

A FÓKUSZÁLT NAPENERGIA TÁROLÁSI ÉS HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A HŐTÁROLÓ MÉRETÉNEK ÉS HŐSZIGETELÉSÉNEK OPTIMÁLISA

POSSIBILITIES IN THE HEAT STORAGE AND EXPLOITATION OF CONCENTRATED SOLAR ENERGY

*OPTIMAL DESIGN OF SENSIBLE HEAT STORAGE AND ITS HEAT
INSULATION*

ÁRPÁD István¹, Prof. Dr. Timár Imre²

¹ PhD hallgató, Pannon Egyetem Gépészmérnöki Intézet,
mérnök szakértő, MVM ERBE ENERGETIKA Mérnökiroda Zrt., H-1117 Budapest, Budafoki út 95.
telefon: +36 1 3824715; arpad.istvan@hotmail.com; www.erbe.hu

² tanszékvezető egyetemi tanár, Pannon Egyetem Gépészmérnöki Intézet, H-8200 Veszprém, Egyetem u.10.
telefon: +36 88 624525; timari@almos.vein.hu; www.uni-pannon.hu

Abstract

We have been striving for a long time to be capable of collecting the energy of solar radiation and of storing it. Certainly, we would like to store and use solar energy for a long time without suffering any great losses. This paper analyses the sensible heat storage and its heat insulation. We investigate the heat insulation from a new aspect. The new aspect is the specific surface. The specific heat loss might be reduced with two ways. On the one hand it might be reduced with applied of heat insulation material. On the other hand it might be reduced with lessening of specific surface. The rise of size reduces specific surface. This paper analyses the characters of heat storage container. Finely we show an example of the sensible heat storage's optimal design in the exploitation of concentrated solar energy.

Összefoglaló

Régi törekvésünk, hogy a napsütés energiáját képesek legyünk úgy begyűjteni és tárolni, hogy abból hosszútávú, akár egész éves hőszükségletünket biztosíthassuk. A hőtárolást pedig úgy kell megvalósítani, hogy a hőveszteség minél kisebb legyen. Ennek a feladatnak a megoldásához új szempontból vizsgáljuk az optimális hőszigetelés kialakítását. Az új szempont a fajlagos felület figyelembe vétele. Ugyanis a fajlagos hőveszteséget két módon lehet csökkenteni: termikus ellenállás (hőszigetelő anyag) alkalmazásával és a fajlagos felület csökkentésével. A tervezési feladatoknál mindkét hatással számolni kell. A cikkben tárgyaljuk a hőtárolók jellemzőit és példát mutatunk be a direkt napsugárzást hasznosító „naperőmű (CSP)” szilárd hőtárolójának és szigetelésének optimális méretezésére.

Keywords: sensible heat storage, heat insulation, specific surface, characterization of heat storage container, optimal design, concentrated solar energy

Kulcsszavak: érzékelhető hőtárolás, hőszigetelés, fajlagos felület, hőtároló jellemzése, optimális méretezés, fókuszált napenergia

1. Bevezetés

A napsütés energiájának begyűjtésénél és hosszúidejű tárolásánál több oldalról is nehézségek jelentkeznek:

- a napsütés energia fluxusa „kicsi”,
- az energia kinyerése és fogyasztása időben diszharmonikus és kiszámíthatatlan, ezért jelentős puffer energiatárolót kell biztosítani,
- a hőenergia hatékony és gazdaságos tárolása ez idáig megoldatlan probléma.

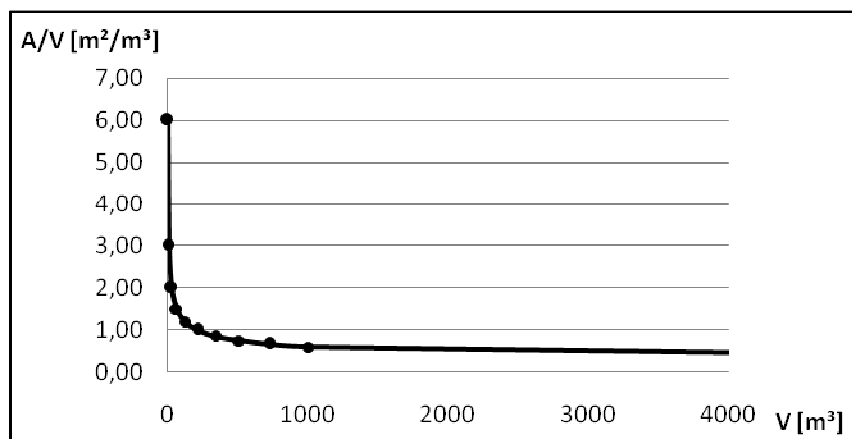
A cikk a szilárd anyagú hőtárolás problémáját vizsgálja meg abból a szempontból, hogy hogyan biztosítható az alacsony fajlagos hőveszteség, a tárolás jó energetikai hatásfoka. Bemutatunk egy megvalósítható technológiai megoldást arra, hogyan lehet a fókuszált napenergiát céljainknak megfelelően hosszú távon, akár egész éven át folyamatosan hasznosítani, és ehhez miként lehet jó hatásfokú puffer energia tárolót kialakítani.

Az [1, 2] cikk előzetes számításai és megállapításai már megmutatták, hogy a szilárd fázisú hőtároló megfelelő méretezésével lehetséges alacsony fajlagos hőveszteséget elérni és így a hőenergiát, a direkt napsütés energiáját tárolni. A számítások eredménye, az a felismerés, hogy egy bizonyos méretig a hőszigetelés egyik legjobb módja a fajlagos felület csökkentése.

Két módon lehet egy rendszer fajlagos hőveszteségét csökkenteni:

- egyrészt hőszigetelő anyag alkalmazásával, azaz a termikus ellenállás növelésével,
- másrészt a fajlagos felület csökkentésével.

Térfogatra számítva a legkisebb fajlagos felülete a téglatestek közül a kockának van, hengeres testeknél pedig azoknak a hengeres testeknek, ahol a magasság/átmérő (H/D) arány egy. Azonos térfogatnál a kocka felülete kb. 8,4%-al nagyobb, mint a minimális felületű hengeres testé. A tároló alakjának ezért a hengeres testet célszerű választani (H/D = 1).



1. ábra. A felület és a térfogat aránya a térfogat függvényében kocka esetében

A testek méretének növelésével a fajlagos felületük csökken (1. ábra). Kocka esetén a fajlagos felületet a térfogat függvényében a következő képlettel lehet leírni: $y = \frac{6}{\sqrt[3]{x}}$. Hengeres test

esetén (H/D = 1) pedig a függvényt az $y = \frac{5,54}{\sqrt[3]{x}}$ algebrai kifejezés írja le. Ahogy csökken a fajlagos felület, úgy csökken a fajlagos hőveszteség is. Ennek oka, hogy az energiacsere, a

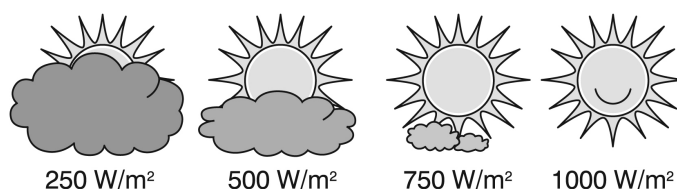
hővesztés a felületen történik. Az 1. ábrán jól látható, hogy a görbe elején rohamosan csökken a fajlagos felület. Ilyen rohamosan csökken a fajlagos hővesztés is. Ezért lehet kijelenteni, hogy bizonyos méretig a legjobb hőszigetelés a méret növelése.

Ebben a cikkben jellemezzük a hőtárolót, mert csak ennek segítségével végezhető el a méretezése. Számítási módszert mutatunk be a napenergia hasznosításban alkalmazott szilárd hőtároló optimális méretének meghatározására. A méretezést a magyarországi napsugárzási és környezeti körülményekre végeztük el, de a módszer alkalmas más körülmények melletti méretezésre is.

2. A hazai direkt napsugárzási viszonyok

A légkörön áthaladó közvetlen sugárzást direkt sugárzásnak nevezzük. Azt az időtartamot pedig, amikor a direkt sugárzás értéke a 210 W/m^2 értéket meghaladja, napsütéses időszakknak nevezzük [3]. Magyarországon a napsütéses órák száma 1900-2200 körül mozog évente, ami világviszonylatban is jónak tekinthető [3-5].

A földfelszín elérő közvetlen sugárzás tiszta légkörben 1000 W/m^2 körül van. Ezt csökkenti a felhőzet és a levegő minősége (homályossági tényező). A részletektől eltekintve a példánkban a hasznosítható direkt napsugárzás teljesítményét a napsütéses órákra átlagban 400 W/m^2 értéknek vettük (2. ábra).



2. ábra. A direkt napsütés intenzitása

Éves szinten, a sugárzásra merőlegesen m^2 -enként kinyerhető direkt sugárzás energiája közelítőleg:

$$2000 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 2880 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}.$$

3. A hőtárolás módja és a hőtároló felépítése

A cél az volt, hogy lehetőleg olyan hőtároló anyagot válasszunk, amely megfelel az alábbi követelményeknek:

- az alkalmazható hőmérséklet-tartománya ΔT nagy legyen,
- nagy a térfogati hőkapacitása,
- jó a hővezetési tényezője,
- termikusan és kémiaiilag stabil és időálló,
- nem korrozív, a környezetre sem ártalmas, valamint nem tűz és robbanásveszélyes.

Több hőtároló anyagot is megvizsgáltunk. A sóolvadékokat, a szintetikus ionos folyadékokat, a termikus olajokat, a szilárd anyagokat, a hidrogént, stb.. A választás a magnezit téglára esett, mivel a számítások itt mutatták a legkedvezőbb értékeket. Ezt a téglát főleg tűzállóanyagként alkalmazzák kemencéknél, kazánoknál, de ilyen téglát használnak az elektromos hőtároló kályhákban is. Jellemzőit a 1. táblázat ismerteti.

A magnezit téglák jellemzői [6, 7]

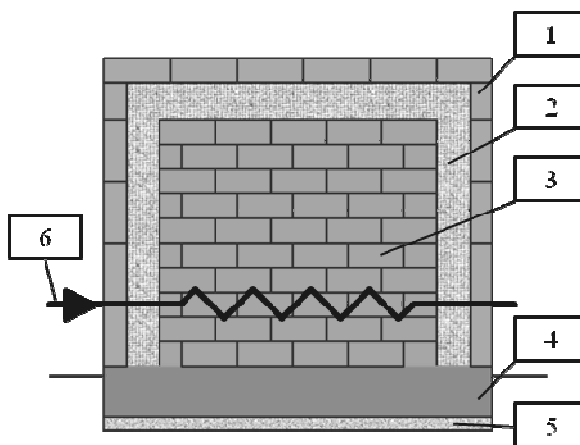
1. táblázat

Összetétel	Alkalmazási hőmérséklet tartomány ΔT	Fajhő J/(kgK)	Sűrűség kg/m ³	Térfogati hőkapacitás MJ/(m ³ K)	Hővezetési tényező W/(mK)	Ár \$/tonna
37-98 % MgO 1-60 % CaO és/vagy Cr ₂ O ₃	65 -550 °C	1172	3020	3,54	8,4 (500°C-on)	100-500

A térfogati hőkapacitása 3,54 MJ/(m³K) megközelíti a víz 90 °C-on mért térfogati hőkapacitását 4,05 MJ/(m³K), annak majdnem 90%-a, de sokkal nagyobb hőmérséklet-tartományban használható (olvadáspontja 2820 °C). Az alkalmazás felső határát valójában a hőátadó közeg jellemzője határozza meg.

Meg kell említeni, hogy az Al₂O₃ alapú téglák szintén nagyon jó térfogati hőkapacitással rendelkeznek: 3,3 MJ/m³ (Al₂O₃ tartalom 95%).

A hőtárolóra javasolt elvi konstrukciót a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A magnezit téglából épített hőtároló elvi felépítése

- 1 – külső védőfalazat, 2 – ásványgyapot hőszigetelés, 3 – magnezit téglák,
4 – könnyűbeton alap, 5 – sóderágy, 6 – hőátadó csövezés

4. A tároló alap és üzemviteli jellemzői

Az azonos anyagból készült tárolókat műszaki szempontból csak két alapjellemző különbözteti meg egymástól:

- a tároló mérete (x_1) és a hőszigetelő réteg vastagsága (x_2).

Természetesen a két fő alapjellemzőn kívül, léteznek más jellemzők is, ezek az üzemviteli jellemzők. Az üzemviteli jellemzők egy részét az igények határozzák meg vagy a felhasználás módjától függően magunk választhatjuk meg, természetesen az anyagi tulajdonságok (korlátok) figyelembevételével, a másik részét pedig a környezet, tőlünk függetlenül meghatározza (pl. meteorológiai, földrajzi adottságok).

Az üzemviteli jellemzők a következők:

- a tároló minimális és maximális hőmérséklete $T_{\min}$, $T_{\max}$,
- a töltés jellemzői, a napos órák száma és a napos órák eloszlása,
- az ürítés jellemzői és
- a környezet (külső) hőmérséklete $T_{\text{körny.}}$.

5. A tároló használati jellemzőinek meghatározása

Egy adott méretű tárolót, a használat során már csak két dolog jellemez:

- mennyit tudunk beletölteni (töltés) és mennyit tudunk kivenni (ürítés) belőle

a megadott üzemeltetési körülmények mellett. A töltés és az ürítés közötti különbség pedig a veszteség. Ezek a tároló használati jellemzői.

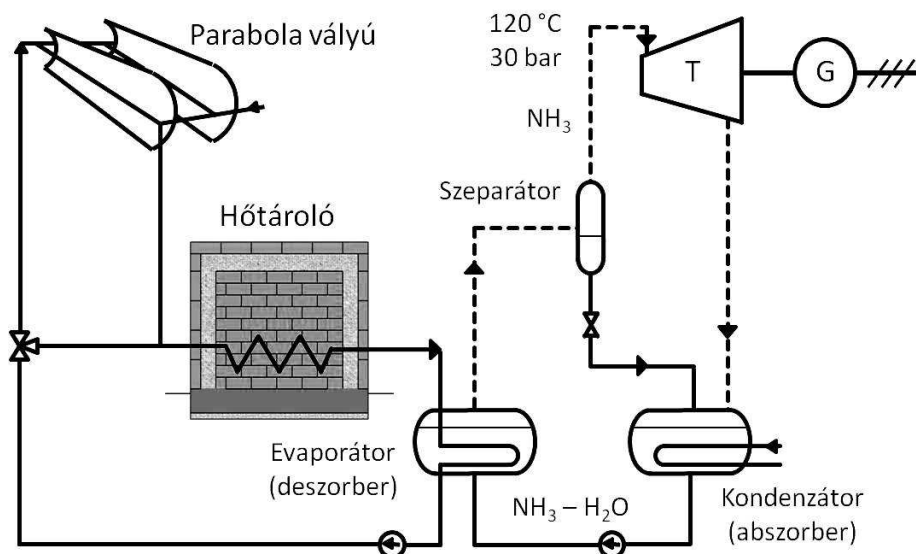
Könnyű belátni, hogy egy tárolót a maximális kapacitását kihasználva érdemes üzemeltetni. Azaz ki kell használni teljesen a megengedett maximális és a megengedett minimális hőmérséklete közötti hőmérsékleti tartományt.

Az alapjellelmzőkből és az üzemeltetési jellemzőkből kell számítással meghatározni a töltési és ürítési jellemzőket, valamint a veszteséget, azaz, az adott körülményekre vonatkozó használati jellemzőket és végül kiválasztani az optimálisat. Nem egyszerű feladat. Nemcsak az x_2 értéke változó, hanem az x_1 értéke is. Ha x_1 értéke állandó lenne és csak x_2 értéke a változó, akkor a probléma leegyszerűsödik optimális hőszigetelő réteg vastagság meghatározásra [8]. Ebben az esetben viszont nincs figyelembe véve, vagy nincs lehetőség figyelembe venni a fajlagos felület változását, ami az egyik legjobb hőszigetelési módszer.

6. Üzemviteli jellemzők megadása

Az üzemviteli jellemzők megadásához kialakított technológiát az 4. ábra mutatja. A direkt napsugárzás fókuszálását és begyűjtését parabola vályúk segítségével végezzük. A tároló henger alakú, a magasság és az átmérő aránya egy ($H/D = 1$), mert ennek a legkisebb a hengeres testek közül a fajlagos felülete. A hőtároló anyag magnezit téglá, kívülről ásványgyapot hőszigeteléssel. Az ásványgyapot hővezetési tényezője a környezeti hőmérséklet és 400°C -ra választott maximális tároló hőmérséklet között a hőmérséklet függvényében változik: $0,038\text{--}0,100 \text{ W/(mK)}$. Ezt a számításoknál figyelembe kell venni és figyelembe is vettük.

A tároló töltésénél a magyarországi napsütési viszonyokat vettük alapul. A töltés egész évben történik, de csak a napsütéses órákban. Az ürítésnél pedig a termokémiai erőmű tervezett üzemviteli igényeit vettük alapul. Az év nyolc hónapjában (márciustól október végéig) havi egyenletes mértékű termelés (ürítés) van. A téli hónapokban (november, december, január, február) a tárolóból ürítés nem történik. Tehát az erőmű csak nyolc hónapot üzemel egy évben, de akkor folyamatosan egyenletes teljesítménnyel. A hőveszteség számításánál szintén a magyarországi időjárási viszonyokat, környezeti hőmérsékleteket vettük alapul.



4. ábra

Fókuszált napenergiát tároló szilárd hőtároló és egy termokémiai erőmű kapcsolata.
Egyszerűsített Kalina ciklusú erőművi séma.

Ezek alapján az üzemviteli jellemzők a következők:

havonként a napsütéses órák száma: [57, 83, 136, 187, 253, 267, 297, 278, 202, 139, 63, 40];
a direkt sugárzás átlagteljesítménye a napsütéses órákban: 400 W/m^2 ;
töltés: egész éven keresztül a napsütéses órákban a 400 W/m^2 -es teljesítménnyel;
a tároló alkalmazási hőmérséklettartománya: $T_{\min} = 130^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 400^\circ\text{C}$, $\Delta T = 270^\circ\text{C}$;
a külső átlaghőmérséklet az egyes hónapokban [$^\circ\text{C}$]: [0, 2, 6, 12, 17, 20, 22, 21, 17, 11, 6, 2];
az ürítés: 8 hónapon keresztül (márciustól október végéig) havi egyenletes mértékű;
a ciklusidő 1 év, novembertől október végéig tart (október végén ürül ki a tároló);
a magnezit téglák térfogati hőkapacitása: $3,54 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$;
az ásványgyapot hővezetési tényezője λ :

400-301 $^\circ\text{C}$ között	0.100 W/(mK) ,
300-201 $^\circ\text{C}$ között	0.070 W/(mK) ,
200-101 $^\circ\text{C}$ között	0.049 W/(mK) ,
$\leq 100^\circ\text{C}$	0.038 W/(mK) ;

a hőátadási tényező α (MSZ 04-140-02): $24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

7. A tároló használati jellemzőinek kiszámítása

Az alapjellemzőkből és az üzemviteli jellemzőkből lehet kiszámolni a tároló használati jellemzőit:

- a töltést (mennyi energiát tudunk beletölteni a ciklusidő alatt),
- az ürítést (mennyi energiát tudunk kinyerni a ciklusidő alatt) és
- a veszteséget (a kettő különbségét).

Néhány általunk választott alapjellemzőjű (x_1 és x_2) tároló használati jellemzőinek értékét, valamint az ebből származtatható egyéb mutatók értékét ismerteti a 2. táblázat. Az eredmény szinte hihetetlen, 90% feletti hatásfok. A számításokat csak numerikus módszerrel lehet elvégezni. Erre egy MATLAB programot (program csomagot) készítettünk. A program és a számítás részletes logikai felépítését itt terjedelmi okokból nem részletezzük. A hőveszteség számításánál, mint azt már említettük a hőszigetelő réteg hővezetési tényezőjének hőmérsékletfüggése mellett természetesen a tároló időben változó belső hőmérsékleteit is figyelembe vettük.

Adott méretű hengeres ($D/H=1$) hőtároló megadott üzemviteli jellemzők melletti éves használati jellemzői és egyéb mutatói

2. táblázat

x_1 [m] – D, H	20			30			40		
x_2 [m] – h_{szig}	0.3	0.6	0.9	0.3	0.6	0.9	0.3	0.6	0.9
$Q_{\text{kapacitás}}$ [PJ]	6.0			20.3			48.0		
$Q_{\text{töltés}}$ [PJ]	32.4	59.0	55.7	190.3	187.1	180.4	468.4	430.5	418.9
$Q_{\text{ürítés}}$ [PJ]	10.3	46.8	48.4	134.7	163.7	165.6	376.6	391.5	393.9
Q_{veszt} [PJ]	22.1	12.2	7.3	55.6	23.4	14.7	91.8	39.0	25.0
hatásfok [%]	31.7	80.4	87.0	70.8	87.5	91.8	80.4	91.0	94.0
teljesítmény [MW]	0.5	2.2	2.3	6.4	7.7	7.8	17.8	18.5	18.6
napmező mérete [m · m]	106 · 106	143 · 143	139 · 139	257 · 257	255 · 255	250 · 250	403 · 403	386 · 386	381 · 381
LCOE [Ft/MJ]*	12.4	3.9	3.7	4.3	3.6	3.5	3.7	3.4	3.4

*290 Ft/€, élettartam: 30 év, diszkontálási ráta: 8%, CO₂ kvóta érték nélkül, földgáz: ≈ 3 Ft/MJ

8. A célfüggvény és a korlátozó feltételek

Az energetikában a különböző technológiák gazdasági összehasonlítására alkalmaznak egy számítási képletet, ami megmondja a villamosenergia teljes előállításának költségét, önköltségi árát. Az angol nyelvű szakirodalomban „levelised cost of energy” LCOE vagy „levelised energy cost” LEC az elnevezése:

$$LEC \text{ vagy } LCOE = \frac{\text{az élettartam alatti összes költség a beruházási költséggel együtt}}{\text{az élettartam alatt kinyert összes energia}}.$$

Ezt a képletet módosítjuk, majd alkalmazzuk célfüggvénynek a mi esetünkre:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_{\text{beruházási},t} + C_{M\&K,t} + C_{\text{biztosítási},t} - C_{\text{széndioxid},t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{\text{ürítés},t}}{(1+r)^t}},$$

$$C_{\text{beruházási}} = C_{\text{terület}} + C_{\text{parabola vályú}} + C_{\text{tároló}},$$

ahol: n – az élettartam [év], $C_{\text{beruházási}}$ – a beruházási költség, $C_{\text{terület}}$ – a földterület ára, $C_{\text{parabola vályú}}$ – a parabola vályú ára, $C_{\text{tároló}}$ – a hőtároló ára, $C_{M\&K}$ – a működési és karbantartási költség, $C_{\text{biztosítási}}$ – az éves biztosítási költség, $C_{\text{széndioxid}}$ – a CO₂ kvóta ára, r – a diszkontálási ráta.

A célfüggvény tényezőinek kiszámításához szükség van a hőtároló használati jellemzőinek meghatározására.

A töltésből lehet kiszámolni a napmező méretét, az ürítés adja meg a termelt energia nagyságát.

Korlátozási feltételeink a méretkorlátozási feltételek. Ennél a példánál: $20\text{m} \leq x_1 \leq 40\text{m}$, $0,3\text{m} \leq x_2 \leq 1\text{m}$, $x_1 + x_2 \leq 40\text{m}$.

Az így meghatározott célfüggvény és a megadott korlátozási feltételek alapján az optimalás elvégezhető.

9. Optimálási eredmények

Az optimálást genetikus algoritmus (GA) segítségével végeztük el [9, 10]. A számításokra MATLAB programcsomagot készítettünk. Az optimáláshoz létrehoztunk 1 generációban 5 populációt és populációnként 20 egyedet. A vizsgálatot, az egyedfejlődést 50 generációra végeztük el. Az eredményeket a 3. táblázat mutatja.

Az optimális értékek

3. táblázat

x_1 D,H [m]	x_2 [m]	$Q_{\text{kapacitás}}$ [PJ]	$Q_{\text{töltés}}$ [PJ]	$Q_{\text{ürítés}}$ [PJ]	hatásfok [%]	teljesítmény [MW]	napmező mérete [m · m]	LCOHE* [Ft/MJ]
38,12	0,94	41,6	363	341	94	16,1	355 · 355	3,42

Irodalmi hivatkozások

- [1] Árpád I.: *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a napenergia-hasznosításban*. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT). XIX. Nemzetközi Gépész Találkozó – OGÉT 2011. Csíksomlyó, 2011. április 28 - május 1, pp.: 31-34.
- [2] Árpád, I.: *Investigation of Sensible Heat Storage and Heat Insulation in the Exploitation of Concentrated Solar Energy*. Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Vol. 39(2), pp. 163-167 (2011).
- [3] Major Gy., et al.: *A napsugárzás Magyarországon*. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványa, 10. szám, Budapest, 1976.
- [4] Barótfi I., et al.: *A napenergia hasznosítása. Energia felhasználói kézikönyv*. Környezettechnikai Szolgáltató Kft., Budapest, 1993.
- [5] Országos Meteorológiai Szolgálat honlapja, Éghajlati adatsorok, www.met.hu
- [6] Szűcs I., Palotás Á. B., Hegman N.: *A sugárzási tényező inhomogenitásának hatása a felületi hőmérséklet eloszlásra tűzálló falazatok termovíziós vizsgálatánál*. Anyag és kohómérnöki tudományok, Kutatási jelentés, Miskolc, 2000.
- [7] Tamás F., et al.: *Szilikátipari kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [8] Timár, I., Árpád, I.: *Csővezetékek hőszigetelésének optimalizálása*. Energiagazdálkodás, XXVII. évf. 10. sz., 1986, p.: 449-455.
- [9] Polheim, H.: *Evolutionäre Algorithmen*, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [10] Timár, I.: *Az optimális méretezés műszaki alkalmazásai*. Magyar nyelvű szakelőadások. Kolozsvári Műszaki Egyetem, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Kolozsvár, 2002.