). A fűtőértéket (F_u) az égéshőből (F_0) számítjuk, ahol az égéshő az elemi összetétel függvénye:

$$F_0 = f\,(C, H, S, N, O) \qquad (7.1)$$

Az égéshő a széntüzelésre kidolgozott képlet felhasználásával számítható. A képletbe az éghető, illetve az égést tápláló elemek $\%_m$ értékeit írjuk:

$$F_0 = 1{,}936 \cdot C + 8{,}126 \cdot (H - 0{,}125 \cdot O) + 0{,}598 \cdot S \ (MJ \cdot kg^{-1}) \qquad (7.2)$$

Általánosított esetben a nedves szilárd tüzelőanyagok összetétele a következő:
alacsony C-tartalom (45~50$\%_m$), magas O-tartalom (40~45$\%_m$), alacsony H-tartalom (5~6$\%_m$), alacsony S-tartalom (0,12 ~ 0,02$\%_m$).



7.1. ábra. A fűtőérték nedvességfüggvénye átlagosan fás szárú növényeknél

A fűtőérték a nedvességtartalom függvényében a 7.1. ábra alapján alakulhat. Ez egy általánosított függvény, mely közelítőleges kapcsolatot ír le. A pontos vegyi összetétel ismeretében az alábbi függvénnyel határozható meg a fűtőérték.

$$F_u = [(2{,}39 \cdot 10^{-4} \cdot F_0 - 0{,}143 \cdot (u + 9 \cdot H)] \cdot (1 + u)^{-1} \qquad (7.3)$$

Látható, hogy a nedvesség nagy hatással van a teljes fűtőértékre a látens hő miatt.
A nedves fa az eltüzelése során a nedvesség elpárologtatása miatt nagyobb befektetett energiát igényel. Ha ez nem biztosított, az égési hőmérséklet alacsonyabb, nem megy végbe tökéletes égés, így a faszén nem alakul át szén-dioxiddá, hanem korom vagy szén-monoxid formájában távozik. Az el nem égett részecskék további lerakódást tudnak okozni a füstelvezető

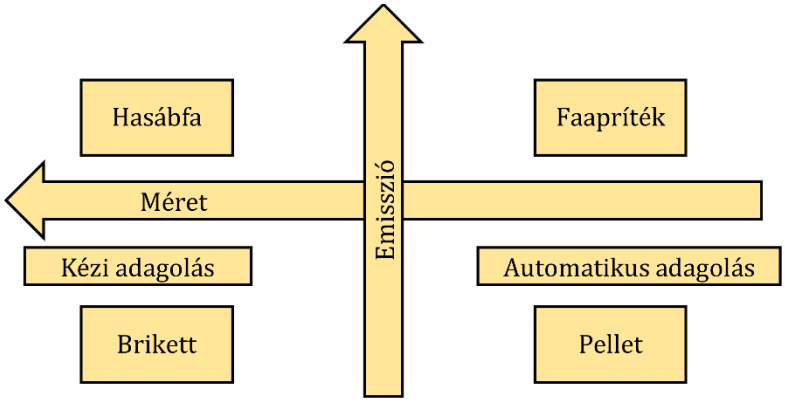
rendszerben. A fában hozzávetőlegesen kényszerszárítás nélkül 1,5-2 év után 20%$_m$-ra csökken a nedvességtartalom, ami már kedvezőnek tekinthető. A fának egyedi kedvező tulajdonsága, hogy kiszáradás után nedvességterhelés hatására nem képes az eredeti nedvességtartalmat felvenni.

7.1.4. Termelődés

A fák folyónövedékének nevezzük a két, egymás után következő évben létrejött térfogatváltozást. Ha éves szinten vizsgáljuk a biomassza megújulását, a kitermelésnek a folyónövedék-érték alatt kell lennie. Magyarországon a fás szárú növények folyónövedékének átlagos mértéke 7 $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot év^{-1}$. Ebből 3,8 $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot év^{-1}$ a kitermelés átlagos értéke. Tehát a fás szárú növények utánpótlása biztosított Magyarországon. [20]
A fás szárú anyagok átlagos sűrűsége 650 $kg \cdot m^{-3}$. Így a fás szárú anyagok fajlagosan 4550 $kg \cdot ha^{-1} \cdot év^{-1}$-t termelődnek éves szinten. Az országban becslések alapján az erdőgazdaságok 3-4 millió tonna faanyag kitermelését teszik lehetővé, ennek 3%-át használják fel energetikai célra [18].

7.1.5. Tüzelőanyag-típusok

A szilárd tüzelőanyagok főbb típusai: hasábfa, faapríték, brikett és pellet (7.2-es ábra). A hasábfa a felsoroltak közül a legkisebb energiaigényű tüzelőanyag, viszont a nedvességtartalma igen magas. A hasábfa és a brikett eltüzelése csak szakaszosan oldható meg, mivel az adagolása nehezen automatizálható. Ezeknek az alapanyaguk többnyire az akác, a tölgy és a bükk fafajok, amelyek magas fűtőértékkel rendelkeznek. A tűztérbe adagolás szempontjából kedvezőbb a faapríték és a pellet. A faapríték a felsorolt fafajok kedvezőbb, kisebb térfogatú és nagyobb felületű kivitele. A faapríték fűtőértéke és nedvességtartalma homogénebb. Méretét és nedvességtartalmát az Önorm 7133 és EN 14961 előírások határozzák meg. A brikett és pellet ezen anyagokból egy kényszerszárított és összetételében adott fűtőértékre kikevert anyag. A brikettnek és pelletnek, mivel kevert anyagok, a hamutartalmuk is várhatóan kevesebb. A méretétől függően nevezzük (10-30 cm nagyságú) brikettnek és (2-3 cm nagyságú) pelletnek. A kényszerszárított anyagok rendkívül alacsony nedvességtartalommal rendelkeznek, így ezeket a tárolás során a levegő nedvességétől is védeni kell. Ellenkező esetben a fűtőérték csökkenni fog. A tűztérbe történő adagolás szempontjából a pellet és a faapríték könnyebben automatizálható, így az égési ciklus is rövidebb, biztonságosabban tud üzemelni.



Szodrai

7.2. ábra. Tüzelőanyag-típusok

A tüzelőanyag tárolását tekintve két megközelítés lehetséges, szárított tüzelőanyagot veszünk vagy a létesítmény környékén akarjuk szárítani. A faapríték, pellet és brikett esetében az első opció él. Ekkor tetszés szerinti mennyiséget lehet betárolni. A tárolásra és tűztérbe való adagolásra vonatkozóan termékenként különböző mód van. A pelletet speciális silókban lehet tárolni.
A frissen vágott hasábfánál viszont a tároló mérete rendkívül nagy lehet. Az ok, hogy a fának 1,5-2 évet száradnia kell. Ha feltételezzük, hogy saját, frissen vágott fával akarunk tüzelni hosszú távon, akkor évente a felhasznált fát ki kell vágni. Ami azt jelenti, hogy a felhasználás helye körül az éves faigény háromszorosát kell tárolni, mivel az utolsó két vágás még nedves fa, míg az első vágás már 2 éve száradó fa, amit felhasználunk. Ez a hozzáállás további problémát vet fel, mivel az első két évben a fa még nedves, így a tervezettnél több kell. A másik probléma pedig, hogy csökken az értékes alapterület az adott telken. A tüzelőanyag-térfogat számítás a fűtőérték és sűrűség alapján kiszámolható, ha ismert az épület éves fűtési igénye, és állandónak tudjuk tekinteni.

7.1.6. A tüzelőanyag ára

A biomasszából kinyert energia árának gazdaságosság miatt mindig alacsonyabbnak kell lennie a földgáz áránál. A földgáz ára a helyi gázszolgáltató árszabása függvényében adott, állandó érték. A biomassza ára viszont változó. Az előállított energia fajlagos ára függ a tényleges beszerzési vagy termelési költségétől. A beszerzési vagy termelési költséghez járulékosan felmerülhet a szállítási költségektől, illetve a keresleti és kínálati viszonyoktól is. Ekkor az üzemanyagköltség is

hozzáadódik az árhoz. Magyarországon jellemzően 1 km légvonalbeli távolság 1,4 km közúti távolságot jelent [21]. A légvonalbeli távolság a kezdeti körülhatároláshoz kell. A biomasszaforrások lokalizálása után bármely útvonaltervező program megadja a pontos távot. További költséget jelent, ha a biomasszát nem közvetlenül tüzeljük el, hanem pelletáljuk vagy brikettáljuk. Így egyfelől magas lehet a berendezések beszerzési költsége és ez elnyújthatja a megtérülést, vagy csak szolgáltatásként való előállítás esetén pedig a járulékos előállítási költség lesz magas.

7.1. Biomassza hőtermelők

A biomassza hőtermelőknek két nagyságrendi csoportja van, a kandalló és a kazán. A kandalló kis teljesítményű hőtermelő, amit a tartózkodási zónában helyeznek el, célja az adott helyiség kifűtése és esztétikus látvány biztosítása, esetlegesen további hőcserélővel további hőt tud szolgáltatni.
A kazán lényegesen nagyobb teljesítménnyel bíró berendezés, amit külön gépházban helyeznek el és közel van a tüzelőanyag-tárolóhoz.
Az 55/2016. (XII. 21.) NFM-rendelet kiköti, hogy a biomassza-, valamint biogáz-tüzelésű hőenergia-termelő berendezésnek névleges hőteljesítményéhez tartozó hatásfoknak legalább 85%-nak kell lennie.

7.1.1. Vegyestüzelésű kazánok

A vegyestüzelésű kazánok lényege a gravitációs füstgáz-eltávolítás. Ezek működése a külső levegő és a füstgáz sűrűségkülönbségén alapul a működés. Működés közben a rostélyok állításával elvégezhető az elsődleges és a szekunder levegőszabályozás. Az égési ciklus újraindítása és a hamu eltávolítása kézzel történik. Az égési ciklus hossza a tűztér méretétől függ, a kis teljesítményű kazánoknál gyakori újratöltés (kb. 1-2 óránként) szükséges. Nagyobb tűztér esetén viszont a termelt energia betárolása vethet fel problémát, mivel nagyobb energiatárolás nagyobb hőmérséklet-ingadozást eredményez a hőtárolóban.

7.1.2. Faelgázosító kazánok

A faelgázosító kazánt a levegőellátás módja különbözteti meg legfőképp a vegyestüzelésű kazánoktól. Míg a vegyestüzelésű kazánoknál huzatszabályozó szabályozza az égéshez szükséges levegő mennyiségét, itt a levegőellátás teljesen automatikusan szabályozott.
Az emisszió függvényében lambdaszabályozóval történik a friss levegő szabályozása, amivel a tökéletes égés előidézhető. Az égési folyamat is

lassul, emiatt alacsonyabb hőmérsékletű füstgáz képződik, ami kondenzáció kialakulásához vezet. Jó hatásfokkal működnek ezek a kazánok, a lassú égési ciklus (kb. 12 óra) miatt a fahasábokkal való újratöltések gyakorisága is ritkább. A nagyméretű fahasábok használata és a lassú égési folyamat pontosan ellentmond a 7.1.2-es fejezetben leírt tökéletesnek tekinthető égési folyamatnak. Az ok, hogy az égés két külön tűztérben történik. A tüzelőanyagtérben a fából légszegény környezetben fagázok szabadulnak fel, így faszénné alakul. A légszegény környezetben a fagáz nem ég el, hanem az égéstérben történik az elégetése.

7.1.3. Pellet- és faapríték kazánok

A pellettel és a faaprítékkal történő hőtermelés jól automatizálható folyamatot jelent. A kis tüzelőanyag darabkák folyamatosan adagolhatók a tűztérbe, így az égés biztosított. Az égéstermék eltávolítása is automatizált, legtöbbször csigaorsós módon biztosított. A pellet és a faapríték a teljesítménytartományukban különböznek. A pellet a faaprítékhoz képest drágább, így elsődlegesen kisebb teljesítményű kandallóknál, kazánoknál alkalmazható gazdaságosan. Módosított összetétele miatt a pellet égése közben a károsanyag-kibocsátás alacsony. A faapríték kazánnál a károsanyag-kibocsátás magasabb lehet, ezért aktív ciklonszűrűvel szükséges ellátni. A ciklonszűrő kényszeráram segítségével csökkenteni tudja a szennyeződés mértékét, viszont ehhez energia kell. A gazdaságos üzem nem alakulhat ki kis teljesítményszinten, így a faapríték kazánok 20-30 kW-os alsó teljesítményhatárral rendelkeznek.

7.1.4. Az energiatárolás

A szilárdtüzelésű kazánok elengedhetetlen biztonsági tartozékai a puffertárolók, melyek feladata az egy ciklus alatt termelt hő betárolása. Ez azért szükséges, mert a hőtermelő által termelt energia magasabb hőfokú, mint amilyen a felhasznált fűtővíz hőmérséklete. A brikett- és fahasáb-tüzelésű kazánoknál a fűtési puffertárolónak akkorának kell lennie, hogy az egy égési ciklus alatt felszabaduló hő a stagnáló hőmérsékletről legfeljebb 95 °C-ig melegítse fel a vizet. Az üzemviteli ciklus pedig addig tart, míg az épület fűtési rendszere le nem hűti a tárolót a stagnáló hőmérsékletre.
Mivel pelletkazánoknál az adagolás jól szabályozható, így a puffertálónak az égési ciklusa nehezen meghatározható, ezért a puffertároló méretének a gyártó által meghatározott nagyságúnak kell lennie.

8. Felhasznált irodalom

[1] BMWi and Bmu, “Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply,” 2010.

[2] S. Byfield and D. Vetter, “Flexibility concepts for the German power supply in 2050: ensuring stability in the age of renewable energies,” 2016.

[3] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), *The energy of the future - Fourth Energy Transition Monitoring Report Summary*. Munich, 2014.

[4] L. Molnár, “Anti-Climate Change Policies and Their Impact on Energy,” *Energiagazdálkodás*, vol. 59, no. 1–2, 2018.

[5] T. Huld, R. Müller, and A. Gambardella, “A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 1803–1815, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.03.006.

[6] J. Unger, *A városi hősziget-jelenség néhány aspektusa*. Szeged, 2010.

[7] A. Lédács-Kiss, *Szélenergia hasznosítása*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1963.

[8] J. Twidell and T. Weir, *Renewable energy sources*, Oxon. Routledge, 2015.

[9] D. L. King, J. A. Kratochvi, and W. E. Boyson, “Temperature Coefficients for PVModules and Arrays:MeasurementMethods, Difficulties,and Results,” 1997.

[10] D. The German Solar Energy Society, *Planning and Installing Photovoltaic Systems*, Second. Earthscan in, 2008.

[11] Naplopó, *Tervezési segédlet*. Budapest: Naplopó Kft., 2008.

[12] D. Banks, *An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling: Second edition*. 2012.

[13] A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal Kiadványa, *Magyarország geotermikus felmérése*. 2016.

[14] F. Szodrai, “Épületenergetikai elemzések az épülethatároló szerkezet környezet okozta változásai alapján,” University of Debrecen, 2018.

[15] B. Líndal, “Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations,” *Geothermics*, vol. 21, no. 5–6, pp. 591–604, 1992, doi: 10.1016/0375-6505(92)90012-X.

[16] F. Kalmár, *Geotermális rendszerek Tervezési segédlet I.* 2010.

[17] F. Kalmár, *Geotermális rendszerek Tervezési segédlet II.* 2011.

[18] A. Bai and Z. Lakner, *A biomassza felhasználása*. 2015.

[19] Z. Gabnai, “Szennyvíztelepi technológiák gazdasági értékelése, valamint szerepe az energia-, tápanyag- és szén-dioxid-gazdálkodásban,” Debreceni Egyetem, 2019.

[20] B. Lett and M. Stark, *Amit a számok mutatnak – Differenciált erdővagyon - gazdálkodás*. 2017.

[21] G. Pintér and T. Kis-Simon, “A közúti infrastruktúra-hálózat hatása a biomassza tüzelésére Magyarországon,” in *Georgikon napok, Nemzetközi Tudományos Konferencia*, 2012, pp. 11–12.