





Pannon Egyetem

Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

# **ENERGETIKAI BERENDEZÉSEK HŐSZIGETELÉSÉNEK OPTIMÁLÁSA**

A HŐTÁROLÁS KÉRDÉSEI A NAPENERGIA HASZNOSÍTÁSBAN

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Készítette:

**Árpád István**

okleveles vegyészmérnök

Témavezető:

**Dr. habil Timár Imre**

egyetemi tanár

Pannon Egyetem Gépészmérnöki Intézet, Veszprém  
2013.

**ENERGETIKAI BERENDEZÉSEK HŐSZIGETELÉSÉNEK OPTIMÁLÁSA**  
**A HŐTÁROLÁS KÉRDÉSEI A NAPENERGIA HASZNOSÍTÁSBAN**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

**Árpád István** okl. vegyészmérnök

Készült a Pannon Egyetem Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája  
keretében

Témavezető: **Dr. Timár Imre** egyetemi tanár

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton .....%-ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: ..... igen /nem

.....  
(aláírás)

Bíráló neve: .....igen /nem

.....  
(aláírás)

\* Bíráló neve: .....igen /nem

.....  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém,

.....  
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDHT elnöke

Megjegyzés: az \* esetleges

# KIVONATOK

## I. KIVONAT

A disszertáció a napsugárzás termikus hasznosításához kapcsolódóan a hőtárolók fajlagos hőveszteség csökkentésének lehetőségét vizsgálja. Kutatási cél volt választ kapni arra a kérdésre:

*„Hogyan csökkenthetjük a hőtárolók hőveszteségét?*

*Az eredmények alapján megfogalmazható-e a műszaki gyakorlatban alkalmazható új tervezési javaslat?”*

A Szerző a kutatási munka során elemezte a testek hűlését befolyásoló tényezőket, majd meghatározta a testek hűlési (melegedési) sebességének a test fajlagos felületétől való függését, amelyet számítással és a Newton-féle átadási egyenlet segítségével matematikailag is igazolt.

Ennek ismeretében megfogalmazta, hogy a hőtárolók fajlagos hőveszteségét kétféleképpen lehetséges csökkenteni:

- termikus ellenállás (hőszigetelő anyag) alkalmazásával és
- a fajlagos felület csökkentésével, ami nem csak a mértani test alakjától, hanem a méretétől is függ.

A mérettől függő fajlagos felület hőcserét meghatározó fontosságának felismerése átírta a hőtároló és a hőszigetelés tervezését is. Ezért a Szerző kidolgozta a hőtároló fajlagos hőveszteségére vonatkozó, gazdaságilag optimális megoldást nyújtó új tervezési módszerét, ahol a mérettől függő fajlagos felület, a szigetelőanyag rétegvastagságával együtt, mint tervezési változó szerepel.

Ehhez a Szerző műszakilag jellemzi a hőtárolót, meghatározza az alap-, az üzemviteli és a használati jellemzőit. Kidolgozza, hogyan számíthatóak ki numerikusan a tároló alap- és üzemviteli jellemzőiből a használati jellemzői, a töltés, az ürítés és a veszteség.

Végül a disszertáció bemutat egy sikeres genetikus algoritmust alkalmazó, a hőtároló fajlagos hőveszteségére vonatkozó tervezést, aminek az eredménye a gazdasági szempontból optimális hőtároló méretének és a hozzá tartozó szigetelőanyag rétegvastagságának a meghatározása.

## **II. ABSTRACT**

The dissertation investigates the possibility of reducing the heat losses of the thermal energy storages in the exploitation of concentrated solar energy.

The author analyzes the cooling of bodies and determines dependence of the rate of cooling on the specific (relative) surface of bodies then proves this fact by calculation and by Newton's law of cooling. Against this background, the author states the specific (relative) heat loss of the storage shall be reduced. The relative heat loss might be reduced in two ways.

- On the one hand by applying heat insulation material.
- On the other hand by reducing the specific surface which depends not only on the shape but also on the size. The enlargement of storage's size reduces its specific surface and simultaneously reduces its specific heat loss.

This paper analyses the characters of heat storage container for the heat losses oriented design and defines the basic, the operating and using characters of heat storage container. Finally the dissertation shows an example of the sensible heat storage's optimal design in the exploitation of concentrated solar energy.

## **III. AUSZUG**

Die Dissertation untersucht die Möglichkeit der Reduzierung der Wärmeverluste der Wärmespeicher in der Nutzung von konzentrierter Sonnenenergie.

Der Autor analysiert die Kühlung von Körpern und bestimmt Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit auf die spezifische (relative) Oberfläche von Körpern. Dann beweist diese Tatsache durch Berechnung und durch das Newton'sche Abkühlungsgesetz. Vor diesem Hintergrund erklärt der Autor, daß der spezifische (relative) Wärmeverlust des Speichers reduziert werden soll. Der relative Wärmeverlust kann auf zwei Arten reduziert werden.

- Auf der einen Seite könnte es durch die Anwendung von Wärmeisoliermaterial erfolgen.
- Auf der anderen Seite könnte es durch Verringern der spezifischen Oberfläche, die nicht nur von der Form, sondern auch von der Größe abhängig gemacht werden. Erhöhen von der Größe des Wärmespeichers reduziert seine spezifische Oberfläche und reduziert gleichzeitig seinen spezifischen Wärmeverlust.

Die Dissertation charakterisiert die Wärmespeicher für Wärmeverluste orientiertes Design und definiert seine Basis-, Betriebs- und Verwendungsparameters. Schließlich zeigt die Dissertation ein Beispiel von optimal design des Wärmespeichers in der Nutzung von konzentrierter Sonnenenergie.

# TARTALOMJEGYZÉK

KIVONATOK .....	IV
I. KIVONAT .....	IV
II. ABSTRACT .....	V
III. AUSZUG .....	V
TARTALOMJEGYZÉK .....	VI
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE .....	IX
RÖVIDÍTÉSEK.....	XII
1. BEVEZETÉS.....	1
2. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ .....	3
2.1 A HŐTERJEDÉS ÉS A HŐTÁROLÁS .....	3
2.1.1 A hővezetés.....	5
2.1.1.1 Állandósult állapotú hővezetés szilárd testekben.....	8
2.1.1.2 Nem állandósult állapotú hővezetés szilárd testekben .....	11
2.1.1.3 Kritikai észrevétel az irodalomban található hűlési folyamat leírásához.....	16
2.1.2 A hőátadás.....	18
2.1.3 A hőszigetelés.....	20
2.1.4 A hőátvezetés .....	25
2.1.5 A hőkapacitás.....	27
2.2 A HŐSZIGETELŐ ANYAGOK .....	28
2.3 A NAPENERGIA TERMIKUS HASZNOSÍTÁSA.....	33
2.3.1 A napenergia hasznosítás elméleti háttere .....	33
2.3.2 A napenergia energetikai célú hasznosításának módszerei .....	40
2.3.3 A hőátvezetés .....	43

2.3.3.1	Az érzékelhető hőtárolás .....	44
2.3.3.2	Hőtárolás látens (rejtett) hőben .....	47
2.3.3.3	Hőtárolás reverzibilis termokémiai folyamattal, a kémiai kötési energiában.....	48
2.3.3.4	A hőtárolók szerkezeti (konstrukciós) kialakítása.....	48
2.3.3.5	A hőtárolók működési koncepciója .....	53
2.3.3.6	A tárolási idő .....	54
2.3.3.7	Észrevételek a napenergia hasznosításban alkalmazott hőtárolási módszerekről .....	56
2.4	A GAZDASÁGOS TERVEZÉS, AZ OPTIMÁLÁS .....	56
2.4.1	A genetikus algoritmus (GA).....	58
2.4.1.1	A GA alapfogalmai.....	58
2.4.1.2	A GA műveletei.....	61
2.4.1.3	A GA működési folyamata az evolúció.....	64
3.	KUTATÁSI RÉSZ .....	66
3.1	A DIREKT SUGÁRZÁSBÓL SZÁRMAZÓ HAZAI NAPENERGIA POTENCIÁL MEGHATÁROZÁSA ÉS ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA ..	66
3.1.1	A direkt napsugárzás fajlagos területigényeinek összehasonlító vizsgálata ...	69
3.1.2	Következtetések .....	73
3.2	ANYAGOK HŐTÁROLO KÉPESSÉGÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA .....	74
3.3	CSALÁDI HÁZ ÉVES HŐIGÉNYÉNEK BIZTOSÍTÁSA NAPENERGIÁVAL.	76
3.3.1	A tervezési alapok.....	76
3.3.2	A hőtárolás módja és a hőtárolás mérete .....	78
3.3.3	A hőszigetelő-réteg vastagságának és a tároló hőveszteségének értékei .....	80
3.3.4	Következtetések .....	87

3.4	A HŰLÉS (MELEGEDÉS) SEBESSÉGÉNEK FÜGGÉSE A FAJLAGOS FELÜLETTŐL.....	89
3.5	A HŐTÁROLÓ JELLEMZÉSE A FAJLAGOS HŐVESZTESÉG CSÖKKENTÉSÉNEK SZEMPONTJÁBÓL .....	94
3.5.1	A hőtároló és hőszigetelésének jellemzése .....	95
3.5.1.1	A tároló alap- és üzemviteli jellemzőinek meghatározása .....	95
3.5.1.2	A tároló használati jellemzőinek meghatározása az alap- és az üzemviteli jellemzőkből .....	96
3.5.2	Számítási mintapélda megadott alap és üzemviteli jellemzőkkel rendelkező tároló használati jellemzőinek meghatározására.....	102
3.5.3	Következtetések .....	104
3.6	AZ ÚJ SZEMPONTÚ TERVEZÉSEN ALAPULÓ OPTIMÁLIS MÉRETEZÉS	106
3.6.1	A célfüggvény és a korlátozó feltételek megfogalmazása.....	107
3.6.2	A számítás és az optimális eredmények.....	109
3.6.3	Következtetések .....	111
4.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	112
5.	IRODALOMJEGYZÉK .....	114
	TÉZISEK.....	XIV
	THESES.....	XV
	A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI.....	XVI
	A SZERZŐ ELŐADÁSAI .....	XVIII
	KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS .....	XXI
	FÜGGELÉK .....	XXII

# JELÖLÉSEK JEGYZÉKE<sup>1</sup>

*Latin betűk:*

- a a hődiffúziós (hőmérséklet-eloszlási) tényező [ $\text{m}^2/\text{s}$ ];
- c a fénysebesség, vákuumban ill. levegőben  $\approx 300.000 \text{ m/s}$ ;
- $c_p$  a fajhő (a tömegegység hőkapacitása) állandó nyomáson [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ];
- $c_V$  a fajhő (a tömegegység hőkapacitása) állandó térfogaton [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ];
- $c_p^m$  állandó nyomáson a moláris hőkapacitás [ $\text{J}/(\text{mólK})$ ];
- $c_V^m$  állandó térfogaton a moláris hőkapacitás [ $\text{J}/(\text{mólK})$ ];
- $c_p^{\text{térfogati}}$  állandó nyomáson a fajlagos térfogati hőkapacitás [ $\text{kJ}/(\text{dm}^3\text{K})$ ];
- i index (pozitív egész szám);
- m tömeg [kg]; a hűlés mértéke [1/s]
- n rétegek száma; index (pozitív egész szám); élettartam [év], dimenzió száma;
- $\underline{\dot{q}}$  a hőáramsűrűség [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], vektoriális mennyiség;
- $\underline{\dot{q}}_0$  a szilárd test felületi hőáramsűrűsége [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], vektoriális mennyiség;
- $\underline{\dot{q}}_a$  az átadási hőáramsűrűség [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], vektoriális mennyiség;
- $\underline{\dot{q}}_s$  a sugárzási hőáramsűrűség [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], vektoriális mennyiség;
- $\underline{\dot{q}}_v$  a vezetési hőáramsűrűség [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], vektoriális mennyiség;
- r sugár illetve távolság [m]; diszkontálási ráta [%];
- x a helykoordináta [m];
- A a felület [ $\text{m}^2$ ];
- $A_0$  a sugárzó test felülete [ $\text{m}^2$ ];
- C konstans; költség [Ft]; hőkapacitás [J]
- $C_0$  az abszolút fekete test sugárzási tényezője
- $C_p^V$  a test állandó nyomáson vett térfogati hőkapacitása [J]
- E energia [J];
- $E_0$  a magenergia energia, a nullponti energia [J];

---

<sup>1</sup> [123] Szabvány figyelembe vételével.

$E_k$  a kinetikus energia [J];  
 $E_p$  a potenciális energia [J];  
 $E^a$  az abszorbeált energia mennyisége [J];  
 $E^e$  a kibocsátott (emittált) energia mennyisége [J];  
 $E^r$  a visszavert (reflektált) energia mennyisége [J];  
 $E^t$  az áteresztett (transzmissziós) energia mennyisége [J];  
 $F$  a szabadenergia [J];  
 $G$  a szabadentalpia [J];  
 $G_h$  a belső hőforrás (v. nyelő) [ $W/m^3$ ];  
 $H$  az entalpia [J];  
 $LCOE$  az előállított villamosenergia ill. hőenergia önköltségi ára [ $Ft/kWh$ ] ill. [ $Ft/MJ$ ];  
 $M$  a móltömeg [ $kg/mól$ ];  
 $R$  az egyetemes gázállandó,  $8,314 J/(mólK)$ ;  
 $R_a$  a hőátadás termikus ellenállása [ $m^2K/W$ ];  
 $R_s$  a hőszugárzás termikus ellenállása [ $m^2K/W$ ];  
 $R_v$  a hővezetés termikus ellenállása [ $m^2K/W$ ];  
 $T$  az abszolút hőmérséklet [K];  
 $T_f$  a fluidum hőmérséklete [K];  
 $T_{test}$  a szilárd test hőmérséklete [K];  
 $T_w$  a fal felületi hőmérséklete [K];  
 $T_{w,i}$  a fal belső felületi hőmérséklete [K];  
 $T_{w,o}$  a fal külső felületi hőmérséklete [K];  
 $U$  a belső energia [J];  
 $Q$  a hő, az energiacsere mértéke [J];  
 $Q^{p=áll.}$  állandó nyomáson a hő, az energiacsere mértéke [J]  
 $\dot{Q}$  a hőáram, az energiaáram [W];  
 $\dot{Q}_a$  az átadási hőáram, az átadási energiaáram [W];  
 $\dot{Q}_s$  a sugárzási hőáram, a sugárzási energiaáram [W];  
 $\dot{Q}_v$  a vezetési hőáram, a vezetési energiaáram [W];

*Görög betűk:*

- $\alpha$  a hőátadási tényező [W/(m<sup>2</sup>K)];
- $\alpha_s$  a sugárzásos hőátadási tényező [W/(m<sup>2</sup>K)];
- $\delta$  a falvastagság [m];
- $\delta_{\text{term}}$  hőátadásnál a termikus határréteg vastagsága [m];
- $\varepsilon$  fajlagos emissziós tényező;
- $\theta$  túlhőmérséklet [K];
- $\bar{\theta}_A$  a szilárd test felületi átlag túlhőmérséklete [K];
- $\bar{\theta}_V$  a szilárd test térfogati átlag túlhőmérséklete [K];
- $\lambda$  a hővezetési tényező [W/(mK)]; illetve az EMH hullámhossza [m];
- $\nu$  az EMH frekvenciája [1/s];
- $\xi$  a geometriai hasonlóság kritériuma;
- $\rho$  a sűrűség [kg/m<sup>3</sup>];
- $\sigma$  a Stefan-Boltzmann-féle állandó,  $5,6697 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>), az abszolút fekete test sugárzása;
- $\tau$  az idő [s];
- $\varphi$  a sugárzás felületi normálisához mért beesési szöge;
- $\psi$  a hőmérsékleti mező egyenlőtlenségi kritériuma;

*Dimenzió nélküli számok:*

- Bi Biot-szám =  $\frac{\alpha l}{\lambda_{\text{test}}}$ ;
- Fo Fourier-szám =  $\frac{a \tau}{l^2}$ ;
- Nu Nusselt-szám =  $\frac{\alpha l_0}{\lambda_f}$

## RÖVIDÍTÉSEK

<i>Magyar nyelvű</i>		CSP	Concentrating Solar Power
n. a.	nincs adat	CST	Concentrated Solar Thermal
GA	Genetikus Algoritmus	CTES	(Rock) Cavern Thermal Energy Storage
EMH	Elektromágneses hullám	DH	District Heating
FVA	Fázisváltó anyag	DHW	Domestic Hot Water
HMV	Használati melegvíz	DTES	Duct Thermal Energy Storage
HSzK	Hőszállító közeg	ESSS	Eutectic Salt Storage System
HTA	Hőtároló anyag	FES	Flywheel Energy Storage
SZET	Szivattyús energiatároló	HES	Hydrogen Energy Storage
<i>Angol nyelvű</i>		HSM	Heat Storage Material
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage	HTF	Heat Transfer Fluid
BES	Battery Energy Storage	HT-UTES	High Temperature Underground Thermal Energy Storage
BHE	Borehole Heat Exchanger	HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
BHS	Bond Heat Storage	LCC	Life-Cycle Cost
BTES	Borehole Thermal Energy Storage	LCOE	Levelized Cost of Electricity
CEAS	Compressed Air Energy Storage	LEC	Levelized Electricity Cost
CHP	Central Heating Plant	LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
CWSS	Chilled Water Storage System	PCES	Phase Change Energy Storage
CRS	Central Receiver System	PCM	Phase Change Material
CSHPSS	Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage	PHES	Pumped-Hydroelectric Energy Storage

PTES	Pit Thermal Energy Storage	SSS	Snow Storage System
PSH	Pump Storage Hydroelectric	STES	Solar Thermal Energy Storage,
PV	Photovoltaic		Seasonal Thermal Energy
SCES	Supercapacitor Energy Storage		Storage
SDHW	Solar Domestic Hot Water	STTP	Solar Thermal Power Plant
SEGS	Solar Electric Generating System	TCM	Thermochemical Material
SES	Sorption Energy Storage	TCS	Thermochemical Storage
SHS	Sensible Heat Storage	TES	Thermal Energy Storage
SHSM	Sensible Heat Storage Material	TRT	Thermal Response Test
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	UTES	Underground Thermal Energy Storage
		UPHS	Underground Pumped- Hydroelectric Energy Storage

# 1. BEVEZETÉS

*„A megfigyelések alapján felállítani az elméletet,  
az elmélet segítségével helyesbíteni a megfigyeléseket,  
ez az igazság keresésének legjobb módja.”*

M. V. Lomonoszov

A Doktori Iskola keretein belül az „Energetikai berendezések hőszigetelésének optimalálása” kutatási témát választottam. **Kutatási cél** volt a napsugárzás termikus hasznosításához kapcsolódóan választ kapni arra a kérdésre:

*„Hogyan csökkenthetjük a hőtárolók hőveszteségét?  
Az eredmények alapján megfogalmazható-e a műszaki gyakorlatban alkalmazható új  
tervezési javaslat?”*

Ha ez lehetséges, akkor milyen természettudományos elvek alapján? A hazai napsugárzási viszonyok megfelelőek-e a tárolóval segített hasznosításra, azaz eltehető-e a nyári nap melege télire?

Abból az ismert természeti jelenségből, **megfigyelésből** indultam ki, hogy a meleg beköszöntével a hóember, a nagy hókupac olvad el utoljára. A nagy hókupac hűlési sebessége kisebb, mint a környező vékonyabb hórétegé. Mi az oka ennek? Felhasználható-e ez a megfigyelés a fordított hőterjedési folyamatra, a meleg hőtároló hűlésének lassítására?

A természeti jelenséget megmagyarázó **hipotézisem** az volt, hogy a testek és a környezetük közötti energiacsere a mértékét a testen belüli hőterjedés (beleértve az esetleg alkalmazott hőszigetelésen belüli hőterjedést is), valamint a test és környezete közötti hőátadási tényező mellett a testek felületének a mérete is befolyásolja, mert az energiacsere a testek felületén, a két rendszer (a test és a környezet) közötti „áramlási” keresztmetszeten keresztül megy végbe. Ha ez a keresztmetszet (a felület) a test méreteihez (térfogatához) képest kicsi, azaz ha kicsi a fajlagos felület, akkor hiába nagy az energiacsere intenzitása, fluxusa a felületen, a felületen végbemenő folyamatok hatása mégis kicsi lesz a test egészéhez viszonyítva. Így lehetséges, hogy a hőterjedés sebességét nem csak a test belső hőellenállása (és a szigetelés hőellenállása), hanem adott hőátadási tényező mellett a test felületének mérete is akadályozza. Bizonyos fajlagos felület alatt már a test felülete is az energiacsere sebességét befolyásoló tényezővé válik.

Igazolható-e ez a hipotézis? **Igazolásként** első lépésben számítási példán keresztül igazoltam az elmélet helyességét, amikor egy családi ház évi teljes hőellátásának biztosítását vizsgáltam meg a hazai direkt napsugárzásból nyert energia – hőtároló segítségével történő – felhasználásával. Második lépésben pedig megvizsgáltam a lehülési törvényt, majd levezettem a testek hűlési sebességének függését a test fajlagos felületétől. Mivel a fajlagos felület nem csak a test alakjától, hanem a méretétől is függ, a test méretének növelésével csökken a test fajlagos felülete, ezzel együtt csökken a test fajlagos hővesztesége (vagy hőfelvétele) is, végső soron a méret növelésével csökkenteni lehet a test hűlésének (vagy felmelegedésének) sebességét. A lehülési törvény új alakjának felírása és a disszertációban bemutatott számítási eredmények igazolják a hipotézis helyességét.

A fajlagos felület fontosságának kimutatásával egy új szempont került be a hőtároló és hőszigetelésének tervezésébe. Az új szempont a mérettől függő fajlagos felület. Ilyen tervezés, tervezési szempont a szakirodalomban ez idáig nem szerepelt. Ezért kidolgoztam a hőtároló új szemléletű tervezési módszerét, ahol a mérettől függő fajlagos felületet tervezési változóként szerepeltettem. A tervezéshez szükséges volt műszakilag jellemezni a hőtárolót. Meghatároztam az alap-, az üzemviteli és a használati jellemzőit, majd numerikus számítási módszert dolgoztam ki a használati jellemzők (a töltés, az ürítés és a veszteség) alap- és üzemviteli jellemzőkből történő meghatározására.

Végül az ismeretek összessége alapján bemutatok egy sikeres, genetikus algoritmust alkalmazó, a fókuszált napenergia hasznosításához kapcsolódó optimális hőtároló tervezést, amelynek során meghatározom az optimális szigetelőréteg vastagságot is.

## 2. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A kutatási munkához szükséges elméleti ismeretek szakirodalomra támaszkodó áttekintésekor 3 témakört is szükséges érinteni:

1. a műszaki hőtan ide vonatkozó elméletét,
2. a napenergia termikus hasznosításának irodalmi áttekintését, kiemelten a fókuszált napenergiára és a hőtárolásra, végül pedig
3. az optimalás áttekintését, főleg az általam is alkalmazott genetikus algoritmus és a gazdaságos tervezés módszerét.

Az egyes témaköröknek önállóan is olyan nagy az irodalma, hogy ismertetésüknél a teljességre való törekvés és kiértékelés meghaladná e dolgozat kereteit, ezért csak a kutatási munkához szükséges természettudományi ismereteket, törvényeket és technológiai trendeket igyekszem röviden összefoglalni és értékelni.

### 2.1 A HŐTERJEDÉS ÉS A HŐTÁROLÁS

Mivel a dolgozatban energiáról van szó, nagyon fontosnak tartom a termodinamikai megközelítést, a termodinamikai szemlélet alkalmazását. A fogalmak helyes értelmezését és az ennek megfelelő szóhasználatot. Sajnos az a tapasztalatom, hogy az ipari gyakorlatban elterjedten használnak olyan kifejezéseket, amelyek jelentését sokan valójában nem ismerik, illetve nem helyesen ismerik. Ilyen például a „hőenergia”. Ezért szeretném e dolgozatban is kiemelni, hogy a hő nem energia. A hő a hőmérsékletkülönbség hatására létrejött energiacsere mértéke. Mértékegysége természetesen azonos az energia mértékegységével [J].

A termodinamika 1. főtétele, az energia megmaradás tétele szerint:

*„A rendszer belső energiája mindaddig állandó, míg azt munkavégzés vagy hő meg nem változtatja.”[11]*

A rendszer belső energiáját csak a munkavégzés és/vagy a hő tudja megváltoztatni:

$$dU = \delta Q + \delta W , \quad (2.1-1)$$

ahol a  $dU$  a rendszer belső energiájának változása,  $\delta Q$  az infinitezimális hő (a hőcsere  $\delta$ -val jelölve, ezzel utalva arra, hogy nincs teljes differenciálja),  $\delta W$  pedig a rendszer által vagy a rendszeren végzett munka. A (2.1-1) egyenlet a termodinamika fundamentális egyenlete [9, 11, 56, 63, 104, 113, 175].

Véges mennyiségekkel felírva a (2.1-1) egyenlet:

$$\Delta U = Q + W. ^2 \quad (2.1-2)$$

A hő tehát két vagy több rendszer között lejátszódó energiacsere útfüggvénye. Ezért kerülni fogom a „hőenergia” kifejezést, bár nem mondom, hogy használata helytelen lenne, amennyiben a hőmérséklet-különbség hatására létrejött energiacsereét értjük alatta. Az energiatartalom kifejezésére azonban a belső energia (U), illetve a rendszer energia változásának kifejezésére, az intenzív állapotjelzők viszonyaitól függően, az ismert energiafüggvények az alkalmasak:

- az entalpia (H), amely az izobar folyamatok energiafüggvénye,
- a szabadenergia (F), amely az izoterm folyamatok energiafüggvénye és
- a szabadentalpia (G), amely az izobar és egyben izoterm folyamatok energiafüggvénye [11, 63, 102, 113, 136].

A dolgozatban vizsgált szilárd hőtároló állandó légköri nyomáson (izobar), de változó hőmérsékleten működik, ezért az energiatartalom megváltozásának jellemzésére az entalpia (H) alkalmazása a helyénvaló.

A „hőmennyiség” kifejezés alkalmazása is csak olyan értelemben fogadható el, hogy az szintén a rendszerek közötti, a hőmérsékletkülönbség hatására létrejött energiacsere mértékét jelzi, illetve adja meg. Hőmennyiséget definiálni ugyanis egy rendszeren belül lehetetlen. Az anyagi halmazoknak (rendszereknek) belső energiája van.

Az anyagi halmazok (rendszerek) munkavégző vagy hőleadó képessége mindig a környezettől függ. A rendszer azon belső energiamennyiségét, amely munkavégzésre vagy hőleadásra képes, a környezet függvényében definiálható, határozható meg. Ez pedig nem más, mint az exergia [83, 140, 141, 157, 171].

Ilyen értelemben a hőtárolásunk sem más, mint a rendszer exergiájának megőrzése és a számunkra kedvező időben, ütemben történő kinyerése.

A termodinamika 2. főtétele, az energia eloszlás, az energia szétszóródás tétele, a legvalószínűbb állapot felvételére való törekvés vagy másképpen az egyensúlyra való törekvés törvénye. E szerint valamely rendszer két különböző hőmérsékletű része között mindig hőmérséklet kiegyenlítődési folyamat indul meg, a nagyobb hőmérsékletű helyről a

---

<sup>2</sup> Valójában  $w = \sum_i w_i$ , azaz a rendszeren vagy a rendszer által végzett különböző munkafajták (térfogati, kémiai, határfelületi, mechanikai, elektromos, stb.) összege.

kisebb hőmérsékletű helyre energia áramlik át. Ezért a környezet hőmérsékletétől függően a különböző hőmérsékletű műszaki berendezések, létesítmények hővesztesége igen jelentős lehet. A berendezések, létesítmények gyártásánál (tervezésénél, kivitelezésénél) nagy szerepet kap a hőszigetelés is.

A hőszigetelés célja a tér két vagy több különböző hőmérsékletű része között az energiacsere akadályozása. Ahhoz viszont, hogy az energiacsere gátoljuk, ismernünk kell az energiacsere mechanizmusokat [8, 44, 62, 74, 86, 88, 90, 101, 104, 108, 121, 132, 133, 194]. A hagyományos csoportosítás szerint a hőmérséklet-különbség hatására létrejött energiacsere három alapesetét különböztetjük meg. Ezek a következők: a hővezetés, a hőátadás és a hőszugárzás.

### 2.1.1 A hővezetés

A hővezetés (vagy kondukciónak is nevezik) az energiacsere azon formája, amikor a hőmérséklet-különbség hatására energia jut el az anyag melegebb (magasabb hőmérsékletű) részeiből a hidegebb (alacsonyabb hőmérsékletű) részekre anélkül, hogy az anyagi részecskék az egymáshoz képest elfoglalt helyzetüket megváltoztatnák. E feltétel miatt tiszta hővezetésről általában csak szilárd testekben beszélhetünk, mert az anyagi részecskék a hőmérséklet-különbség hatására normális körülmények között folyékony és légnemű anyagban helyükről elmozdulnak. Persze a más energiaátadási módok mellett a laminárisan áramló folyadékokban vagy nyugvó folyadékokban és nyugvó gázokban is létezik vezetési energiátadás.

Fourier szerint a vezetési (konduktív) hőáram sűrűsége [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] a hőmérséklet-gradienssel arányos:

$$\underline{\dot{q}}_v = -\lambda \text{ grad } T, \quad (2.1.1-1)$$

ahol az arányossági tényező, a  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{mK})$ ] hővezetési tényező, anyagtól és hőmérséklettől függő érték. A vezetési hőáramsűrűség vektor a negatív irányba mutat, azaz a csökkenő hőmérséklet irányába. Ezt jelzi a (2.1.1-1) egyenletben a negatív előjel.

Állandó nyomáson a szilárd test térfogategységének időbeli entalpiaváltozása a következő formulával írható le (csak vezetési energiáram van)

$$\frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + G_h,$$

ahol az egyenlet bal oldala a térfogategység entalpiájának időbeli változása, a jobb oldalának

első tagja a vezetéssel végbement energiacsere mértéke, második tagja a forrás/nyelő által keletkezett/elnyelt entalpia mértéke. Az egyenletben szereplő  $\rho$  az anyag sűrűsége [ $\text{kg/m}^3$ ],  $c_p$  a fajhő állandó nyomáson [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ], amelyeket az egyszerűség kedvéért a hőmérséklettől függetlennek veszünk,  $G_h$  a belső hőforrás [ $\text{W/m}^3$ ]. Átrendezve az egyenletet kapjuk, hogy:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c_p \cdot \rho} \cdot \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + \frac{G_h}{c_p \cdot \rho}. \quad (2.1.1-2)$$

Az egyenlet bal oldala a hőmérséklet időbeli lokális megváltozását fejezi ki.

Ha a  $\lambda$  hőmérséklet-függetlensége feltehető ( $\lambda = \text{állandó}$ ), valamint a fajhőt és a sűrűséget továbbra is konstansnak tekintjük, akkor a (2.1.1-2) differenciális energiamérleg egyenlet a következő módon alakul:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{G_h}{c_p \cdot \rho}, \quad (2.1.1-3)$$

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \quad (2.1.1-4)$$

a szilárd test hődiffúziós vagy hőmérséklet-vezetési tényezője [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] [9, 90, 93, 98, 121].

Ha továbbá feltételezzük azt is, hogy a rendszerben nincs energiaforrás vagy nyelő ( $G_h = 0$ ), akkor az ismert Fourier-féle hővezetési differenciálegyenlethez jutunk:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T. \quad (2.1.1-5)$$

A különböző geometriák esetén érvényes hővezetési egyenletekhez két úton lehet eljutni. Az egyik, hogy koordináta transzformációval olyan koordináta rendszerre térnek át, amelyben az adott eset jobban kezelhető. A másik, hogy magát a hővezetési egyenletet fogalmazzák meg újra az adott koordináta rendszerben. A második utat követve felírható a hővezetés egyenlete gömbszimmetrikus (háromdimenziós) terjedés esetén gömbi koordináta rendszerben, kétdimenziós szimmetrikus terjedés esetén henger koordináta rendszerben és egydimenziós terjedési esetre (végtelen sík fal esete). A felírt egyenletek alapján pedig megfogalmazható a hővezetés általánosított egyenlete is:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n-1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.1.1-6)$$

ahol  $T$  a testen belül egy adott helyen a hőmérséklet,  $r$  a test középpontjától (szimmetria pontjától, szimmetria tengelyétől) vett távolság,  $n$  pedig a dimenziót jelenti. Egydimenziós

vezetési esetén  $n = 1$ .

A (2.1.1-3) egyenlet a hőmérséklettér időbeli változását írja le. Az egyenletet egyszerű felírni, de a legtöbb gyakorlati esetben nehéz megoldani. Analitikai megoldása még akkor is meglehetősen nehézkes, amikor a rendszer forrásmentes (2.1.1-5), hiszen végül is négy független változót (a három helykoordináta és az idő) tartalmazó parciális differenciálegyenlet megoldásáról van szó. Sok esetben a hővezetési problémák magasabb szimmetriával bíró rendszerek hővezetési problémájaként merülnek fel. Ilyen rendszerekben a szimmetriák miatt a független változók száma csökkenthető [9]. Más esetekben viszont bonyolódik a helyzet, ha a  $\lambda$  hővezetési tényező és a  $\rho$  sűrűség értékét nem tekinthetjük mindig állandónak, hiszen ezek hőmérséklet-függése közismert. Ilyen esetekben az analitikus megoldás már lehetetlen, de természetesen a valóságot megközelítő számítások numerikus úton ilyenkor is elvégezhetőek.

Mivel a bemutatott (2.1.1-5) illetve (2.1.1-6) differenciálegyenlet egy általános leírást ad meg, az egyes esetekre történő megoldásnál az egyértelműség miatt a megoldáshoz felhasznált valamennyi matematikai leírást meg kell adni. Ezek az egyértelműségi feltételek:

- a geometriai feltételek,
- a fizikai feltételek,
- a határfeltételek (peremfeltételek) és
- az időbeli feltételek.

A (2.1.1-5) Fourier-féle hővezetési differenciálegyenletet irodalom által bemutatott megoldásainál az alábbi peremfeltételeket alkalmazzák [9, 90, 94, 95, 108, 121, 131, 160]:

*(1) Elsőfajú peremfeltétel*

Minden időpontban ismerjük a test felületén a hőmérséklet-eloszlást (csak a felületen ismerjük, nem a tér minden pontján):

$$T_w = f(x, y, z, \tau), \quad (2.1.1-7)$$

ahol  $T_w$  a test felületi hőmérséklete [K],  $x, y, z$  a felületi helykoordináták [m],  $\tau$  az idő [s].

*(2) Másodfajú peremfeltétel*

Minden időpontban ismert a test felületén a hőáramsűrűség-eloszlás:

$$\dot{q}_w = f(x, y, z, \tau), \quad (2.1.1-8)$$

ahol  $\dot{q}_w$  test felületén egy adott pontban a hőáramsűrűség [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

### (3) Harmadfajú peremfeltétel

Ismert a test felületén a konvekciós hőcsere mértéke, amit a Newton-féle hőátadási törvény alapján az alábbi végső formában adnak meg:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right)_w = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_w - T_f), \quad (2.1.1-9)$$

ahol az egyenlet bal oldala a hőmérsékleti görbének a test felületén a felületelem normálisával alkotott hajlásszöge, az  $\alpha$  a hőátadási tényező a test felülete és a környezet között [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ], a  $\lambda$  a hővezetési tényező a testen belül [ $\text{W}/(\text{mK})$ ],  $T_f$  a testet körülvevő közeg (fluidum) hőmérséklete [ $\text{K}$ ].

A (2.1.1-9) peremfeltétel értelmében a test egységnyi felületéről időegység alatt távozó hőmennyiség megegyezik a test belsejéből hővezetéssel áramló hő mennyiségével. A hőmérsékleti görbe felületi meredekségét megadó  $\alpha/\lambda$  hányadost relatív hőátadási tényezőnek nevezik [ $1/\text{m}$ ], amely független a felület alakjától [121].

### (4) Negyedfajú peremfeltétel

Negyedfajú peremfeltételről akkor beszélünk, amikor a test és a környezete közötti energiacsere hővezetés útján megy végbe, feltételezve azt, hogy az érintkező felületek hőmérséklete az adott pontban azonos (ideális érintkezés):

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} \right)_0 = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} \right)_0. \quad (2.1.1-10)$$

#### 2.1.1.1 Állandósult állapotú hővezetés szilárd testekben

*Állandósult (stacionárius) hőmérséklet-eloszlás meghatározása hőforrásmentes homogén síkfalakban*

Állandósult hőmérséklet-eloszlás esetén igaz a

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0. \quad (2.1.1-11)$$

Így felírva a (2.1.1-5) Fourier-féle hővezetési differenciálegyenletet kapjuk a Laplace differenciálegyenletet, amely az állandósult hőmérséklet-eloszlást leíró egyenlet:

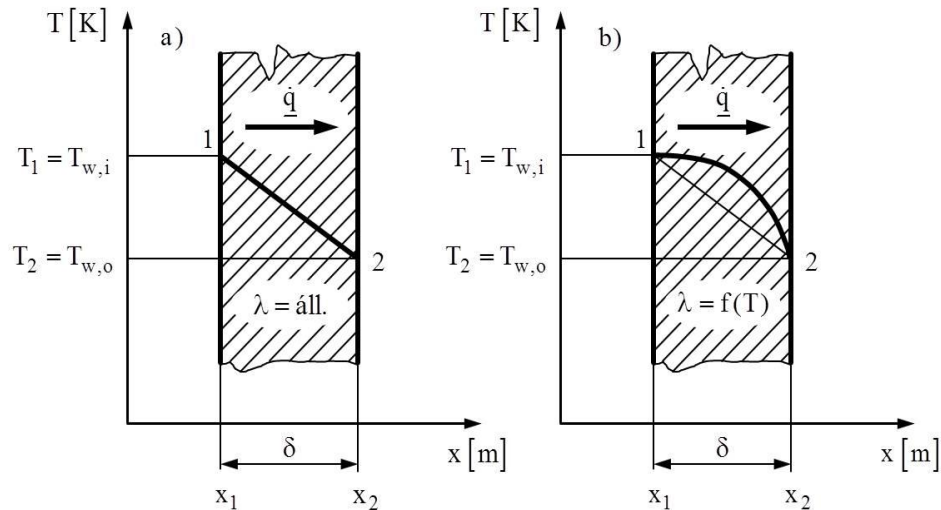
$$\mathbf{a} \cdot \nabla^2 T = 0, \quad (2.1.1-12)$$

*Hővezetés hőforrásmentes homogén síkfalon keresztül állandósult hőmérséklet-eloszlás  
esetén*

Tegyük fel, hogy valamely  $\delta$  vastagságú, homogén síkfal külső felületeit izotermikus felületeknek tekinthetjük, amelyeken  $T_1 = \text{állandó}$ , és  $T_2 = \text{állandó}$  és  $T_1 > T_2$  (elsőfajú peremfeltétel). Igen nagy kiterjedésű (végtelen) síkfalban az energia a falra merőleges irányban áramlik, hőmérséklet-változás is csak ebben az irányban lép fel. Tehát a feladat egyméretű (2.1.1.1-1. ábra), a Laplace-egyenlet ilyen feltételek melletti megoldása, adja a hővezetési egyenletet:

$$\dot{q}_v = -\frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2). \quad (2.1.1-13)$$

Természetesen a hőáram iránya a magasabb hőmérsékletű helytől az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé mutat (2.1.1.1-1 ábra).



2.1.1.1-1 ábra

Állandósult hőmérséklet-eloszlás hőforrásmentes sík falban

A vezetési hőáram a fal  $A$  felületén keresztül:

$$\dot{Q}_v = A \cdot \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2). \quad (2.1.1-14)$$

A fal  $\tau$  idő alatt  $Q$  energiát bocsát át

$$Q = \dot{Q}_v \cdot \tau = A \cdot \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \cdot \tau. \quad (2.1.1-15)$$

Az összefüggésekben a  $\frac{\lambda}{\delta}$  kifejezést a fal hővezető képességének, a reciprokját a fal hővezetési termikus ellenállásának ( $R_v = \frac{\delta}{\lambda}$ ) nevezik, ami az elektromosságtannal analóg kifejezés (2.1.4-1.a ábra)

$$\dot{Q}_v = A \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\delta}{\lambda}} = A \frac{(T_1 - T_2)}{R_v}. \quad (2.1.1-16)$$

Amennyiben a  $\lambda$  hővezetési tényező hőmérséklet függésével számolni kell ( $\lambda = f(T)$ ), úgy a síkfalban a hőmérséklet-eloszlás függvénye már nem lesz lineáris. Ilyen esettel találkozunk amikor, pl. a hőszigetelés két oldalán nagy a hőmérsékletkülönbség, azaz ha magas hőmérsékletű berendezést szigetelünk. Ekkor már nem lehet elhanyagolni a  $\lambda$  hőmérséklet függését. Amennyiben  $\lambda$  a hőmérséklettől oly módon függ, hogy a magasabb hőmérsékleten egyre jobb hővezetési képességet mutat, azaz értéke a hőmérséklet növekedésével együtt valamilyen módon növekszik (ez általában nem lineáris növekedés), akkor a falban a lineáris hőmérsékleti görbéhez képest a hőmérséklet-eloszlás görbe konvex alakú lesz (2.1.1.1-1.b ábra). A legtöbb anyag hővezetési tényezője a hőmérséklet függvényében így változik. Amennyiben viszont a hőmérséklet növekedésével csökken a  $\lambda$  értéke, akkor a görbe konkáv alakú lesz.

Ezekben az esetekben, a hőmérséklet-eloszlást a falban analitikusan meghatározni már nem tudjuk, csak numerikus úton végezhetünk közelítő számításokat. A közelítés egyik módszere, amit a dolgozatban is alkalmazok, hogy a homogén anyagú falat hőtechnikai értelemben többrétegű falnak tételezem fel. Az elméleti rétegeket hőmérséklet intervallumok szerint képezem. Az így kialakított egyes elméleti rétegekben a hővezetési tényező értékét állandónak tekintem, de a hőmérséklet tartománytól függően a rétegek hővezetési tényezője más és más (3.3.3-5 ábra).

*Hővezetés hőforrásmentes többrétegű síkfalon keresztül állandósult hőmérséklet-eloszlás esetén*

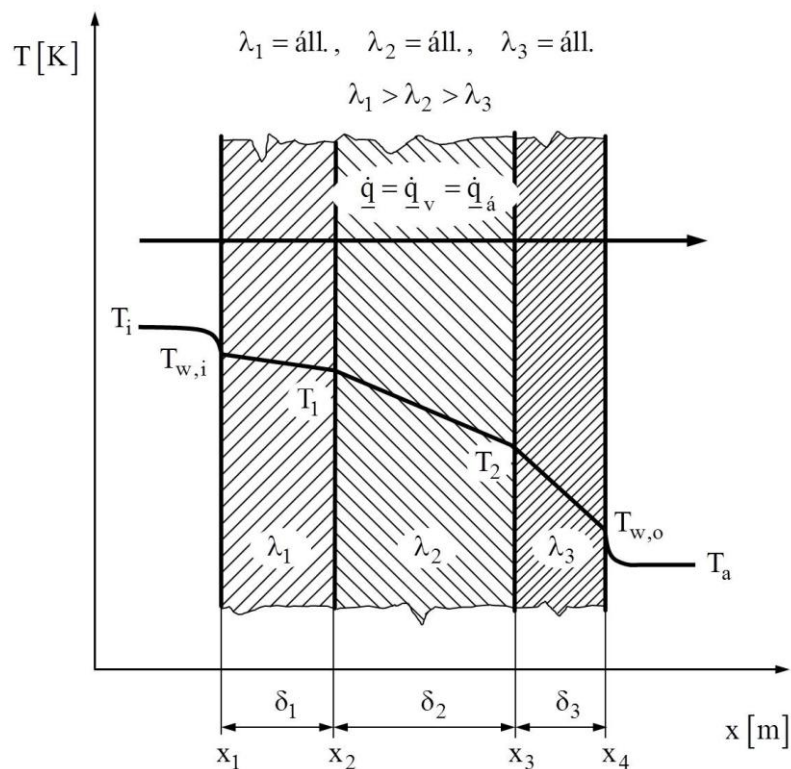
Többrétegű síkfalban – a rétegek szoros érintkezése esetén – az egymással érintkező felületek hőmérséklete azonosra vehető. A falra merőleges hőáram mindegyik rétegen átmegy, tehát értéke valamennyi rétegre azonos. Az egyes rétegekben az eltérő hővezetési tényezők miatt ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ ) a hőmérséklet gradiens is eltérő (2.1.1.1-2 ábra) [33].

Mivel  $\dot{q} = \dot{q}_v$  valamennyi rétegre azonos, általánosítva n rétegre írható, hogy

$$T_1 - T_{n+1} = \dot{q} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \dot{q} \cdot \sum_{i=1}^n R_{v,i} . \quad (2.1.1-17)$$

A (2.1.1-12) egyenlet összegzett („summázott”) része a többrétegű (az n rétegű) síkfal eredő hővezetési termikus ellenállása ( $R_{v,e}$ ) (2.1.4-1.b ábra):

$$R_{v,e} = \sum_{i=1}^n R_{v,i} . \quad (2.1.1-18)$$



2.1.1.1-2 ábra

Hőátzármatatás hőforrásmentes többrétegű (háromrétegű) síkfalon keresztül  
 állandósult hőmérséklet-eloszlás esetén

### 2.1.1.2 Nem állandósult állapotú hővezetés szilárd testekben

A nem állandósult (instacionárius) folyamatok a testek lehűlésével vagy felmelegedésével függenek össze. A jelenséget előidézhetheti az, hogy a test a saját hőmérsékletétől eltérő hőmérsékletű környezetbe kerül, vagy hőforrással/nyelővel rendelkezik. A nem állandósult (tranzien) esetben a testen belüli hőmérséklet-eloszlás az időben változik, azaz

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0. \quad (2.1.1-19)$$

Belső hőforrás vagy nyelő nélküli esetben a tranzien hővezetés feladatának megoldásához szintén a (2.1.1-5) Fourier-féle hővezetési differenciálegyenletet kell megoldani, csak itt érvényes a (2.1.1-19) összefüggés is:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T. \quad (2.1.1-5)$$

A (2.1.1-5), illetve (2.1.1-6) differenciálegyenlet megoldására nagyon sokféle módszer található az irodalomban, amelyek 3 csoportba sorolhatóak:

- az analitikai megoldások,
- a reguláris állapot módszere és
- a közelítő numerikus megoldások (pl. végelelemes módszer).

### *Az analitikai megoldás*

Az analitikai megoldások csak leegyszerűsített, alakra, geometriára léteznek (pl. megadott vastagságú végtelen sík fal, hengeres test, gömb). Ha egy konkrét testre vagyunk kíváncsiak, akkor a leegyszerűsített geometriai alakok közül kell a vizsgált testhez leginkább hasonló geometriájú alakra vonatkozó megoldást kiválasztani és alkalmazni.

A megoldáshoz egy új változót vezetnek be, az un. túlhőmérsékletet, ami a test egy adott pontjának hőmérséklete ( $T$ ) és a test környezeti hőmérséklete ( $T_f$ ) közötti hőmérséklet-különbséget mutatja meg ( $\theta$ ):

$$\theta = T - T_f . \quad (2.1.1-20)$$

Az irodalom [9, 90, 121] erre a változóra, a túlhőmérsékletre írja fel a (2.1.1-5) Fourier-féle hővezetési differenciálegyenletet:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \theta . \quad (2.1.1-21)$$

A differenciálegyenlet megoldásának egyértelműségi feltételei:

- a geometriai alak és méret;
- a fizikai paraméterek ( $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\rho$ );
- a harmadfajú peremfeltétel, a (2.1.1-9) egyenlet (ismerjük az  $\alpha$  hőátadási tényezőt);
- az időbeli feltétel: a test hőmérséklete a kezdeti időpillanatban (a test belsejében mindenhol azonos)  $\tau = 0$ ,  $T = T_0 = f(x, y, z)$ ,  $\theta = \theta_0 = T_0 - T_f = f(x, y, z)$ .

Összesítve mind a  $T$  hőmérséklet, mind a  $\theta$  túlhőmérséklet függvénye a helynek, az időnek, a hőmérséklet-vezetési tényezőnek  $a$ , a hőátadási tényezőnek  $\alpha$  és a test geometriai jellemzőinek.

A megoldások levezetését mellőzve elmondható, hogy a testek hőmérséklete minden esetben exponenciálisan változik, hűlés esetén exponenciálisan csökken, melegedés esetén exponenciálisan nő.

Az analitikus levezetések között a hasonlóságelméletet felhasználó megoldás is található. Három hasonlósági kritériumot alkottak:

$$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{\text{test}}} = \text{Bi}, \quad \frac{a \cdot \tau}{l^2} = \text{Fo}, \quad \frac{x}{l} = \xi,$$

amelyek sorban a Biot-kritérium, a Fourier-kritérium és a geometriai hasonlóság kritériuma.

A dimenzió nélküli hőmérséklet  $\theta/\theta'$  alakjában keresett függvényt a következő összefüggés szerint lehet előállítani:

$$\frac{\theta}{\theta'} = \Phi(\text{Bi}, \text{Fo}, \xi), \quad (2.1.1-22)$$

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{T_0 - T_f}{T' - T_f}. \quad (2.1.1-23)$$

Ha ismerjük a hasonlósági kritériumok értékét, akkor a megfelelő táblázatokból leolvasható  $\theta/\theta'$  értéke a különböző helyekre vonatkozóan.

#### *A reguláris állapot módszere*

Vizsgáljuk a szilárd test lehűlésének/felmelegedésének folyamatát ismert és a folyamat alatt állandó környező közeghőmérséklet  $T_f$  és hőátadási tényező  $\alpha$  mellett (harmadfajú peremfeltétel).

Amikor a test a saját hőmérsékletétől eltérő hőmérsékletű környezetbe kerül, a lehűlése vagy felmelegedése 3 részfolyamatra bontható [90, 121]:

- a rendezetlen folyamat állapotára (ez a kezdeti állapot);
- a rendezett folyamat állapotára (ez az ún. reguláris állapot) és
- az állandósult állapotra (ez a hőegyensúly állapota).

Az első állapot azért rendezetlen állapot, mert a test belsejében található esetleges, rendezetlen kiinduló hőmérséklet-eloszlás miatt a hőmérséklet változásának a sebessége a különböző helyeken különböző lehet. Ez az állapot szabálytalan jellegű, és semmiféle kapcsolatban nincs a lehűlés feltételeivel.

Egy idő múlva a testen belüli, a kezdeti rendezetlen hőmérséklet eloszlásból adódó különböző hőmérséklet-változási sebességek kiegyenlítődnek és a hőmérséklet változásának sebessége a test valamennyi pontjában állandóvá válik. Ez a rendezett folyamat állapota.

Analitikusan végtelen hosszú idő múlva pedig bekövetkezik a harmadik állapot, a hőmérséklet időbeli eloszlásának állandósága. Amikor a hőmérséklet a test valamennyi pontjában ugyanakkora és egyenlő a környező közeg hőmérsékletével, a test a hőegyensúly állapotában van.

A három állapotra egyszerre érvényes a hőmérséklet-eloszlást és ennek időbeli változását leíró a gyakorlati számításokhoz is használható általános összefüggés meghatározása a feladat bonyolultsága miatt lehetetlen. Ilyen összefüggés nem is található az irodalomban. A kutatók az egyes részfolyamatokat külön-külön vizsgálták. Testek hőveszteségének megakadályozása szempontjából főleg a reguláris állapotot leíró összefüggések ismerete szükséges.

Eszerint amikor bekövetkezik a második állapot, a reguláris állapot, a test tetszőleges pontjában a  $\theta$  túlhőmérséklet természetes logaritmus (ln  $\theta$ ) az idő függvényében lineárisan változik, vagy másképp kifejezve a  $\theta$  exponenciálisan csökken:

$$\ln \theta = -m \cdot \tau + C. \quad (2.1.1-24)$$

Az  $m$  mennyiség hűlés esetén pozitív szám és a test lehűlésének sebességét jellemzi. Különösen fontos jellemzője, hogy  $m$  értéke a test bármely pontjában ugyanaz, és értékét az adott test

- méretei és alakja,
- hődiffúziós tényezője ( $a$ ), valamint
- a hőátadás jellemzői, a hőátadási tényező ( $\alpha$ ) és a környező közeg hőmérséklete ( $T_f$ )

határozzák meg [121].

A (2.1.1-24) egyenletről következik, hogy a reguláris állapotban a hőmérséklet természetes alapú logaritmusának változási sebessége az időben és a térben állandó marad, az  $m$  értéke nem függ sem az időtől, sem a helytől:

$$\frac{\partial(\ln \theta)}{\partial \tau} = -m = \text{állandó}, \quad (2.1.1-25)$$

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -m = \text{állandó}. \quad (2.1.1-26)$$

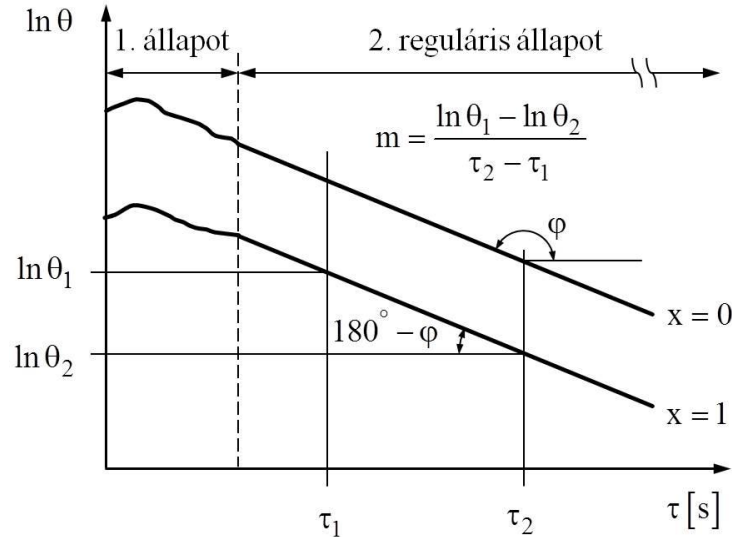
Mivel egy adott test  $m$  értéke egy adott hőátadási viszonyok mellett konstans, kísérletileg is meghatározható, ha két különböző időpontban mérjük a test hőmérsékletét, majd a 2.1.1.2-1 ábra szerinti egyenes meredekségét meghatározzuk.

G. M. Kondratyev kidolgozta a feladat matematikai megoldásának általános módszerét [90]. Ez a módszer tetszőleges alakú testekre alkalmazható és lehetővé teszi, hogy kapcsolatot hozzunk létre az  $m$  állandó, a geometriai jellemzők és a lehűlés külső feltételei ( $\alpha$ ) között (ez valójában a (2.1.1-21) differenciálegyenlet után megadott egyértelműségi feltételek). Mellőzve a levezetést, az  $m$  értékét általános esetben a következő módon tudjuk

meghatározni:

$$m = \frac{\bar{\theta}_A}{\bar{\theta}_V} \cdot \frac{\alpha \cdot A}{C_p^V} = \psi \cdot \frac{\alpha \cdot A}{C_p^V}, \quad (2.1.1-27)$$

ahol  $\bar{\theta}_A$  a felületi átlag túlhőmérséklete,  $\bar{\theta}_V$  a test térfogati átlag túlhőmérséklete,  $A$  a test felülete,  $\alpha$  az ismert hőátadási tényező,  $C_p^V$  a test állandó nyomáson vett teljes térfogati hőkapacitása,  $\psi$  dimenzió nélküli arányossági tényező.



2.1.1.2-1 ábra

A hőmérséklet természetes alapú logaritmusának időbeli változása a test lehülése (felmelegedése) esetén

**Kondratyev első tétele:**

a (2.1.1-27) egyenlet és annak következménye, azaz hogy a hűlés mértéke, az  $m$  egyenesen arányos az  $\alpha$  hőátadási tényezővel, a felülettel és fordítottan arányos a test teljes térfogati hőkapacitásával.

A  $\psi$  arányossági tényező függvénye a Biot-hasonlósági kritériumnak:

$$\frac{\bar{\theta}_A}{\bar{\theta}_V} = \psi = f(\text{Bi}). \quad (2.1.1-28)$$

A  $\psi$  megmutatja a testen belüli hőmérsékletmező egyenetlenségét. Ha  $\psi = 0$ , akkor a legegyenlőtlenebb a hőmérséklet-eloszlás a testen belül (a reguláris állapot kezdete), ha  $\psi = 1$ , akkor a hőmérséklet eloszlása a testben egyenletes.

**Kondratyev második tétele:**

ha egy és ugyanazt a testet különböző  $\alpha$  hőátadási tényező mellett vizsgálunk azt kapjuk,

hogy minél nagyobb az  $\alpha$ , annál nagyobb a közeg hűtőhatása, azaz annál nagyobb az  $m$  értéke. Ha  $\alpha = \infty$ , akkor az  $m$  értéke arányossá válik az a hőmérsékletvezetési tényezővel:

$$a = K \cdot m \Big|_{\alpha = \infty} . \quad (2.1.1-29)$$

A  $K$  tényező [ $m^2$ ] csak a test alakjától és méreteitől függ.<sup>3</sup>

Ezt követően, az általánosításra való törekvés céljából, hasonlóság elmélet alapján, kidolgozták a  $\psi$  tényezőt megadó függvény test méreteit kiküszöbölő kifejezését is [121].

A reguláris állapot elmélete alapján kiszámítható a testek felmelegedéséhez, vagy lehüléséhez szükséges idő. Az a  $\tau$  idő, amelynek folyamán a hőmérséklet a test valamelyik pontjában  $\theta'$ -ről  $\theta''$ -re változik, a következő képlettel számítható ki:

$$\tau = \frac{1}{m} \ln \left( \frac{\theta'}{\theta''} \right). \quad (2.1.1-30)$$

#### *A közelítő numerikus megoldások*

A számítógépek fejlődésével, elterjedésével egyre nagyobb teret nyer a numerikus módszerek alkalmazása a különböző feladatok megoldásában, köztük a hőterjedés meghatározásában is. Lényegük, hogy a (2.1.1-5) Fourier-féle hővezetési differenciálegyenletet differenciaegyenlettel cserélik fel és a testet elemi térfogati részegységekre osztva egységről egységre számítják ki a jellemzőket. A módszer nem új, de a sok számítás miatt a számítógép használata szükséges. Ilyen végeselemes modellt használó szoftver pl. a Ansys. Szimulációra, modellezésre is kiválóan alkalmas.

#### **2.1.1.3 Kritikai észrevétel az irodalomban található hűlési folyamat leírásához**

„A hőterjedés folyamatának a test alakjával és méreteivel való összefüggés” címszó alatt az irodalom ellentmondásosan és félrevezetően fogalmaz. Nem ismerteti rendesen a levont következtetések kiinduló feltételeit, értelmét, és általánosításával téves megállapítást közöl:

1) Mihejev, M. A.: A hőátadás gyakorlati számításának alapjai [121]: „A folyamat sebessége bármely testre annál nagyobb, minél nagyobb a test felületének térfogatához való viszonya. Erről könnyen meggyőződhetünk, ha –  $Bi = konstans$  esetben – a különböző alakú testekre felvett  $\theta/\theta' = f(Fo)$  függvényeket összehasonlítjuk. A különböző alakú testekre

<sup>3</sup> Ez teljesen egyértelmű, ha nincs átadási oldalon ellenállás, akkor csak a vezetési oldal határozza meg a hűlést. Ha viszont van ellenállás az átadási oldalon, amit nem csak az  $\alpha$  határoz meg, hanem a felület is, ami azonos anyag, azonos térfogat és azonos  $\alpha$  esetén is lehet eltérő, illetve a méret függvényében is más és más, a geometriával, a fajlagos felület változásával is tudjuk befolyásolni  $m$  értékét. Lásd. kutatási rész.

vonatközó függvények ábrájából megállapítható, hogy **a folyamat sebessége (a hűlés) gömb alakú test esetében nagyobb, mint bármely más testnél.**”

2) Isachenko, V. P., et al.: Heat transfer [90]: ”From Fig. 3-19 it follows that the rate of cooling is faster for a sphere than for any other body.”

Valójában a felülethez viszonyítva különböző térfogatú és tömegeloszlású testekre vonja le az irodalom a következtetést úgy, hogy vezetési oldalról egy „fiktív”, a test középpontjától a felületig tartó, minden testre – a különböző alakú testekre – azonos belső jellemző méretet vesz alapul. Értelemszerűen, ahol a testből a felülethez nagyobb tömegarány (ill. térfogatarány) esik közelebb, ott a testen belüli eredő hőellenállás kisebbnek adódik, de ebből a teljes hűlési folyamatra azt a következtetést ráadásul általánosságban levonni, hogy a gömb hűl ki a leggyorsabban, az teljesen téves. Pont azt a következtetést kellett volna levonni, hogy a legnagyobb fajlagos felületű test (az azonos anyagú és térfogatú testek közül) hűl le a leggyorsabban, mert ott esik a legtöbb anyag a felülethez közelebb. Az irodalom által levont következtetés pont ellentétes a felület és térfogat viszonyával is, mert a gömb a legkisebb felületű test az azonos térfogatú testek között. Tehát nem mindegy milyen testeket hasonlítunk össze:

- az azonos felületű, de különböző térfogatú testeket, vagy
- az azonos térfogatú, de különböző alakú és így egyúttal különböző fajlagos felületű testeket, vagy
- azonos alakú, de különböző méretű és ezért szintén különböző fajlagos felületű testeket.

Az a megállapítás, hogy a gömb hűl ki a leggyorsabban nem igaz. Az azonos térfogatú, de a gömbtől eltérő alakú testek, mivel nagyobb fajlagos felületű testek biztos, hogy gyorsabban kihűlnek, mint a gömb. Tehát a gömb hűl ki a leglassabban. Az azonos felületű testek közül is biztos, hogy a gömb hűl ki utoljára, mert annak a legnagyobb a térfogata. Az ugyanolyan felületű vékony lap hamarabb kihűl, mivel kisebb a térfogata, mint az azonos felületű, de nagyobb térfogatú gömb. Az azonos alakú, de különböző térfogatú testek is más-más sebességgel hűlnek ki. A nagyobb térfogatú lassabban, mert nagyobb a vezetési ellenállása és kisebb a fajlagos felülete (lásd. kutatási részt).

Az irodalom a testen belüli hővezetésre koncentrálna (saját elnevezésemben én ezt a Fourier-féle lehűlésnek hívom) és az egyszerűsítésekkel kevés figyelmet fordít a külső hőátadási résszel való kapcsolatra (a Newton-féle lehűlésre). Különbözö lehűlési feltételek ( $T_0$ ,  $T_f$  és

$\alpha$ ) mellett egy adott testen belüli hővezetést vizsgáltak (egy és ugyanazt a testet). A kapott eredményeket hasonlították össze. Az összehasonlítás kimutatta, hogy az  $\alpha$ -tól függően az  $m$  értéke – azaz a (2.1.1-24) egyenlet meredeksége – változik. Ha  $m$  értéke változik, akkor a hűlés sebessége is változik. Arra vonatkozóan is találni természetesen utalást, hogy a geometriai tényezők is számítanak (tehát a felület és a térfogat aránya is). Azonban mivel mindig egy adott testet vizsgáltak, ezeknek a geometriai jellemzőknek a hatása a hűlés sebességének befolyásolására, összefüggésében az  $\alpha$  hőátadási tényezővel illetve a test hőmérsékletvezetési tényezőjével, részletesen kifejtve ismereteim szerint nincsenek. Nem találtam irodalmi leírást arról, hogy azonos hűlési feltételek ( $T_0$ ,  $T_f$  és  $\alpha$ ) mellett vizsgáltak volna azonos alakú és anyagú, de különböző méretű testeket. Itt kijött volna, hogy az  $m$  értéke a mérettől, a fajlagos felülettől függően is változik, mert az is befolyásolja a felületi hőmérséklet időbeli változását. Összegezve, az irodalom a testen belüli hőmérséklet-eloszlás időbeli változásával részletesen foglalkozik, és kevés figyelmet fordít arra, hogy a felületen kialakuló hőmérsékletet, ami meghatározza a testen belüli hűlés sebességét, az  $\alpha$  hőátadási tényezőtől kívül milyen más jellemző befolyásolja. A kutatási részben ezzel is foglalkozom.

## 2.1.2 A hőátadás

Hőátadásról) (konvekcióról) akkor beszélünk, amikor a szilárd anyag felülete és a vele érintkező fluidum (gáz vagy folyadék halmazállapotú közeg) között hőforgalom (hőmérséklet-különbség hatására létrejött energiacsere) valósul meg. A szilárd anyag felülete és a fluidum közötti hőáramot a Newton-féle hőátadási egyenlettel tudjuk megadni:

$$\dot{Q}_a = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_f), \quad (2.1.2-1)$$

$$\underline{\dot{q}}_a = \alpha \cdot (T_w - T_f), \quad (2.1.2-2)$$

ahol  $\dot{Q}_a$  az átadási hőáram [W],  $\underline{\dot{q}}_a$  az átadási hőáramsűrűség [ $W/m^2$ ],  $\alpha$  a hőátadási tényező [ $W/(m^2K)$ ],  $A$  a hőátadási felület [ $m^2$ ],  $T_w$  a szilárd test felületi hőmérséklete [K],  $T_f$  a környező fluidum hőmérséklete [K].

Az elektromosságáttal analóg módon megadható az átadás termikus ellenállása ( $R_a$ ):

$$R_a = \frac{1}{\alpha}, \quad (2.1.2-3)$$

amellyel szintén felírható a Newton-féle hőátadási egyenlet.

A fluidum fontos tulajdonsága, hogy áramlásra képes. Az áramló közeg, a bennük található

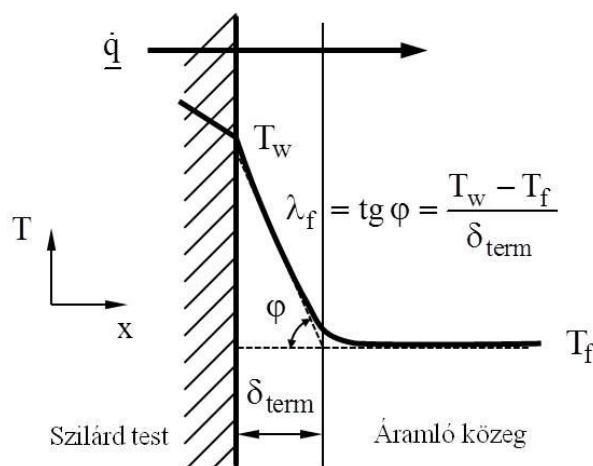
részecskék mozgásával együtt, a saját belső energiátartalmát is mozgatja, hordozza, így képes átszállítani a saját energiátartalmát az egyik térrészből a másikba. Az áramlás (anyag- és egyben energiaáramlás) létrejöhet természetes úton, vagy mesterséges hatásra (pl. keverés).

Szilárd felület mentén áramló közegnek a felülettel érintkező rétegét mindig lamináris áramlás jellemzi. E lamináris határrétegen keresztül a hő csak molekuláris vezetési mechanizmussal juthat át, így  $\alpha$  biztosan függ a fluidum  $\lambda$  hővezetési tényezőjétől is. Turbulens áramlás esetén az áramlás erősödésével ez a lamináris határréteg elvékonyodik, ezért a Re-szám növekedésével, az  $\alpha$  növekedésével és egyúttal a hőátadás javulásával kell számolnunk [9, 161]. Leegyszerűsítve a hőátadást felfoghatjuk úgy is, mint a felület melletti lamináris határrétegen keresztüli hővezetést, ahol nem mindegy, hogy milyen vastag a határréteg. Az  $\alpha$  hőátadási tényezőt az alábbi módon írhatjuk fel:

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{\delta_{\text{term}}}, \quad (2.1.2-4)$$

ahol  $\lambda_f$  a fluidum hővezető képessége,  $\delta_{\text{term}}$  a termikus határréteg vastagsága (2.1.2-1 ábra).

A (2.1.2-1) összefüggés csak látszólag nagyon egyszerű, mert a határréteg vastagságát, a határréteg jellemzőit és ezzel együtt az  $\alpha$  hőátadási tényezőt egzakt analitikai módszerrel meghatározni, néhány egyszerű esetet leszámítva, teljesen lehetetlen. Az  $\alpha$  értékét befolyásolják a közeg áramlási viszonyai, a közeg hőfizikai és más anyagjellemzői, valamint a hőátadó felület geometriai kialakítása. Az  $\alpha$  meghatározásának ismertetése meghaladja ennek a dolgozatnak a kereteit. A kutatási részben felhasznált  $\alpha$  értékét az irodalomból vettem.



2.1.2-1 ábra

A hőátadás a lamináris áramlású termikus határrétegen keresztül

### 2.1.3 A hősugárzás

A hősugárzás (a radiáció) olyan energiaátadási mód, amikor az energia az egyik testről a másikra elektromágneses hullámok (EMH-ok) formájában kerül át.

Ismert, Planck igazolt feltevése (tulajdonképpen ez a modern fizika egyik alapja [172]), hogy a részecskék rezgőmozgása („hőmozgása”) során is érvényes az energia kvantáltsága, azaz a részecskék alkotta, különböző frekvenciákon rezgő egyes oszcillátorok csak a rájuk jellemző frekvenciának megfelelő

$$E = h \cdot \nu, \quad [\text{J}] \quad (2.1.3-1)$$

energia egységekben vehetik fel, illetve adhatják le az energiát. A (2.1.3-1) egyenletben  $h$  a Planck-állandó ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s),  $\nu$  az egyes oszcillátorok rezgési frekvenciája [1/s]. Ez alapján, statisztikai úton, a Boltzmann-eloszlást felhasználva, Planck levezette egy adott hőmérsékletű test által kibocsátott sugárzás teljes energiáját, illetve meghatározta, hogy egy adott hőmérsékleten az egyes frekvenciákhoz, frekvenciatartományokhoz mekkora kibocsátott energia tartozik. Ez a Planck-féle sugárzási törvény:

$$E(\nu) d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1}, \quad [\text{J}] \quad (2.1.3-2)$$

ahol  $k$  a Boltzmann-állandó ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $c$  a fénysebesség [m/s] [11, 113].

A környezetben elhelyezkedő testek termikus sugárzása miatt (nem abszolút 0 fokon vannak), minden egyes testet folyamatosan EMH-ok érnek. A testre érkező EMH-ok egy része a felületről visszaverődik (reflexió), más része elnyelődik a testben (abszorpció), illetve áthalad a testen (transzmisszió). Tehát a testre érkező teljes elektromágneses sugárzásra  $E$  az alábbi mérlegegyenlet írható fel:

$$E = E^r + E^a + E^t, \quad (2.1.3-3)$$

ahol  $E^r$  a visszavert (reflektált),  $E^a$  elnyelt,  $E^t$  pedig az áteresztett (transzmissziós) elektromágneses sugárzás.

Az abszolút fekete test az összes ráeső sugárzást elnyeli, az abszolút fehér test vagy nevezhetjük abszolút tükröző testnek is, a sugárzást teljes egészében visszaveri, a diatermikus anyag pedig a hősugárzást teljes egészében átengedi. A valós szilárd testek többnyire átlátszatlanok, a sugárzás egy részét elnyelik, másik részét pedig visszaverik.

Nemcsak érkezik a testekre EMH-ok, hanem a testek, egyidejűleg energiát is kisugároznak (emittálnak) szintén EMH-ok formájában, hiszen nem csak a környező testek, de ezek sem abszolút 0 fokon vannak. A test által egyidejűleg kisugárzott energia, illetve abszorbeált energia közötti különbség megadja, hogy ez a folyamat a testre nézve energia leadással vagy felvétellel jár-e. Ha a test hőmérséklete állandó és az EMH-ok emisszióján és abszorpcióján kívül más energiaátadási mód nem lép fel, felírható, hogy

$$E^e = E^a, \quad (2.1.3-4)$$

ahol  $E^e$  a kibocsátott (emittált) elektromágneses sugárzás.

A (2.1.3-3) és a (2.1.3-4) egyenleteket felírhatjuk és vizsgálhatjuk az egyes frekvenciákra vagy frekvenciatartományokra is. Egy adott  $T$  hőmérsékletű, átlátszatlan szilárd testnél legyen

$E_v$  a  $\nu$  frekvencián a felületre érkező energia,

$E_v^r$  a  $\nu$  frekvencián visszavert energia és

$E_v^a$  a  $\nu$  frekvencián elnyelt energia.

Ez alapján definiálható a test spektrális abszorpcióképessége:

$$a_\nu = \frac{E_v^a}{E_\nu}. \quad (2.1.3-5)$$

Legyen  $E_\nu^e$  ugyanezen a  $T$  hőmérsékleten és ugyanezen a  $\nu$  frekvencián a test által kisugárzott (emittált) energia. Legyen a test spektrális emisszió képessége a

$$e_\nu = \frac{E_\nu^e}{E_\nu^0}, \quad (2.1.3-6)$$

ahol  $E_\nu^0$  az abszolút fekete test által ugyanezen a  $T$  hőmérsékleten emittált energia.

Bár a testek spektrális emisszió képessége és spektrális abszorpció képessége anyagtól függő jellemzők, hányadosuk független az anyagi minőségtől:

$$E(\nu, T) = \frac{e_\nu}{a_\nu}, \quad (2.1.3-7)$$

ahol  $E(\nu, T)$  anyagi minőségtől, felületi minőségtől független univerzális függvény, csak a hőmérséklettől és a frekvenciától függ. Ez Kirchhoff termikus sugárzással kapcsolatos törvénye, amely könnyen igazolható, de itt ettől eltekintünk. Különböző anyagokra felírva:

$$E(\nu, T) = \frac{e_\nu^1}{a_\nu^1} = \frac{e_\nu^2}{a_\nu^2} = \dots = \text{áll.}, \quad (2.1.3-8)$$

Termikus egyensúlynál tudjuk, hogy a hőmérsékletek egyenlők. A termikus egyensúlyban lévő testek az anyagi minőségüktől függetlenül, minden frekvencián is egyensúlyt mutatnak. A spektrális eloszlásgörbéjük egyforma. A melegebb testek spektrális eloszlásgörbéje pedig teljes egészében és mindig magában foglalja a hidegebb test spektrális eloszlásgörbéjét (lásd. 2.3.1 fejezet és a 2.3.1-1 ábrát) hiszen ha az egyes oszcillátorokat magasabb hőmérsékletre gerjesztem, akkor több energiakvantumot vesznek fel. Ha ez nem így lenne, akkor bizonyos frekvenciákon a hidegebb helyről is mehetne melegebb helyre az energia, ami ellentmondana a termodinamika 2. főtételének.

Az EMH-ok formájában történő energiaátvitel szempontjából a legjelentősebb az EMH-ok látható és infravörös tartománya (lásd. 2.3.1-1 ábrát). Ez a sugárzási tartomány hordozza arányaiban a legtöbb energiát a fekete test által egy adott hőfokon emittált spektrumból, és ez abszorbeálódik a legnagyobb arányban a különböző anyagi halmazokban (pl. szilárd testekben), ugyanis a részecskék rezgési és forgási átmeneteinek gerjesztési energiája ebbe a sugárzási tartományba esik.

A sugárzásos energiaátadáshoz közvetítő anyagi részecskére, közvetítő közegre nincs szükség. A sugárzási energia, az EMH-ok homogén és izotróp közegben egyenes irányban terjednek, de a hullámhossztól függően különböző sebességgel (a fénytörés jelensége).

A hősugárzást a Stefan-Boltzmann törvény írja le, amely a Planck-féle sugárzási törvényből a teljes frekvenciatartományra, illetve a teljes hullámhossz tartományra ( $\lambda = 0 \rightarrow \infty$ ) való integrálással levezethető. A Stefan-Boltzmann törvény megadja az abszolút fekete test felülete által, a teljes hullámhossz tartományra vonatkozó, kibocsátott sugárzásos hőáramsűrűséget, ami a felület abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával arányos:

$$\dot{q}_s = \sigma \cdot T^4, \quad (2.1.3-9)$$

ahol  $\sigma$  a Stefan-Boltzmann-féle állandó,  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ , az abszolút fekete test sugárzása.

A valóságos testek által kibocsátott sugárzásos hőáramsűrűség kisebb, mint az elméleti, abszolút fekete testeké. Ezt a számításoknál egy fajlagos emissziós tényezővel ( $\epsilon$ ) veszik figyelembe. A fajlagos emissziós tényező 1-nél kisebb szám és megadja, hogy az adott test által kisugárzott spektrális energiamennyiség hányad része egy azonos hőmérsékletű,

abszolút fekete test által kibocsátott energiáértéknek. Ha az adott test emissziós tényezője  $\varepsilon$  a hullámhossztól független, szürke testnek nevezzük, ha  $\varepsilon$  a hullámhosszal változik, szelektív sugárzó testtel, azaz színes testtel van dolgunk. Ezek alapján a fekete testhez képest egy valós testre a felületi hőáramsűrűség és a hőmérséklet kapcsolata a Stefan-Boltzmann törvényhez képest a fajlagos emisszióval módosul:

$$\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (2.1.3-10)$$

Általánosságban elmondható, hogy a világos, sima felületek jól visszaverik a hőt és rosszul sugározzák ki, míg a sötét, érdes (matt) felületek jó hőelnyelők és jól is sugároznak.

Összefoglalva, a testek sugárzási hőáramát két tulajdonság befolyásolja:

- a hőmérsékletük, amely a negyedik hatvány miatt a hőmérséklet növekedésével egyre nagyobb mértékben növeli a sugárzási teljesítményt, valamint
- a felületi minőség, amelyet a fajlagos emissziós tényező ( $\varepsilon$ ) jelenít meg.

Bár a szakirodalomban nem találkozni a sugárzás termikus ellenállása kifejezéssel, de ha megnézzük a (2.1.3-10) egyenletet, és belegondolunk a tartalmi jelentésébe, könnyű belátni, hogy a fajlagos emissziós tényező jeleníti meg a sugárzás termikus ellenállását. Célszerűnek látszik, a Stefan-Boltzmann állandót is, mint egy konstanst, ebbe az ellenállásba beépíteni:

$$\frac{1}{R_s} = \varepsilon \cdot \sigma \quad \rightarrow \quad R_s = \frac{1}{\varepsilon \cdot \sigma}, \quad (2.1.3-11)$$

és így

$$\dot{q}_s = \frac{T^4}{R_s}, \quad (2.1.3-10)$$

ahol  $R_s$  a sugárzás termikus ellenállása.

Talán annyiban „sántít” ez a felírási mód, hogy itt nem szükséges egy hőmérsékleti potenciálkülönbség, a test a saját hőmérsékletétől függően bármilyen környezetben így sugároz. Viszont az jól látszik, hogy ha a hőmérsékletet független változónak (adottságnak) tekintjük, akkor a sugárzást csak a fajlagos emissziós tényező ( $\varepsilon$ ) változtatásával tudjuk befolyásolni. Tehát ha az  $\varepsilon$  értékét módosítom, mintha egy ellenállást módosítanék, akkor módosul a sugárzási hőáram.

Ha két különböző hőmérsékletű felület (az egyik fekete, a másik nem) úgy helyezkedik el, hogy csak egymásra sugároznak illetve csak egymás sugárzásait nyelik el, akkor a kialakuló hőáram a következő:

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.1.3-12)$$

$$\underline{\dot{q}}_s = \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{R_s}. \quad (2.1.3-13)$$

Egy észrevétel. A hőterjedéssel foglalkozó irodalmak a legtöbbször csak egyszerűen felírják a Stefan-Boltzmann törvényt és a magyarázataik is kimerülnek abban, hogy az emissziós tényezőt ismertetik. Arról már nem vagy keveset beszélnek, illetve nem emelik ki magyarázataikban, hogy bár a Stefan-Boltzmann törvényben nem szerepel a testek közötti távolság, mégis a gyakorlatban nagyon nagy jelentősége van a távolságnak is. Tehát nem mindegy milyen messze vannak az egymástól a sugárzási kapcsolatban lévő testek. Ugyanis a Stefan-Boltzmann törvény a testek felületén adja meg a hőáram nagyságát és a test felületével osztva adja meg a hőáramsűrűséget. De ez a hőáramsűrűség csak a test felületére vonatkozik. Amíg a test felületét elhagyó hőáram [W] nagysága stacionárius esetben állandó, a hőáramsűrűség [W/m<sup>2</sup>] a távolsággal együtt négyzetesen csökken. Ez azért van, mert a felület, ahol ez az állandósult hőáram megoszlik, a testtől való távolság növekedésével általában növekszik (kivéve, ha egy végtelen síkfal felületét képzeljük el, mert akkor a párhuzamos síkok miatt a felületek egyenlők). Ezt a jelenséget a Lambert-féle távolsági törvény [39] tárgyalja. E szerint valamely pontszerű sugárforrás normális irányú sugárzásának intenzitása (áramsűrűsége) a forrástól mért távolság négyzetével arányosan csökken:

$$\underline{\dot{q}}_s = f\left(\frac{1}{r^2}\right). \quad (2.1.3-14)$$

Ha gömböknek képzeljük el a sugárzó testeket, pl. Föld, Nap, Csillagok, akkor stacionárius esetben a felületi hőáram állandó, a felületi hőáramsűrűséget  $\underline{\dot{q}}_0$  pedig a Stefan-Boltzmann törvény alapján a következő módon tudjuk kiszámítani:

$$\underline{\dot{q}}_0 = \frac{\dot{Q}}{A_0} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_0 \cdot T^4}{A_0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.1.3-10)$$

ahol  $A_0$  a sugárzó test felülete. Azonban már egy adott  $r$  távolságra a testtől a hőáramsűrűség értéke már más lesz:

$$\underline{\dot{q}}_r = \frac{\dot{Q}}{A_r} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_0 \cdot T^4}{A_r}, \quad (2.1.3-15)$$

ahol  $A_r$  a sugárzó test felületétől  $r$  távolságra lévő felület nagysága. Az  $A_r$  függvénye az  $r$  távolság négyzetének  $A_r = f(r^2)$ . Mivel  $A_0 < A_r$ , ezért

$$\dot{q}_0 > \dot{q}_r . \quad (2.1.3-16)$$

Ami igaz a csillagok és a bolygók világában az igaz a földi hőterjedésnél is. A hősugárzóhoz nem azért kell közel ülni, mert a vastagabb levegőréteg szigetelő hatása miatt messzebb már nagyobb termikus ellenállás adódik, és így az jobban gátolja a hő terjedését. Hiszen a levegő nem is játszik szerepet a sugárzásos hőátadásnál – vákuumnak tekinthetjük sugárzási szempontból –, hanem mert az állandó nagyságú, stacionárius hőáram a távolság növekedésével egyre nagyobb felületen oszlik el és távolabb már sokkal kisebb lesz az a hőáramsűrűség, ami eléri az embert.

A konkrét számításoknál egy sor korrekciót is figyelembe kell természetesen venni: a testek alakját, a test és a sugarak által bezárt szöveget, a felületek és a sugárzás útjába eső közeg tulajdonságait, a relatív emisszió- és abszorpció-képességet, a reflexiót, a transzmissziót, stb..

Sok esetben a hőátadáshoz hasonlóan, a sugárzásnál is célszerű olyan sugárzásos hőátadási tényező bevezetése ( $\alpha_s$ ), amellyel a hőmérséklet-különbség lineárisan kezelhető.

Így a sugárzás útján átvitt hőáram:

$$\dot{Q} = \alpha_s \cdot A \cdot (T_1 - T_2), \quad (2.1.3-17)$$

ahol

$$\alpha_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2). \quad (2.1.3-18)$$

Ha az átadás és a sugárzás egyidejűleg megy végbe, akkor a két folyamat egy egyenlettel vehető figyelembe:

$$\dot{Q} = (\alpha + \alpha_s) \cdot A \cdot (T_1 - T_2). \quad (2.1.3-19)$$

A gyakorlatban megadott átadási tényezők már a sugárzási hőátadási tényezőt is tartalmazzák.

#### 2.1.4 A hőátszármaztatás

Legtöbbször, a valóságban előforduló eseteknél, a hőterjedés mindhárom módja egyidőben lép fel. Célszerű ilyenkor a hőterjedés folyamatát egyszerre leírni, bevezetve a hőátszármaztatási tényezőt ( $\kappa$ ) [ $W/(m^2K)$ ]. Ez alapján az átszármaztatott hőáram:

$$\dot{Q} = \kappa \cdot A \cdot \Delta T . \quad (2.1.4-1)$$

Itt is alkalmazva az elektromosságtannal analóg termikus ellenállás fogalmát:

$$R_e = \frac{1}{\kappa}, \quad (2.1.4-2)$$

ahol  $R_e$  az eredő termikus ellenállás, ami összevont átadási és sugárzási  $\alpha$  esetén a részellenállások összegével egyenlő (soros kapcsolás). Forrásmentes többretegű síkfalnál, állandósult hőmérséklet-eloszlás esetén (2.1.4-1.c ábra):

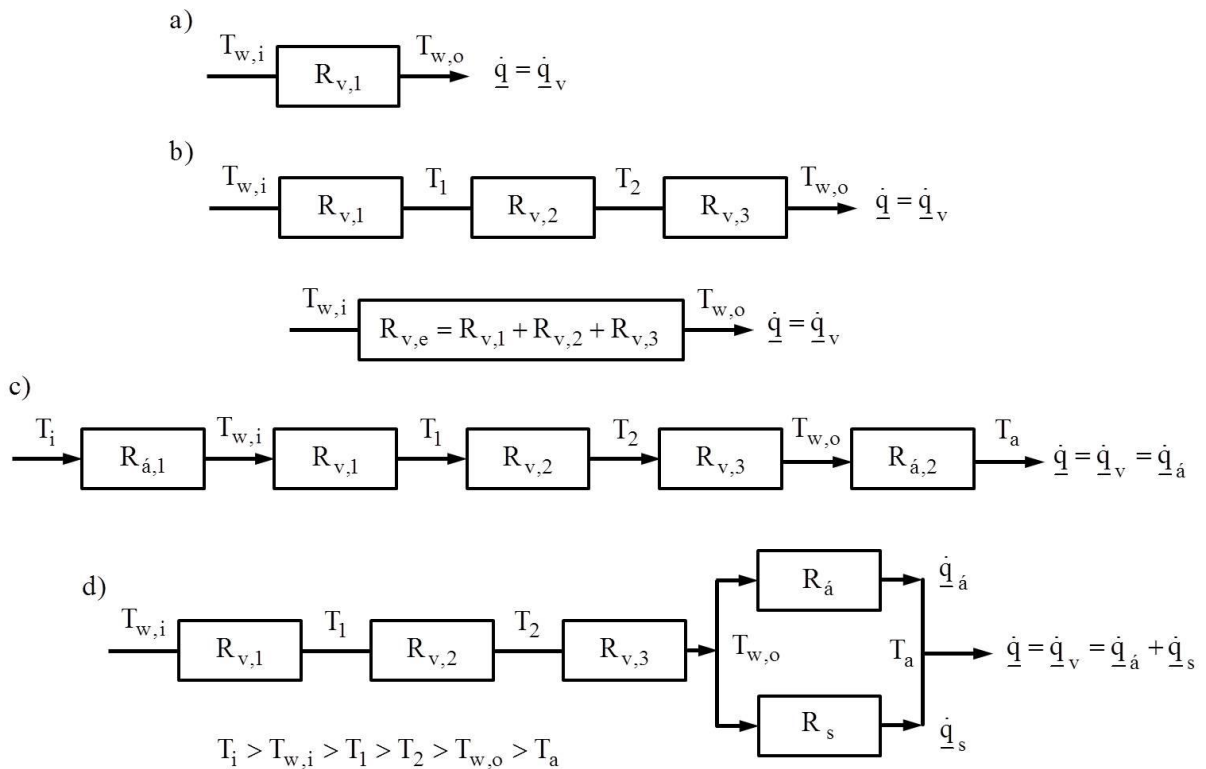
$$R_e = R_{\acute{a},1} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{\acute{a},2}. \quad (2.1.4-3)$$

Így  $\kappa$  már könnyen kifejezhető:

$$R_e = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2.1.4-4)$$

$$\kappa = \frac{1}{R_e} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.1.4-5)$$

ahol  $\alpha_1, \alpha_2$  a fal két oldalán az összevont hőátadási tényező, míg  $\lambda_i$  a  $\delta_i$  vastagságú  $i$ -edik fal hővezetési tényezője.



2.1.4-1 ábra

A termikus ellenállások ábrázolása az elektromosságtannal analóg módon

### 2.1.5 A hőkapacitás

Fajhőnek nevezzük azt az energiamennyiséget, amely egységnyi tömegű anyag hőmérsékletét egy Celsius fokkal vagy Kelvinnel növeli.

Az állandó nyomáson közölt vagy elvont hő megváltoztatja az anyag hőmérsékletét és térfogatát. Ha 1 kg tömegű anyagot melegítünk állandó nyomáson, akkor a hő hatására bekövetkező hőmérséklet-változás meredeksége az alábbi egyenlettel jellemezhető:

$$c_p = \frac{\delta Q^{p=\text{áll.}}}{dT} = \frac{dH}{dT}, \quad (2.1.5-1)$$

ahol  $c_p$  az állandó nyomáshoz tartozó fajhő [J/(kgK)].<sup>4</sup> Ha  $c_p$  értékét ismerjük, pl. mérésel meghatároztuk vagy mások meghatározták, akkor egy m tömegű anyagra a (2.1.1-3) egyenlet alapján a következő egyenlet is felírható:

$$\delta Q^{p=\text{áll.}} = m \cdot c_p \cdot dT, \quad (2.1.5-2)$$

$$Q^{p=\text{áll.}} = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_p \cdot dT, \quad (2.1.5-3)$$

vagy véges mennyiségekkel, a hőnél elhagyva a felső indexet (megtehetjük, mert  $c_p$ -ből ez már egyértelműen következik):

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T = C \cdot \Delta T, \quad (2.1.5-4)$$

ahol  $C$  az  $m$  tömegű test teljes hőkapacitása [J/K].

Látható, hogy a fajhő nagyon praktikus, anyagra jellemző mutató, mert meg lehet mérni és utána a számításoknál jól fel lehet használni.

Azonban a hőtárolás során nem az a célunk, hogy minél kisebb tömegű anyagban tároljuk az energiát, pontosabban az exergiát, hanem hogy minél kisebb térfogatban tároljunk ugyanannyi energiát illetve exergiát. Ezért a hőtároló anyagoknál a fajlagos térfogati hőkapacitás [J/(m<sup>3</sup>K)] ismerete szükséges.<sup>5</sup> Ezért a 2.3.3.1-1 táblázatban már fel vannak tüntetve a térfogati hőkapacitások is.

---

<sup>4</sup> Maga a fajhő is hőmérsékletfüggő, amit a legtöbb esetben a számításoknál elhanyagolunk, de azért erről teljesen megfeledkezni nem szabad.

<sup>5</sup> A fajlagos térfogati hőkapacitás függ a hőmérséklettől, mivel a sűrűség is függ a hőmérséklettől.

## 2.2 A HŐSZIGETELŐ ANYAGOK

Hőszigetelő anyagnak nevezünk minden olyan anyagot, amelyet azért alkalmazunk, hogy a tér két pontja vagy része között a hőcserét valamilyen célból megakadályozzuk, illetve lassítsuk. A jó hőszigetelő anyag minimálisra csökkenti a különböző módon terjedő egyes vagy a teljes, eredő hőáramot.

Az adott hely, az adott alkalmazási körülmények (környezet, hőmérséklet, sugárzási viszonyok, stb.) és az adott cél, hogy melyik hőterjedési módot igyekszünk csökkenteni, határozzák meg azt, hogy egy kiválasztott anyag abban a környezetben hőszigetelőnek tekinthető-e vagy sem. Más-más hőszigetelési technikát és anyagot, anyagokat kell alkalmaznunk egy talajjal közvetlenül érintkező rész szigetelésénél, ahol nem tud a hőszugárzás és a hőáramlás fellépni, mint egy levegővel érintkező rész esetén, ahol a hőszugárzással és az áramlással is számolni kell. Szintén más-más anyag tekinthető jó hőszigetelőnek a különböző hőmérsékleti tartományokban.

Nem megfelelkezve a hőszugárzás és a hőátadás gátlásáról, és nem bagatellizálva ezek fontosságát, ami főleg a hőszigetelő anyag felületi tulajdonságaival (simaság, szín, hőmérséklet, stb.) függ össze, az energetikai berendezések hőszigetelésének általában mégis az első technológiai lépése a berendezések burkolása kis hővezető-képességű anyaggal vagy anyagokkal. Ebből a szempontból vizsgálva a hőszigetelő anyagokat, elmondható, hogy a hőszigetelő anyagok legfontosabb hőtechnikai jellemzője a kis hővezetési tényező.

Az anyag hővezetési tényezőjével ( $\lambda$  [W/(mK)]) a hőszigetelő képességét is jellemezzük. Minél kisebb a hővezetési tényező értéke, annál jobb hőszigetelő. A különböző halmazállapotú anyagok közül a gázok rendelkeznek a legkisebb hővezetési tényezővel. Mégis, egyszerűen a „gáz alakú” hőszigetelés nem elég. Az energetikai berendezéseket, a csővezetékeket, az épületeket ugyanis nagyrészt a környezeti levegő veszi körül. Ennek szigetelő hatása azonban nem megfelelő, mert a természetes konvekciós áramokat és a hőszugárzást nem képes kiküszöbölni. A mesterségesen előállított, vagy a természetben előforduló hőszigetelő anyagok jellemzője az üreges vagy pórusos szerkezet, a kis testsűrűség. Hővezetési tényezőjük az anyag vázát képező szilárd alkotórészek és a pórusokat, kapillárisokat kitöltő levegő (vagy más gáz) hővezetési tényezőjéből tevődik össze.

A szilárd alkotórészek hővezetési tényezőjének a levegő hővezetési tényezője csak néhány tized százaléka (2.2-1 táblázat). A sűrűségek aránya is hasonló nagyságrendű, és épp ebből

következik, hogy ugyanazon szilárd anyag-levegő rendszert vizsgálva a hővezetési tényező a testsűrűséggel egyenes arányban változik. Ez mindaddig igaz, amíg a pórusokban, kapillárisokban a konvekció nem lép fel, illetve nem jelentős. Magasabb hőmérsékleteken már lehetséges, hogy a nagyobb testsűrűségű (és ezzel kisebb pórustérfogatú, azaz mikropórusos) anyag alkalmazása mutat kedvezőbb hőszigetelési értéket, mert a makropórusokban fellépő konvekció ezeknek az anyagoknak a hőszigetelő képességét lerontja [7, 50, 112, 119].

A pórusok, kapillárisok nagyságának és elrendeződésének számottevő hatása van a hővezetési tényezőre. Azonos pórustérfogat mellett a pórusméretek növekedésével a hővezető képesség rohamosan nő. Nő akkor is, ha a pórusok eloszlása nem egyenletes, vagy összefüggő légcsatornákat, vagy a szilárd vázból álló hőhidakat képeznek. Szálaló vagy rostos anyagok esetében a pórustérfogat – hővezetési tényező diagram egy minimumon átmenő görbe. A jelenség szintén a szabad konvekció fellépésére vezethető vissza, amelyet a nagy összefüggő légcsatornák tesznek lehetővé.

anyag	hővezetési tényező ( $\lambda$ ) [W/(mK)] szobahőmérsékleten
nyugvó levegő (1 bar)	0,026 – 0,030
műanyagok	0,2 – 0,4
közönséges üveg	0,6 – 1,0
grafit, szén	5 – 100
rozsdamentes acél	13 – 20
normál szénacél	35 – 55
öntött vas	55 – 80
MgO	5 – 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (korund)	5 – 25

2.2-1 táblázat

Néhány szilárd anyag hővezetési ( $\lambda$ ) tényezője szobahőmérsékleten

A hőszigetelő anyagok hővezetési tényezőjét ( $\lambda$ ) két külső hatás jelentősen befolyásolja. Ezek

- a hőmérséklet –  $\lambda = \lambda(T)$  – és
- a nedvességtartalom.

A hőmérséklet okozta változásra mind a szilárd váz anyagi összetétele, mind a pórusokban

lévő levegő hatással van. A nagy pórustérfogatú anyagok esetében a két hatás közül a pórusokat kitöltő levegőnek van döntő szerepe, az előbb említett pórusokban kialakuló konvekció illetve sugárzás miatt.

Az anyag nedvességtartalmának is lényeges hatása van a hővezető képességre. A pórusos anyagok egyensúlyi nedvességtartalma a kémiai összetételüktől és az anyagi felépítésüktől függ. Az anyag egyensúlyi nedvességét okozó víz többnyire kapilláris hatáskövetkeztében tapad a szilárd vázhoz, vagy adszorbeálódik a szemcsék felületén és diffúzióval kerül be az anyag belsejébe. A hőszigetelő anyag belső pórusai, hézagai akkor szigetelnek megfelelően, ha száraz levegő tölti ki azokat. A nedvesség igen erősen rontja a szigetelőképeséget. A behatoló, vagy kicsapódó víz az egymással szomszédos anyagrészecskék között jól vezető hőhidakat képez. Még veszélyesebb, ha a szigetelőanyagban a magába szívott nedvesség jéggé fagy. Amíg a víz 10...15-ször, a jég 60-szor jobb hővezető, mint a száraz levegő [61]. A jégkristályok egyébként a szigetelőanyag szövetszerkezetét is roncsolhatják. Ezért a kicsapódás, nedvességbehatolás ellen a szigetelőréteget védeni kell. Az egyik védekezési mód pl., hogy zárt pórusokat tartalmazó hőszigetelő anyagot alkalmazunk, amelyekbe a nedvesség így nem tud bejutni.

A hőszigetelő anyagok mechanikai tulajdonságai (nyomó-, hajlító- és húzószilárdság, valamint egyes anyagoknál az összenyomhatóság és a rugalmasság) pórusos illetve kapilláris-pórusos vagy üreges szerkezetükkel összefüggő kis testsűrűség következtében többnyire kicsi és ez a testsűrűség csökkenésével rohamosan tovább csökken. A mechanikai tulajdonságok hőtechnikai szempontból mellékesek, de az alkalmazási lehetőségek szempontjából nem.

A hőszigetelő anyagok fontos tulajdonsága a hőállóság. A hőállóság az anyag azon képessége, hogy meghatározott hőmérsékletre felmelegítve az anyagot, az megtartja eredeti (hőtechnikai, szilárdsági, stb.) tulajdonságait, vagy ezek a tulajdonságok lényeges változást nem mutatnak. A hőszigetelő anyagok melegítés hatására mutatott viselkedését rendszerint az alkalmazási hőmérséklet felső határa jellemzi. A gyakorlat is megkülönbözteti a hőszigetelő anyagokat (MSZ EN 13172:2010) és a tűzálló hőszigetelő anyagokat (MSZ EN 1094-1:2008).

Szólni kell a vákuum szigetelő hatásáról is, mint egy megoldási lehetőségről. Az abszolút vákuum hővezetési tényezője nulla, mivel nincs benne anyag, ami a molekuláris vezetést végezhetné. De sugárzási veszteség még az abszolút vákuumnál is fellép, ami igen jelentős lehet. Ezért nem vezettek áttörő eredményre pl. az épületek vákuum-panelekkel történő

szigetelésére tett erőfeszítések [135]. E mellett a nagyon kis nyomás elérése (a részleges vákuum itt nem elégséges) és fenntartása energiát (vákuumszivattyú) és magasabb költségű műszaki színvonalat, megfelelő tömörséget igényel. Ezért a vákuum-szigetelések csak speciális helyeken, pl. a fókuszált napenergia begyűjtő rendszerek fókuszvonalában elhelyezett csöveknél váltak be.

A hőszigetelő anyagok fejlesztése területén ma már valójában nem a normál környezeti hőmérsékleti hővezetési tényező javítása a cél, hanem a magas hőmérsékleti szinteken produkált kis hővezetési tényező, vagy a szélesebb hőmérséklettűrés, a nagyobb termikus stabilitás elérése, illetve az egyéb mutatók pl. szilárdsági értékek javítása. Ilyen fejlesztéseket napjainkban is folyamatosan végeznek (pl. a fémhab).

A hőszigetelő anyagokat sokféle szempont alapján lehet csoportosítani, pl. milyen az anyagszerkezetük: szálal anyagok, pórusos anyagok, granulátumok, vagy az alapanyagok alapján: üveg, műanyag, stb.. A csoportosítások és felsorolások ismertetését terjedelmi okokból kihagyom, de az alábbi irodalmak e területen is kimerítő információval szolgálnak [7, 8, 32, 43, 149, 177, 188, 189, 194].

*Az irodalom alapján levonható következtetés a kereskedelmi forgalomban található  
hőszigetelő anyagokról*

Az ipari gyakorlatra elmondható, hogy a hőszigetelésnél a vezetőképesség alsó elméleti határát a nyugvó levegő hővezető képessége jelenti  $\approx 0,026 - 0,03 \text{ W/(mK)}$ .

A hőszigetelő anyagok hővezetési tényezője  $\approx 0,035 - 0,04 \text{ W/(mK)}$  a normál környezeti hőmérséklet-tartományban (kb.  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig) (2.2-2 táblázat). Nagyon jól megközelítik az elméletileg lehetséges legjobb értéket. Itt bármilyen további lényegi javulást (nagyságrendi javulást) várni ésszerűtlen. Ez alapján elmondható, hogy a normál környezeti hőmérsékletre lehet nagyon jó hőszigetelő anyagokat vásárolni.

*Néhány összegyűjtött gyakorlati szempont a hőszigetelés tervezéséhez*

- 1) A hőszigetelő anyagoknak van egy maximális alkalmazási hőmérsékletük, amely a termikus stabilitásukkal függ össze. E felett nem lehet alkalmazni ezeket.
- 2) A hővezetési tényező a hőmérséklet emelkedésével sokszor jelentősen romlik, tehát nem mindegy milyen hőmérséklet-tartományban alkalmazzuk a hőszigetelő anyagot.
- 3) A hővezetési tényezőt szintén nagyon lerontja a nedvesség, amennyiben be tud jutni a

szigetelőanyagba. Gyakorlatilag megszünteti az anyag szigetelőképességét. A víznek egy nagyságrenddel nagyobb hővezetési tényezője van  $\approx 0,6 \text{ W/(mK)}$ , mint a száraz nyugvó levegőnek. Ezért a nedvességre minden esetben gondolni kell. Célszerű vízzáróvá és páramentessé tenni a szigetelést, vagy olyan zárt pórusú szigetelést választani, amibe a nedvesség nem tud behatolni. Lehet helyes tervezéssel is elérni a páramentességet. Ebben az esetben a tervezés során kell figyelni arra, hogy a hőszigetelő anyagon belül a hőmérséklet soha ne legyen a víz kicsapódási hőmérséklete (telítési hőmérséklete) alatt.

4) Ha lehetséges a hőszugárzás, akkor az ellen védekezni kell. Főleg magasabb felületi hőmérsékletek, illetve a környező felületek alacsonyabb hőmérséklete esetén jelentős a hőszugárzás miatti energiaveszteség.

5) A hőszigetelésnek ellent kell állnia a környezeti hatásoknak. Ezek lehetnek fizikai (pl. mechanikai hatások, pl. lépésálló legyen, hőmérséklet, stb.), kémiai (pl. korrozív környezet) és biológiai (állatok, növények, mikroorganizmusok /baktériumok, gombafélék/) hatások.

6) Végül, de nem utolsósorban figyelni kell a felhordás, a hőszigetelő anyaggal való borítás módjára, az alkalmazási formára. Nem mindegy, hogy a szigetelést időnként el kell e távolítani (pl. karbantartás) vagy sem. Ezért azt is el kell dönteni, hogy leszerelhető és visszaszerelhető hőszigetelést, vagy egyszer használatos szigetelést célszerű alkalmazni.

anyag	testsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	max. alkalmazási hőmérséklet [°C]	középhőmérsékleti hővezetési tényező ( $\lambda$ ) [W/(mK)]		
			50 °C	200 °C	350 °C
nyugvó levegő	1,2		0,026 – 0,030		
	(20°C, 1 bar)		50 °C	200 °C	350 °C
kőzetgyapot	80	550	0,039	0,064	0,119
	100	650	0,039	0,061	0,098
	150	750	0,042	0,058	0,092
EPS	10	80	0,048		
	15	80	0,040		
	20	80	0,038		
PIR	32	90 (létezik 200 °C-ig is)	0,023-0,027		

2.2-2 táblázat

Néhány anyag hővezetési ( $\lambda$ ) tényezője [127, 144, 154], EPS – zártcellás expandált polisztirol hab; PIR – zártcellás (a cellákban pentán gáz) poliizocianát hab

## 2.3 A NAPENERGIA TERMIKUS HASZNOSÍTÁSA

Az ismert energiaforrásainkat, abból a szempontból, hogy felhasználásuk folytán kimerülnek-e vagy sem, két fő csoportra szokták osztani:

- a megújuló energiaforrásokra, amelyek készlete a használat során sem apad el, azaz kimeríthetetlenek és
- a kimerülő (nem megújuló) energiaforrásokra, amelyeknek a készletei végesek, használatuk az adott energiaforrás szűküléséhez, majd végül a kimerüléséhez vezet.

Azonban a megújuló energiaforrásokat sem tekinthetjük a felhasználás és a környezeti hatásuk szempontjából egyenrangúnak. Mindenki érzi, hogy a napsugárzás felhasználása nem ugyanaz, mint az erdők nagyüzemi kivágása, vagy az energianövények termesztése. Véleményem szerint célszerű megkülönböztetni az elsőrendű és másodrendű megújuló energiaforrásokat.

Elsőrendű megújuló energiaforrások emberi léptékkel nézve ténylegesen kimeríthetetlenek, még időszakosan sem képesek kimerülni, ilyen pl. a napsugárzás, az ár-apály energia, a geotermikus energia, a vízenergia, a szélenergia, a hullámzás energiája.

A másodlagos megújuló energiaforrások az ún. regenerálható, regenerálódó, újratermelő energiaforrások [182]. Ezek az energiaforrások időszakosan kimerülhetnek, készletük véges, de képesek újratermelődni. Ilyen energiaforrás pl. a fa, a termesztett energianövények, a biomassa, a biogáz, stb..

### 2.3.1 A napenergia hasznosítás elméleti háttere

A cél a napból érkező EMH energiájának hasznosítása. Mennyi energia érkezik a napból? A kérdés megválaszolásához szükséges ismereteket tartalmazza ez a fejezet.

A napsugárzással kapcsolatos számunkra legfontosabb fogalmak [45]:

- a napállandó,
- a napsugárzás spektrális eloszlása,
- az albedó (reflexió) és a légkör abszorpciója,
- a napsugárzás beesési szöge és
- a napsugárzás időtartama.

**A napállandó** a légkör felső határán, a sugárzás terjedési irányára merőleges egységnyi felületre, időegység alatt érkező napsugárzásnak a teljes hullámhossz tartományra integrált

energiája átlagos Nap-Föld távolságban. **Értéke  $1366 \text{ W/m}^2$**  a NASA mérése szerint (más irodalmak  $1353 \text{ W/m}^2$  értéket adnak meg [36, 37]). A napállandó, a neve ellenére nem állandó érték  $1321 \text{ W/m}^2$  és  $1413 \text{ W/m}^2$  között változik. Ennek több oka is van pl. a napciklusok, a napfoltok, stb.. Ezért újabban a „teljes szoláris besugárzás” (Total Solar Irradiance – TSI) elnevezést is használják.

Ismert, hogy a Föld elliptikus pályán kering, aminek egyik gyújtópontjában van a Nap, azonban a pálya excentricitása nem jelentős, gyakorlatilag körpályának tekinthető. A Nap-Föld távolság csak kb. 1,7%-ban ingadozik [96].

Az energetikai célú napsugárzás hasznosítási feladatoknál azonban nyugodtan számolhatunk a napállandóval, és mind a napállandó ingadozást, mind a Nap-Föld távolság változásából fakadó teljesítmény-ingadozásokat elhanyagolhatjuk.

A napállandó értékét a Stefan-Boltzmann törvény alapján magunk is meghatározhatjuk.

Adatok: a Nap-Föld közepes távolsága:  $r_{\text{Nap-Föld}} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$  ( $\approx 150$  millió km),  
a Nap sugara  $r_{\text{Nap}} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$  ( $\approx 700$  ezer km),  $r_{\text{Nap}} = 109,12 \cdot r_{\text{Föld}}$ ,  
a Nap felszíni hőmérséklete  $T_{\text{Nap}} = 5785 \text{ K}$  [45, 137].

A Napot abszolút fekete testnek, gömb alakúnak és felületi sugárzónak tekintjük. A felszínén a hőáram:

$$\dot{Q} = A_{\text{Nap}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{Nap}}^4 = 4\pi r_{\text{Nap}}^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{Nap}}^4, \quad (2.3.1-1)$$

$$\dot{Q} = 4 \cdot \pi \cdot (6,96 \cdot 10^8)^2 \text{ m}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 5785^4 \text{ K}^4 \approx 3,866 \cdot 10^{26} \text{ W}. \quad (2.3.1-2)$$

A felszíntől a Föld távolságában a hőáramsűrűség:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A'} = \frac{\dot{Q}}{4\pi(r_{\text{Nap}} + r_{\text{Nap-Föld}})^2} \approx 1362 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (2.3.1-3)$$

ahol  $A'$  az  $(r_{\text{Nap}} + r_{\text{Nap-Föld}})$  sugarú gömb felülete. A kapott érték jó egyezést mutat a NASA által mért értékkel, az  $1366 \text{ W/m}^2$  értékkel.

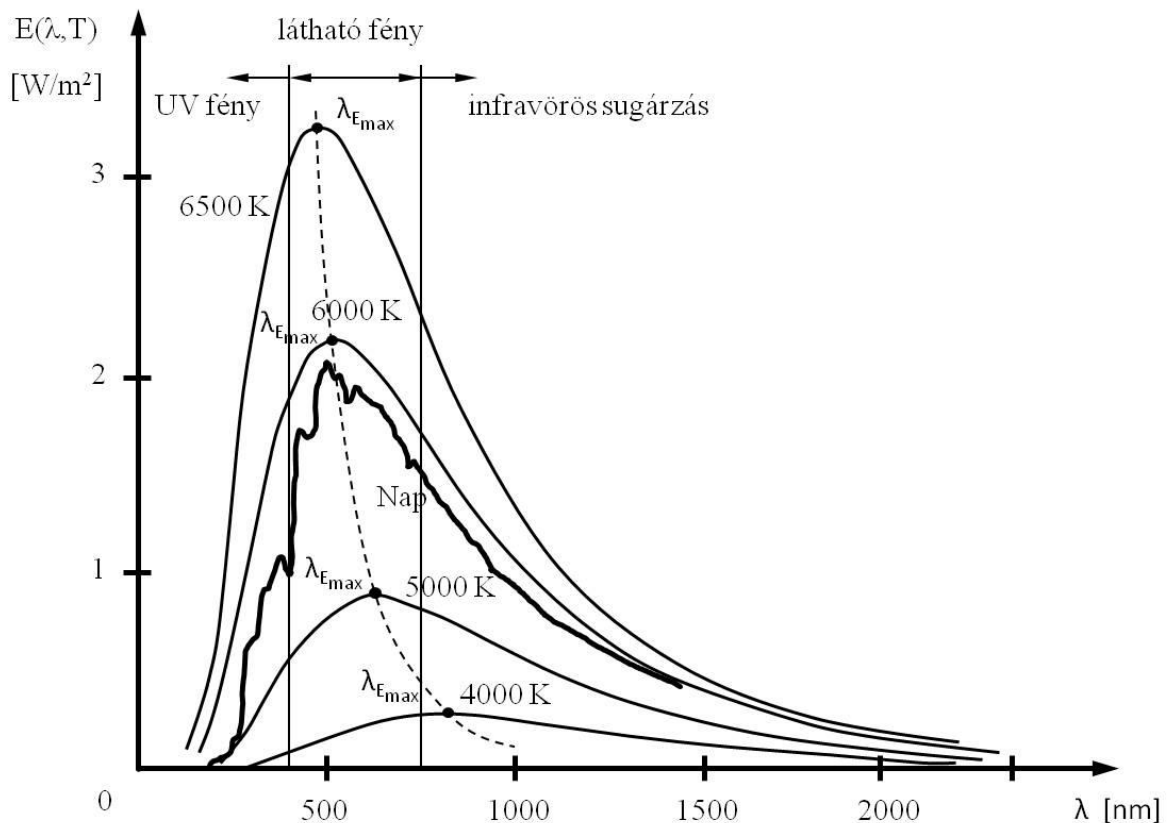
A Föld termikus egyensúlyban van a környezetével (különben kihűlne vagy felmelegedne), azaz akkora energiát kell kisugározni a világűrbe, mint amit onnan abszorbeál, és amit önmaga fejleszt (belső forrás). Ha elhanyagoljuk a belső hőforrást, a földhőt, a beérkező sugárzás abszorbeált energiamennyiségéből kiszámolható, mekkora a Föld (felületi) hőmérséklete csillagászatilag (a saját számításom szerint  $1,3^\circ\text{C}$  körüli). A földhőt nyugodtan

elhanyagolhatjuk a számításoknál, mert a földi hőtermelést a beérkező napsugárzás energiájának csak néhány század százaléka.

**A napsugárzás spektrális eloszlása.** A (2.1.3-2) egyenlet, a Planck-féle sugárzási törvény alapján a frekvencia-tartomány tetszőleges sűrűséggel kijelölt pontjaira számítható  $E(\nu, T)$  függvény, vagyis a hőmérsékleti sugárzás energiaspektruma. Ezt az  $E(\nu, T)$  vs.  $\nu$  függvényt, ami a

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.3.1-4)$$

összefüggés felhasználásával, ahol  $c$  a fény sebessége [m/s],  $\lambda$  az EMH hullámhossza [m],  $\nu$  az EMH frekvenciája [1/s], megadható a jobban ismert  $E(\lambda, T)$  vs.  $\lambda$  függvényként is. A spektrális eloszlás bonyolult kifejezésnek tűnik, de ez nem más, mint a  $E(\lambda, T)$  vs.  $\lambda$  függvény görbéje (2.3.1-1 ábra). A Planck törvény értelmében egy test adott hullámhosszú kisugárzásának energiája és így a felületi energiasűrűsége csak a hőmérséklettől függ. Ez azt jelenti, hogy a Naptól érkező sugárzás energiaspektruma csak a Nap felszíni hőmérsékletétől, az 5785 K-tól függ.



2.3.1-1 ábra

Fekete test hőmérsékleti sugárzása [137]

A 2.3.1-1 ábráról négy dolgot érdemes kiemelni.

1) A napsugárzás spektrális eloszlásából látszik, hogy energiájának csak kis részét (9%) adja az az ibolyántúli sugárzás (290 – 400 nm), közel a felét (49%) adja a látható fény (400 – 750 nm) és kevesebb, mint a felét (42%) adja az infravörös (750 nm  $\geq$ ) sugárzás [69]. Az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) kiadványa szerint az arány 7-46-47%. Az irodalomban csak az infravörös sugárzást hívják hőszugárzásnak, de ez véleményem szerint félrevezető, mivel itt a teljes spektrum hőmérsékleti sugárzás, tehát hőszugárzás és nem más, egyéb karakterisztikus sugárzás. Kétségtelen, hogy a vizet az infravörös sugárzási tartomány gerjeszti a leginkább (a víz elnyelési sávjai ebben a tartományban vannak), de más anyagokra ez már így nem teljesen igaz. Az ábrából látszik az ismert jelenség is, hogy csak a magasabb hőfokokon jellemző a látható fény kibocsátása (pl. vörös izzás).

2) A Föld más spektrális eloszlásban sugározza vissza az energiát a világűrbe, mint amilyen eloszlásban az érkezik, mivel a Föld hőmérséklete sokkal kisebb, mint a nap hőmérséklete. A föld által kisugárzott EMH spektrális eloszlásában a hosszuhullámok alkotják a jelentősebb részt.<sup>6</sup>

3) A Planck-féle sugárzási törvény jól leírja, igazolta a Wien-féle eltolódási törvényt is. A Wien-féle eltolódási törvény kimondja, hogy a test hőmérsékleti sugárzásának legnagyobb energiájú hullámhossza  $\lambda_{\max}$  az abszolút hőmérséklettől függ. A legnagyobb energiával kisugárzott EMH hullámhossza és az abszolút hőmérséklet szorzata állandó:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ mK} . \quad (2.3.1-5)$$

Az abszolút fekete test által kisugárzott hőmérsékleti sugárzás hullámhossz szerinti maximuma a hőmérséklet növekedésével a rövidebb hullámhosszak felé tolódik el. Mivel a Wien-féle törvény a  $\lambda_{\max}$ -ot adja meg, azt úgy is megkaphatjuk, ha meghatározzuk  $E(\lambda, T)$  vs.  $\lambda$  függvény szélsőértékét. Tehát a Wien-féle törvény a Planck-féle sugárzási törvényből deriválásával levezethető (szélsőérték feladat).

4) Ahogy már a 2.1.3 fejezetben szó volt róla, a melegebb testek spektrális eloszlásgörbéje teljes egészében magában foglalja a hidegebb testek spektrális eloszlásgörbéjét, igazolva azt, hogy hidegebb helyről melegebb helyre nem mehet energia.

---

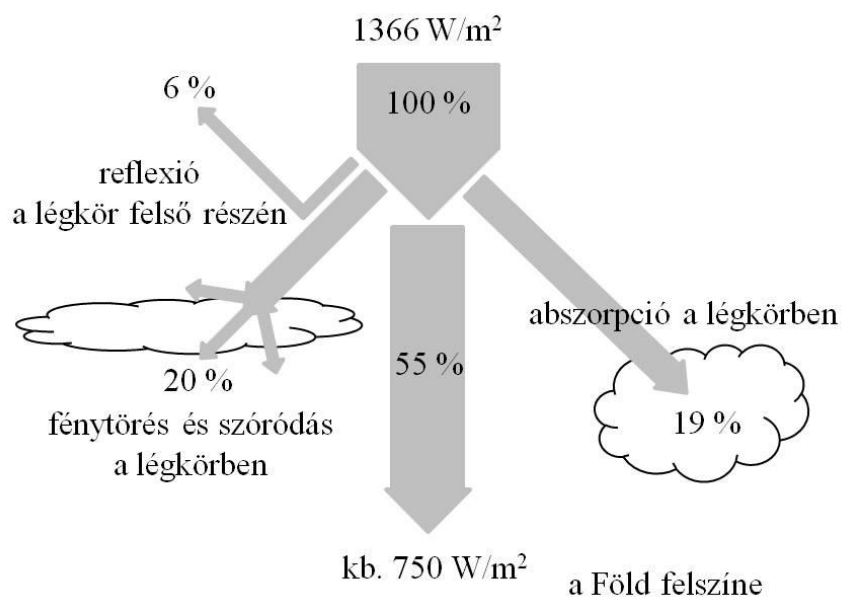
<sup>6</sup> Ez az alapja az üvegházak működésének is. Az üveg átbocsátó képessége hosszuhullámon kisebb, mint rövidhullámon. Ezért a rövidhullámokban gazdagabb érkező EMH-okat átengedi, de a föld és a növényzet által kibocsátott hosszuhullámokban gazdag EMH-okat már nem, illetve csak kisebb részarányban engedi át. Így tartja vissza az energiát.

**Az albedó** a felületre érkező EMH visszaverődési képességének mérőszáma, az egységnél kisebb szám, amely megmutatja, hogy egy adott felületre érkező sugárzás mekkora része verődik vissza. Minél nagyobb ez a szám, annál több sugárzás verődik vissza.

A légkör fényvisszaverő képességétől meg kell különböztetnünk a légkör abszorpciós képességét, amelynek fő okozói a víz és az üvegházhatást okozó gázok (pl. CO<sub>2</sub>).

A nappól érkező EMH-ok a légkört elérve a légkör felső részén egyrészt visszaverődnek a világűrbe, másrészt a légkörben elnyelődnek, illetve a légkörön belül is szóródnak (ez okozza a nappali égbolt világos színét), és csak a maradék rész éri el közvetlenül a földfelületet. Az előbb ismertetett folyamatok miatt a földet elérő EMH-nak nem csak a fluxusa csökken, de a spektrális összetétele is megváltozik. A légkörben a víz miatt főleg az infravörös sugárzás abszorbeálódik, ezért a földfelszínre érkező direkt sugárzás spektrális eloszlása a rövidebb hullámhossz tartomány felé tolódik el. Ez főleg a fotovoltaikus (PV) rendszereknél lényeges. Nem találtam arra vonatkozólag vizsgálati adatokat, hogy a légkörön átjutó direkt sugárzás spektrális eloszlása hatással van-e és ha igen, akkor milyen a hatása a fókuszált napsugárzás hasznosítására. Az ilyen spektrális eloszlású EMH-okat fókuszálva, milyen közeget képes a legjobb hatásokkal felmelegíteni, vizet, levegőt, stb.? Ez egy további kutatandó terület.

A fentiekből látszik, sok tényező függvénye, hogy mennyi direkt sugárzás éri el a földfelszínt (2.3.1-2 ábra). Ezeket az értékeket azonban folyamatosan mérik, így ismert, mi jellemző egy adott területen.

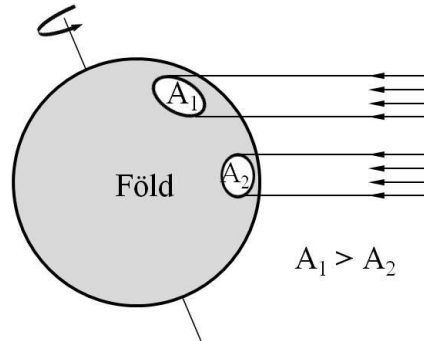


2.3.1-2 ábra

A napsugárzás légköri szóródása és abszorpciója. A légkörön belüli százalékos értékek időjárásfüggőek.

**A napsugárzás beesési szögét** három dolog befolyásolja.

1) A Föld gömb alakú, ezért a Földre párhuzamosan érkező sugárzás a felületet különböző beesési szögben éri el. Emiatt az azonos sugárnyalábok a felszínen más-más méretű területet „világítanak” be (2.3.1-3 ábra).



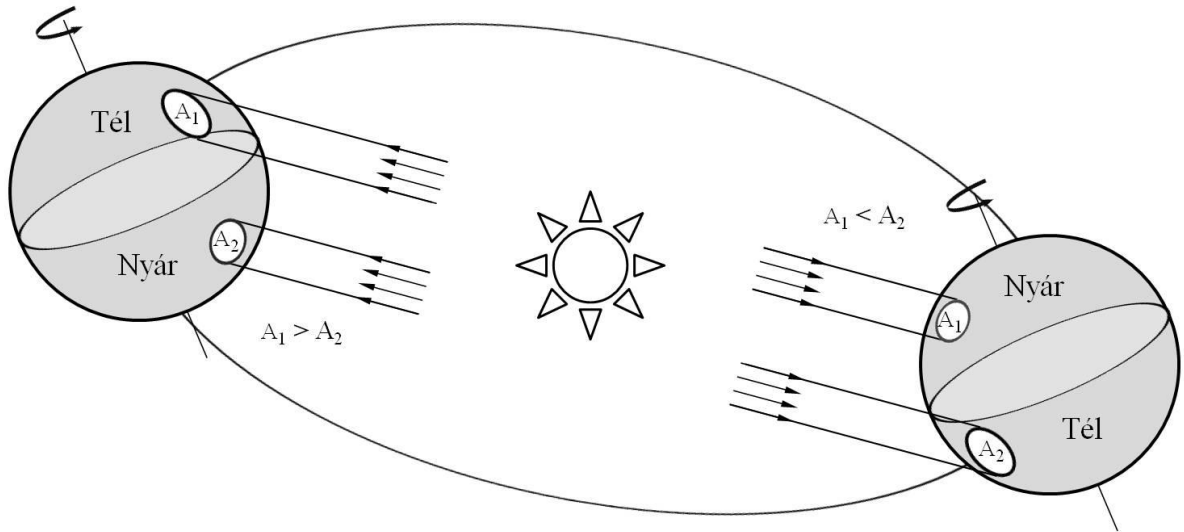
2.2.1-3 ábra

A besugárzott területek nagysága a földi pozíciótól függően

A felszíni felületre vonatkoztatva a sugárzási teljesítmény a sugárzás vektor felületi normálistól való eltérésének növekedésével csökken. A Föld (vízszintes) felszínére jutó energia ezért közvetlenül függ a földrajzi szélességtől, de ha a sugárzásra merőleges felületre vonatkoztatunk, akkor a sugárzási teljesítmény minden szélességi körön azonos, amennyiben a légkör gyengítési tényezőjét figyelmen kívül hagyjuk.

2) A Föld a saját tengelye körül forog, ezért az adott földrajzi hosszúságú fokon lévő felület helyzete folyamatosan változik a napsugárzáshoz viszonyítva.

3) A Föld forgási tengelye a Nap körüli forgási síkra nem merőleges, a dőlésszöge  $23,5^\circ$ . Ebből kifolyólag nem csak a Föld saját tengelye körüli forgás és a gömb alak miatt változik a sugárzás beesési szöge, hanem a Nap körüli forgás miatt is. A Föld a „körpálya” egyik felén az északi félteke felületével kerül merőlegesebb besugárzási helyzetbe, a körpálya másik felén pedig a déli félteke felületével kerül merőlegesebb besugárzási helyzetbe a napsugárzáshoz viszonyítva. Tehát egyrészt a féltekék Naptól való távolsága befolyásolja a felületre érkező energiamennyiséget (a távolság fluxus csökkentő hatása miatt, ez szinte elhanyagolható, de létezik), másrészt a félteke felületi normálisának helyzete befolyásolja a felületre érkező energia mennyiségét (ez utóbbi a jelentősebb hatású). Ez okozza a téli-nyári időszakok kialakulását, valamint a váltakozását az északi és a déli félteke között (2.3.1-4). Az a félteke kap nagyobb energiát, amelyik közelebb van a Naphoz és a felületi normálisa kisebb mértékben tér el a beérkező sugárzás irányától.



2.3.1-4 ábra

A Nap körüli forgásból adódó besugárzási szög változása

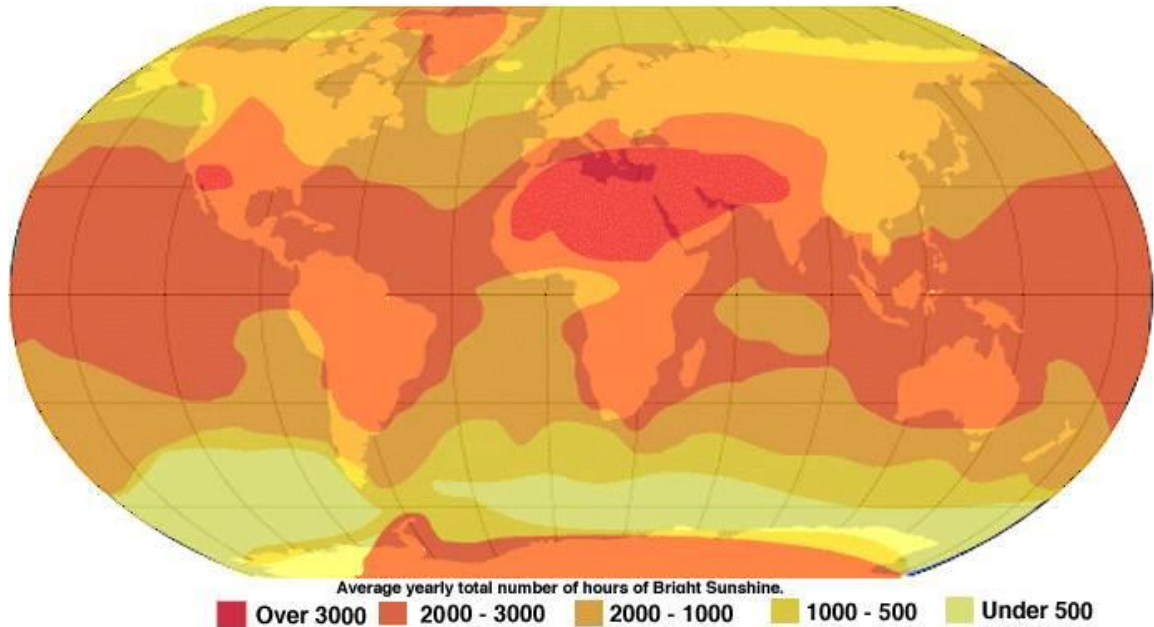
A napsugárzás beesési szögének változásával nemcsak a besugárzott felszíni felület nagysága változik. Változik annak a légrétegnek a vastagsága is, amin a sugárzásnak át kell jutnia, hogy elérje a felszínt, valamint változik a légrétegbe érkező sugár beesési iránya is. Az előbbi jelenség az abszorpciót és a reflexiót, az utóbbi a fénytörés miatt a reggeli és az esti időszakban a sugárzás spektrális eloszlását befolyásolja. Ez utóbbi jelenségeket a felszíni berendezésekkel kivédeni nem tudjuk de, ha a napsugárzást hasznosító berendezés követi a nap „mozgását”, tartja a sugárzásra merőleges síkot (felületet), akkor a felület dőlési szögének változásából adódó felületet érő fluxus-csökkenést jó közelítéssel kiküszöbölhetjük.

A gyakorlati mérések igazolják, hogy tiszta időben a napsugárzásra merőleges felületre vonatkoztatva téli, nyári időszaktól függetlenül a felszíni sugárzás teljesítménye eléri az  $1000 \text{ W/m}^2$  értéket. Az abszorpciós és reflexiós hatások miatt a magasabban fekvő területek és a légszennyezéstől kevésbé érintett területek a kedvezőbbek.

**A napsugárzás időtartama.** A légkörön áthaladó közvetlen sugárzást direkt sugárzásnak nevezik. Azt az időtartamot pedig, amikor a direkt sugárzás értéke a  $210 \text{ W/m}^2$  értéket meghaladja, napsütéses időszaknak nevezik [118].

Két dolog befolyásolja a napsütéses órák számát. Az egyik befolyásoló tényező, hogy milyen hosszúak a nappalok. Mivel a Föld forgási tengelye nem merőleges a keringés síkjára a nappalok látszólagos hossza a nap körüli keringés függvényében változik. Nyári időszakban, amikor magas a Nap pályáíve, hosszabb nappalok és rövidebb szürkületi idők

tapasztalhatóak. Téli időben a Nap pályáíve alacsonyabb, a nappalok rövidebbek, a szürkületi idők pedig hosszabbak. A másik befolyásoló tényező az adott területre jellemző éghajlat, az adott területre jellemző időjárási viszonyok azaz, hogy mennyire felhős az a terület általában. Jól látszik a 2.3.1-5 ábrából, hogy nem az egyenlítőn a legtöbb a napsütéses órák száma, hanem a Szaharában és az USA délnyugati részén (Arizona sivatagi részei).



2.3.1-5 ábra

A napsütéses órák számának alakulása a Földön (forrás: World Research Institute)

### 2.3.2 A napenergia energetikai célú hasznosításának módszerei

Az energetikai célú napenergia felhasználás technológiáit két csoportra szokás osztani:

- a passzív napenergia hasznosító eljárások, módszerek és
- az aktív napenergia hasznosító eljárások, módszerek.

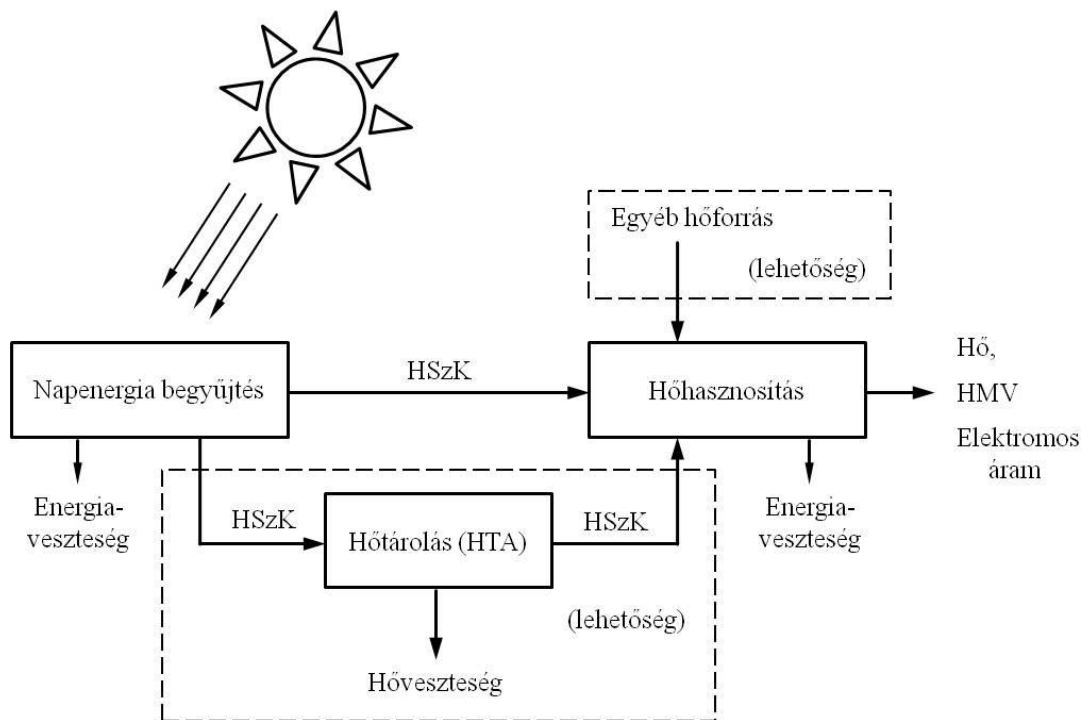
**Passzív napenergia hasznosításnak** nevezzük azokat az eljárásokat, amikor a technológiában mozgó, forgó gépek, gépi alkatrészek nincsenek. Ide soroljuk *(1) a különböző építészeti megoldásokat*, mint pl.:

- az épületek tájolását,
- a különböző hő-csapidák alkalmazását (üvegház, fóliasátor, átlátszó szigetelések, stb.),
- az ún. tömegfalat, az árnyékolókat, stb..

Cél, hogy maga az épület illetve a létesítmény legyen a kollektor (gyűjtő) és egyben a tároló is [68].

A passzív napenergia hasznosításához kell sorolni (2) a *napelemes* (fotovoltaikus) napenergia hasznosítást is. Ugyanis a napelemek fixen állnak, rögzítettek, nem forognak. Természetesen a minél kedvezőbb napsugár beesési szög biztosítása érdekében többnyire tudatosan tájolják és döntik a napelemeket [103].

**Aktív napenergia hasznosításnak** nevezzük azokat az eljárásokat, amelyeknek a technológiájában mozgó, forgó gépek (pl. szivattyú, ventilátor), gépalkatrészek találhatóak [69, 100]. A technológia alatt kell érteni a napsugárzás energiájának begyűjtését és a begyűjtött energia (hő) szállítását a hasznosító technológiához. Az igényektől függően tárolás is szükséges lehet, de ez nem kizárólagos feltétele a napenergia hasznosításának (2.3.2-1 ábra). Ugyanígy léteznek ún. hibrid rendszerek is, ahol egyéb külső energiaforrást is alkalmaznak a napenergia mellett [6].



2.3.2-1 ábra

### A napenergia hasznosítás technológiai rendszere

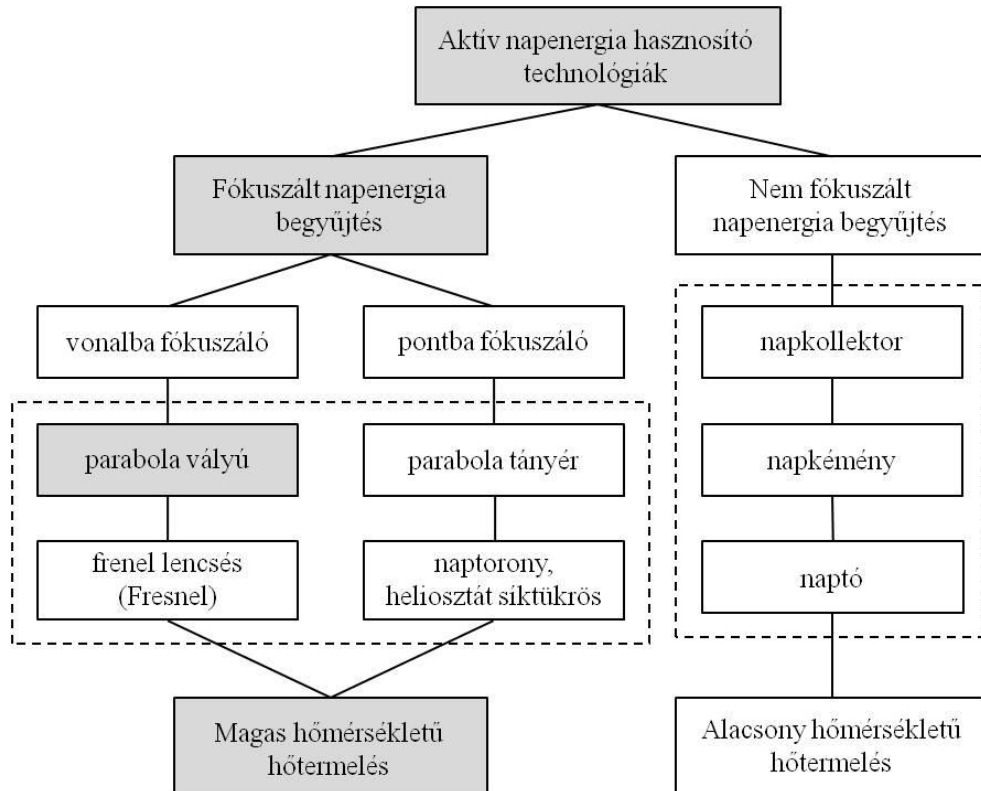
A 2.3.2-2 ábra nyújt áttekintést az aktív napenergia hasznosító eljárások energiagyűjtő rendszereiről és azok eredményéről [139, 147]. Jól látható és érthető is, hogy csak a fókuszált napenergia begyűjtési módszerek biztosítanak magas hőmérsékletű hőtermelést. Nem mondhatjuk el viszont azt, hogy csak a magas hőmérsékletű (> 100°C) hőtárolás lenne az egyetlen megoldás arra, hogy minél több kinyerhető energiát, azaz exergiát tárolhassunk egy adott térfogatban, ugyanis a fázisváltó anyagok használatával, vagy a termokémiai reakciók

adta hőfelszabadulás kihasználásával szintén van lehetőség a víz hőtároló képességénél nagyobb energia tárolására.

Minden napenergia begyűjtésnél vannak veszteségek, amelyek egyrészt lehetnek:

- optikai veszteségek, ezek függetlenek a hőmérséklettől, másrészt pedig
- hőveszteségek.

Mint, ahogy a 2.3.1 fejezetben szó volt róla, a napból érkező termikus elektromágneses hullámok (EMH) a légkört elérve egyrészt visszaverődnek a világűrbe, másrészt a légkörben elnyelődnek, illetve a légkörön belül is szóródnak, és csak a maradék rész éri el közvetlenül a földfelületet (2.3.1-2. ábra). Ez a maradék rész, amely a légkörön közvetlenül áthalad a direkt sugárzás. Fő jellemzője, hogy gyakorlatilag párhuzamos sugarakból álló EMH-ok, amelyek optikai módszerekkel (tükör, lencse) fókuszálhatóak. Tehát a fókuszált napenergia begyűjtés csak ezt a direkt sugárzást képes összegyűjteni, fókuszálni, míg a nem fókuszált napenergiát hasznosító rendszerek a teljes sugárzást, az ún. globális sugárzást felhasználják. A globális sugárzás a direkt sugárzás mellett tartalmazza a szórt sugárzást is, ezért teljesítménye nagyobb, mint a direkt sugárzás teljesítménye, de begyűjtése csak alacsony hőmérsékletű hőt termel.



2.3.2-2 ábra

Az aktív napenergia hasznosító technológiák energiagyűjtő rendszerei

A direkt sugárzás fókuszálása megköveteli a nap látszólagos mozgásának követését. A napkövetés miatt, ez az eljárás bonyolultabb technológia, mint a globális sugárzást hasznosító technológiák, mert itt gondoskodni kell a napkövetés mechanikájáról és a vezérléséről. Ez nem csak technikai probléma, hanem külső energia felhasználással is jár. A jelenlegi műszaki megoldások optikai hatékonysága viszont nagyon jó, 98% körül van.

E fejezet végén szólni kell arról, hogy nagyon sok és nagyon sokféle megvalósult technológia létezik a világban a napenergia energetikai hasznosítására. Léteznek önálló nap hőerőművek (gőzturbinás, gázturbinás, stb.), léteznek nem önálló alkalmazások, hanem kiegészítő megoldások, főleg előmelegítésekre, levegő vagy erőművi tápvíz előmelegítésre, stb.. E mellett nagyon sok új technológiai javaslat is van (szorpciós, termokémiai, napkémény, stirling motor, kombinált/összetett eljárások, stb.) [66, 71, 73, 75, 77, 91, 92, 96, 117, 122, 143, 158, 163, 173, 185, 199 ].

### **2.3.3 A hőtárolás**

A Földön, egy adott helyről, egy rögzített pontból vizsgálva, a napenergia egy időfüggő, diszharmonikus és kiszámíthatatlan energiaforrás [35, 36]. Ez a felhasználás szempontjából nagyon hátrányos. Sajnos a nap többnyire nem akkor „süt”, amikor szükség lenne rá, és nem is mindig olyan „erővel”, mint ahogy azt mi szeretnénk. Ezért a napenergia hasznosítása során nem csak a sugárzás begyűjtésére, de puffer energiatárolóra is szükség van. Ennek egyik módja a hőtárolás.

A hőtárolás során igyekszünk megőrizni a tároló energiatartalmát. A tároló energiatartalma csak akkor marad változatlan, ha egyensúlyi állapotban van a környezetével, vagy egy kinetikai gát megakadályozza az energiacserét a környezettel, ilyen esetben a tárolás során nincs energia, illetve exergia veszteségünk. Azonban, ha a megnövelt energiájú rendszerünk nincs egyensúlyi állapotban, vagy a kinetikai gát nem tudja teljesen megakadályozni az energiacserét a környezettel, akkor energia illetve exergia veszteség lép fel. A hőszigetelés is valójában egy ilyen kinetikai gát, amely teljesen ugyan nem akadályozza meg, de lassítja az energiacserét.

Kötelességünk megemlíteni, hogy a nemzetközi irodalom a világ első energiatárolójaként (hidegenergia tárolóként) említi a Parlament építésénél kialakított jégtárolót, amely képes volt egész nyáron át biztosítani a hatalmas épület hűtését. A Duna jegét, valamint a Balaton jegét, amelyet lovas kocsival szállítottak Budapestre, tették a Parlament hatalmas földalatti tárolójába, ahonnan ventilátorok segítségével áramoltatták a hideg levegőt az épületbe. Nem

tudom, hogy a rendszer hőfelvételével (negatív hőveszteség) kapcsolatban végeztek-e számításokat, de a gyakorlat igazolta, hogy hőszigetelés nélkül is működött a tárolási technológia. A tároló nagy mérete miatt a hőfelvétel az egész rendszerhez képest kicsi volt. Ez a jelen dolgozatban olvasható kutatási eredmények ismeretében ma már számomra is érthető.

### *Elérhető hőtárolási lehetőségek*

Ahhoz, hogy könnyebben áttekintsük a hőtárolási lehetőségeket érdemes őket rendszerezni. Hőtárolás módjairól jó áttekintés nyújt pl. [5, 26, 52, 53, 57, 85], a szezonális hőtárolásról pedig pl. [114, 138] irodalom. Ezeket a munkákat is felhasználva, de átdolgozva és kiegészítve, ebben a dolgozatban háromféle szempont szerint rendszerezem a hőtárolási lehetőségeket [25]

- a tárolási mechanizmus szerint,
- a tároló szerkezeti (konstrukciós) kialakítása szerint és
- a tárolási koncepció szerint.

**A tárolási mechanizmus szerint** a hőtárolásnak klasszikusan 3 módját különböztetik meg [138, 139]:

- az érzékelhető,
- a látens és
- a kémiai hőtárolást.

Itt valójában arról van szó, hogy mi a hőtároló anyag és annak, vagy azoknak milyen tulajdonsága használható ki.

Hőtároló anyagnak csak azok az anyagok nevezhetőek, amelyek képesek az energiát hő formájában felvenni, majd hő formájában leadni és ezt ciklikusan (reverzibilisen) képesek teljesíteni. Nem tekinthetőek ilyen értelemben hőtároló anyagoknak azok az anyagok amelyek hőleadás után hőfelvételre újra nem képesek. Ezek többnyire a tüzelőanyagok, ahol a kémiai reakció (az oxidáció) nem megfordítható. Az elektrolízissel előállított hidrogén sem hőtároló anyag, mert nem hőt vesz fel, hanem tüzelőanyagként szerepel az energia konverzióban.

#### **2.3.3.1 Az érzékelhető hőtárolás**

Az érzékelhető hőtárolás során a hőtároló anyag (HTA) halmazállapota, kémiai összetétele, az anyaghalmaz szerkezeti felépítése (pl. a kristályszerkezete) a hőtároló működési

hőmérséklet-határai ( $T_{\min}$  és  $T_{\max}$ ) között változatlan marad. A HTA aktuális hőmérsékletének ( $T_i$ ) ismeretében a kinyerhető energia a (2.1.5-3) és a (2.1.5-4) egyenlet szerint könnyen kiszámolható. Ez a legismertebb és leggyakoribb a hőtárolási mód. Bármilyen anyag használható hozzá, de a HTA annál jobb,

- minél nagyobb a térfogati hőkapacitása,
- minél nagyobb az alkalmazhatósági hőmérséklettartománya és
- minél jobb a hővezetési tényezője.

A 2.3.3.1-1 táblázatban néhány anyag jellemzője látható.

A legelterjedtebb HTA a víz. Előnye, hogy nagyon jó térfogati hőkapacitása van, nem éghető, nem mérgező, termikusan stabil vegyület, olcsó, könnyen hozzáférhető közeg. Hátránya, hogy csak alacsony hőmérsékleti szintig használható (atmoszférikus viszonyok között kb. 95 °C-ig), emiatt kicsi az alkalmazhatósági hőmérséklet-tartománya.

Magasabb hőmérsékletű (> 300°C) tárolásoknál, a vonalba fókuszáló naperóművi felhasználásoknál a víz már nem alkalmas HTA-nak, ezért különböző eutektikus összetételű só olvadékokat és szilárd anyagokat (pl. beton) alkalmaznak [76, 178]. Az olvadt só nagy hátránya, hogy a környezeti hőmérsékleten megdermed, ezért alkalmazásánál fűtéssel ellátott tartályok szükségesek. További komplikációt okoz, hogy egyes technológiáknál (pl. a parabolavályús napenergia begyűjtésnél) külön hőszállító közeget (HSzK-et) kell alkalmazni. HSzK-ként az ásványi és szintetikus eredetű termikus olajok [122], az ionos folyadékok és a nyomás alatti víz használata terjedt el. A nagyon magas hőmérsékletű (> 700°C) pontba fókuszáló napenergia begyűjtésű rendszereknél, mint pl. a naptornyos rendszerek, HSzK-ként az olvadt só helyett a levegő alkalmazására is van példa, de léteznek javaslatok a folyékony nátrium vagy lítium használatára is. A folyékony fémek kutatását az atomenergia ipar indukálta [51].

Az utóbbi idők kutatási területe a nagyobb hőmérséklet-tartományban alkalmazható különböző szilárd anyagok vizsgálata, fejlesztése. Ennek eredménye a hőtároló beton használata (DLR Institut für Solarforschung), vagy a grafit, mint lehetséges hőtároló anyagként való megjelenése [3, 111, 146, 178,].

Az érzékelhető hőtárolásnál kell megemlíteni a földalatti tárolások közegeit is, a talajvizet, a különböző sziklás részeket (gránit, bazalt, stb.) és a változó összetételű talajokat. Jellemzőjük, hogy ezek is alacsony hőmérsékleti szintű tárolók, és a sziklás kőzetek kivételével főleg a víztartalomtól származó hőtároló képességük van. Előnyük, hogy természeti adottságok.

Anyag	Alkalmazási hőmérséklet-tartomány $\Delta T$ [°C]	Halmaz-állapot	Fajlagos hőkapacitás $c_p$ [kJ/(kgK)]	Fajlagos térfogati hőkapacitás [MJ/m <sup>3</sup> K] *	Hővezető képesség $\lambda$ [W/(mK)] **
víz	(0 – 100) 65-95 fagyveszély	folyadék	4,18	4,17	0,63 (38°C-on)
víz-etilén-glikol 50/50%	-30 – 105	folyadék	3,47	3,64	n.a.
Ásványolaj (MOL Thermol 32)	-12 – 310	folyadék	1,8 – 3,0	1,6 – 2,0	0,13 – 0,11
Szintetikus olaj (Therminol 66)	-9 - 343	folyadék	2,1 (343 °C-on)	1,58 (343 °C-on)	0,11 (343 °C-on)
Szilikonolaj SYLTHERM 800	-40 – 400	folyadék	1,7 – 2,2	1,5 – 1,3	0,12 – 0,07
HITEC HTF Salt 7 % NaNO <sub>3</sub> 53 % KNO <sub>3</sub> 40 % NaNO <sub>2</sub>	149 - 454	só olvadék	1,93 – 1,72	2,7 – 3,0	0,45 – 0,29
nátrium	371 – 1165	fém olvadék	1,4	1,5	84
lítium	180 – 1335	fém olvadék	4,17	2,15 – 1,7	44
grafit	op.: 3500	szilárd	1,9	3,23	0,2 – 0,9
ásványi szén	op.: >3000	szilárd	1,2 – 7,2	n.a.	0,2 – 0,9
öntöttvas	op.: 1150-1400 (C-tartalomtól függ)	szilárd	0,46	3,13 – 3,59	45 - 80
normál szénacél	op.: 1200-1450 (C-tartalomtól függ)	szilárd	0,49	3,85	30 -50
magnezit (MgO)	op.: 2852	szilárd	1,17	3,54	8,4 (500°C-on)
korrund (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	op.: 2020	szilárd	0,90	3,30	7,6
szóda (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	n.a.	szilárd	1,09	2,74	n.a.
gránit, bazalt	n.a.	szilárd	0,82; 0,84	2,16; 2,35	1,73 -3,98
száraz homok (SiO <sub>2</sub> )	op.: 1460	szilárd	0,8	1,28	
talaj (nedves)	n.a.	szilárd	2,1	3,6	2,5
talaj (száraz)	n.a.	Szilárd	0,80	1,00	0,25
beton	n.a.	szilárd	1,13	2,53	0,9 – 1,3

2.3.3.1-1 táblázat

Néhány érzékelhető hőtárolásra használt anyag és jellemzői [2, 10, 53, 80, 149, 170, 176,]

\*a sűrűségtől függ, \*\*a hőmérséklettől függ

### 2.3.3.2 Hőtárolás látens (rejtett) hőben

Ennél a hőtárolási módnál egy szűk hőmérséklet tartományban nagyobb energiát lehet tárolni illetve felszabadítani, mint az érzékelhető hőtárolással. Hátránya, hogy a fázisváltás alatt nincs hőmérsékletváltozás (izoterm folyamat), ezért a folyamat lefutását közvetlen hőmérsékletméréssel követni nem lehet, de egyéb módszerek adhatnak közvetett lehetőséget a folyamat lefutásának mérésére, a tároló energiataralmának meghatározására. További problémát jelent, hogy számítani kell a fázisváltozást kísérő térfogatváltozással is.

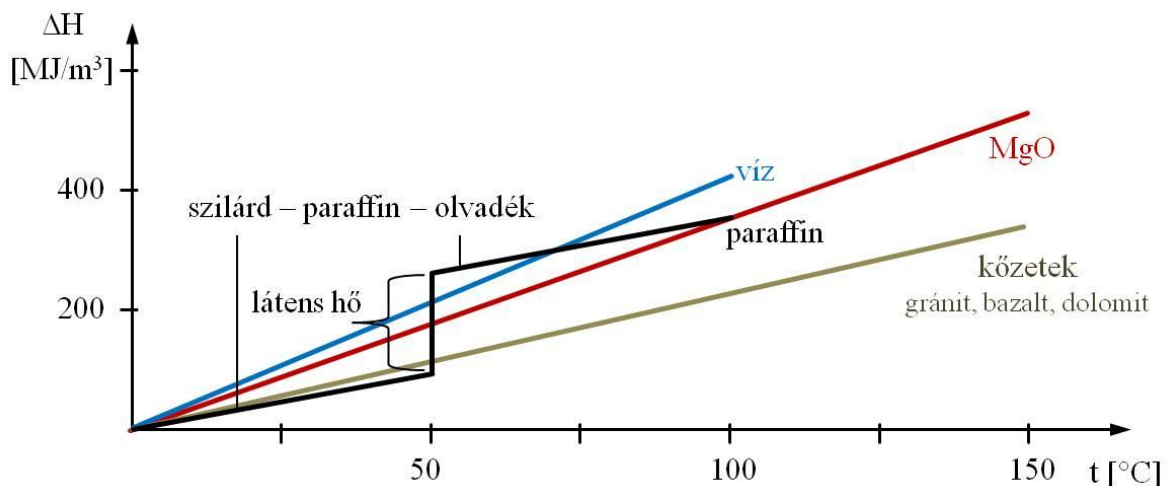
A technológiai megoldások között elterjedtek a töltetes oszlopok, amelyekben legtöbbször kapszulázott formában van a fázisváltó anyag (FVA) [151], de beépítik ezeket az épületek szerkezeti anyagaiba is.

Az angol nyelvű irodalomban PCMs – Phase Change Materials megnevezéssel szerepelnek és nagyon sok publikáció foglalkozik velük [4, 29, 58, 99, 148, 152, 165, 166, 167, 168]. A FVA-oknak három csoportját különböztetik meg: a szerves, a szervetlen és az eutektikus FVA-ok.

Ennél a hőtárolási módnál a tárolható energia három részből tevődik össze (2.3.3.2-1 ábra), a két különböző fázis hőmérsékletváltozásaiból számítható, az egyes fázisok hőkapacitásától függő érzékelhető tárolási módban tárolt hőből, valamint a fázisátalakulással járó rejtett hőből:

$$Q = Q_{\text{érzékelhető}}^{1. \text{ fázis}} + Q_{\text{rejtett}} + Q_{\text{érzékelhető}}^{2. \text{ fázis}}, \quad (2.3.3.2-1)$$

$$Q = m \cdot \int_{T_{\min}}^{T_f} c_p^{1. \text{ fázis}} \cdot dT + m \cdot \Delta H^{\text{átalakulás}} + m \cdot \int_{T_f}^{T_{\max}} c_p^{2. \text{ fázis}} \cdot dT, \quad (2.3.3.2-2)$$



2.3.3.2-1 ábra

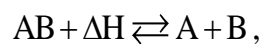
A paraffin, a víz, a MgO és a sziklás kőzetek hőtároló képessége légköri nyomáson

### 2.3.3.3 *Hőtárolás reverzibilis termokémiai folyamattal, a kémiai kötési energiában*

A megfordítható irányú, reverzibilis kémiai reakció, amely a hőmérséklettől függően egyik vagy a másik irányba játszódik le, hőtárolásra is felhasználható. Iránytól függően a reakcióhő egyszer lehet a hőelvonás (a hőfelvétel), ami nem más, mint a hő tárolása, másszor pedig lehet a hőfejlődés (a hőleadás), ami pedig a hővisszanyerés (az ürítés). Az ilyen termokémiai reakciókat két csoportba sorolják:

- a kémiai átalakulással járó reakciók és
- a szorpciós (abszorpciós/adszorpciós és deszorpciós) folyamatok.

A kémiai átalakulással járó termokémiai reakciók (1):



a töltés:  $AB + \Delta H \rightarrow A + B,$  és

az ürítés:  $A + B \rightarrow AB + \Delta H,$

ahol AB nem más, mint A alkotórészből és B alkotórészből álló vegyület. Ezek valójában disszociációs reakciók [124, 145, 187].

A tárolt hő, hasonlóan a látens hőben történt tároláshoz, itt is három részből áll [170]:

$$Q = Q_{\text{érezkelhető}}^{AB} + Q_{\text{reakció}} + Q_{\text{érezkelhető}}^{A+B}, \quad (2.3.3.3-1)$$

$$Q = m \cdot \int_{T_{\min}}^{T_r} c_p^{AB} \cdot dT + m \cdot \Delta H^{\text{reakció}} + m \cdot \int_{T_r}^{T_{\max}} c_p^{A+B} \cdot dT. \quad (2.3.3.3-2)$$

A szorpciós folyamatoknál (2) másodlagos kémiai kötések kötőerejében történik az energia tárolása, de itt kémiai átalakulás nem kíséri a töltési és ürítési folyamatot (új anyag nem keletkezik, A és B kiindulási anyagok a szorpciós kötődés után sem alkotnak vegyületet). A töltési folyamat az adszorpció (ill. az abszorpció), az ürítési folyamat pedig a deszorpció [65, 72, 81, 187].

### 2.3.3.4 *A hőtárolók szerkezeti (konstrukciós) kialakítása*

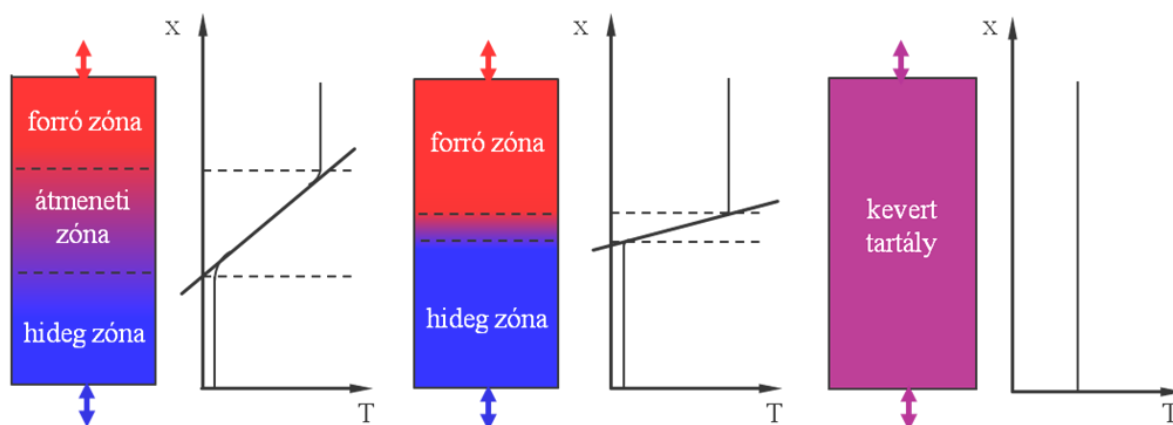
Az irodalom átfogóan nem rendszerezi a hőtárolási megoldásokat a kialakítási konstrukció szerint. Ezért ezt a saját összeállításom, rendszerezésem szerint ismertetem.

A hőtároló rendszerek **szerkezeti (konstrukciós) kialakításuk szerint** két csoportra oszthatóak:

- tartályos és
- nem tartályos megoldások.

## A tartályos megoldások

A legfontosabb technológiai jellemzőjük, hogy termikus átmeneti réteggel rendelkező tartály(ok)ból álló rendszer vagy nem. A hőtárolási publikációk nagy része a termikus határréteggel rendelkező, különböző folyadékokat (víz, olvadt só) tartalmazó tartályok kialakításával, működtetésével, modellezésével és szimulációjával foglalkozik [42, 48, 146, 197, 198]. A cél mindig az, hogy a hideg és a meleg részt elválasztó termikus határréteg térfogata, minél kisebb és stabilabb legyen, ezzel biztosítva a tartály jó energetikai hatásfokát, a keveredés elkerülését (2.3.3.4-1 ábra).



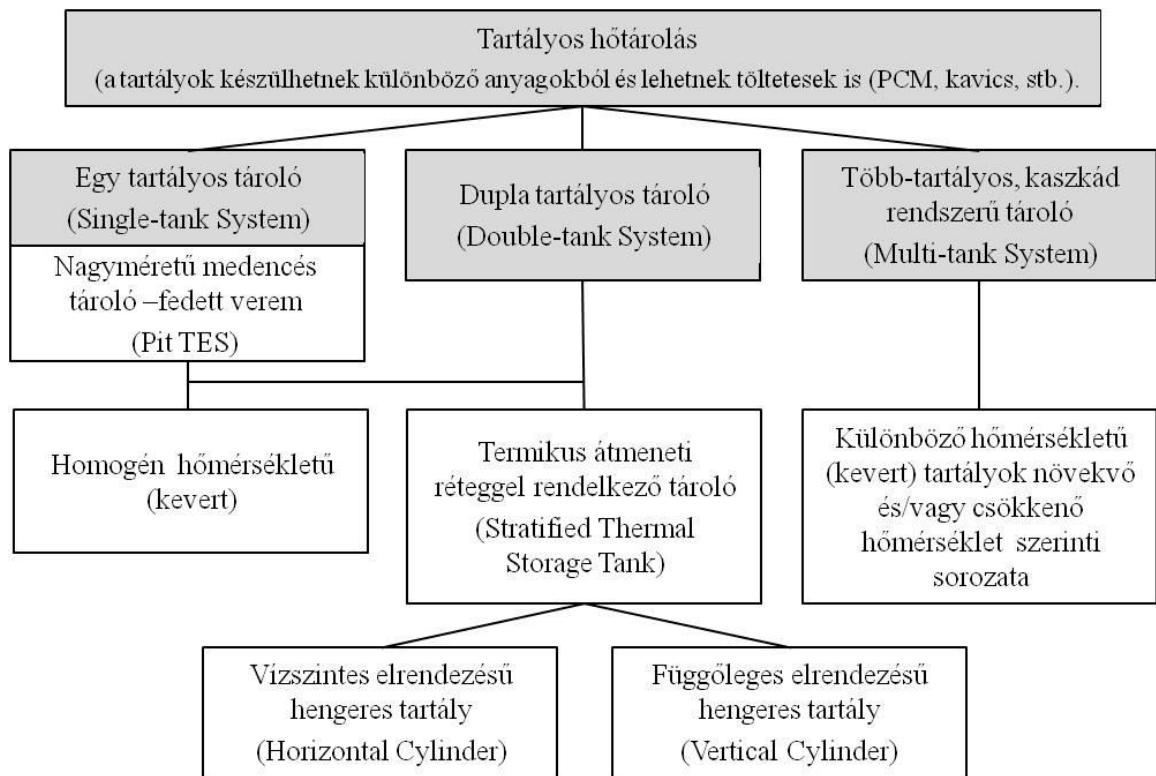
2.3.3.4-1 ábra

A termikus átmeneti réteggel rendelkező tartályok és a kevert tartály hőmérséklet eloszlása [48, 139]

A tartályok lehetnek nyomás alattiak, vagy atmoszférikusak, földalatti vagy földfeletti telepítésűek, vízszintes (fekvő) vagy függőleges (álló) helyzetűek, valamint töltetes vagy nem töltetes tartályok [42, 115]. A többtartályos rendszerek elrendezhetőek sorosan vagy párhuzamosan (2.3.3.4-2 ábra).

Talán érdemes megjegyezni, hogy a termikus átmeneti réteggel rendelkező dupla tartályos technológiai rendszereknél a gyakorlati tapasztalatok miatt kerülnek a párhuzamos elrendezést, mivel nehezen tartható, hogy a két tartályban a termikus határrétegek egyszerre, szinkronban mozogjanak [192]. A termikus átmeneti réteggel rendelkező álló tartályok működtetésénél pedig a tapasztalat azt mutatja, hogy előnyösebb a hőmérsékleti rétegződés megtartásához a  $H/D = 2/1$  vagy a  $H/D = 2,5/1$  arányú tartályok alkalmazása a  $H/D = 1/1$  tartályoknál [192].

A tartályok készülhetnek acélból, betonból és műanyagból is, valamint lehetnek föld feletti és földalatti tartályok. Ide kell sorolni a mesterségesen épített, medence-szerű tárolókat is, amelyek értelemszerűen fedett és hőszigetelt kivitelben készülnek.

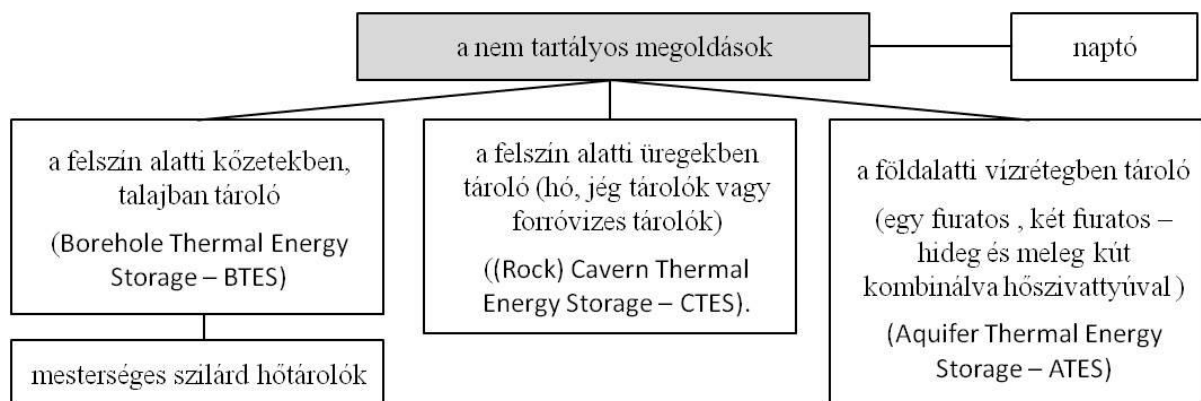


2.3.3.4-2 ábra

A tartályos hőtárolás kialakításának technológiai lehetőségei, rendszere

### *A nem tartályos megoldások*

**A nem tartályos megoldások** legfontosabb csoportja a földalatti energiatárolási módszerek (angolul: Underground Thermal Energy Storages – UTESs). Rohamosan terjednek, és egyre több publikáció is foglalkozik ezzel a területtel [12, 13, 41, 46, 47, 78, 120, 128, 129,162]. A jelen kutatási eredmények ismeretében is úgy tűnik, ez egy nagyon ígéretes terület, mivel itt könnyebben megvalósítható a nagy méretű hőtárolás (2.3.3.4-3 ábra).



2.3.3.4-3 ábra

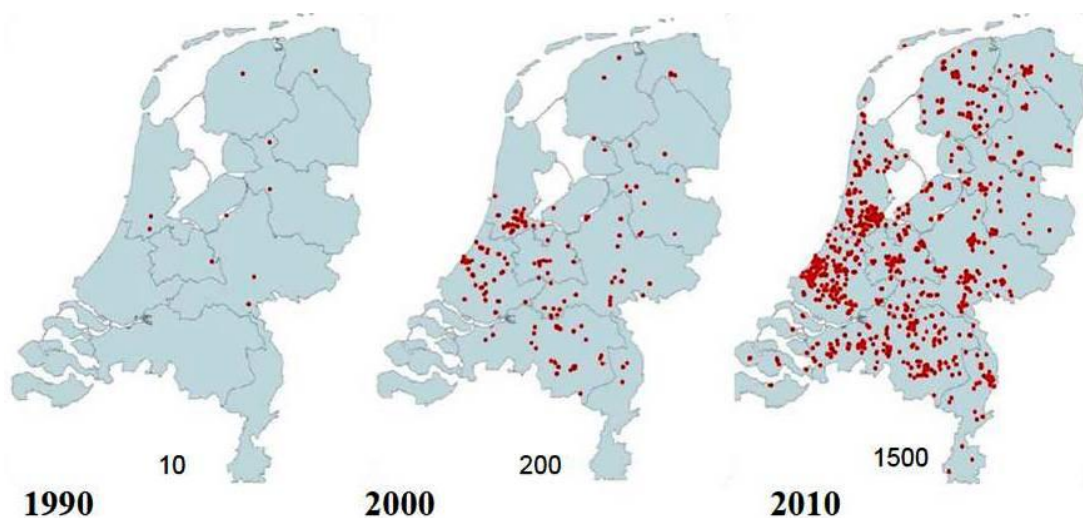
A nem tartályos hőtárolás kialakításának technológiai lehetőségei, rendszere

Magyarországon egyik hőtárolási mód sem fordul elő, ezért nem is ismertek a magyar elnevezések, a helyes nevezéktan valójában még ki sem alakulhatott.

**A földalatti vízrétegben történő hőtároláshoz (FAVT-hoz)** a talajvíz nem előnyös, mivel a neutrális zóna felett helyezkedik el, azaz ebben a felső, felszínhez közeli rétegben a talaj és a talajvíz hőmérséklete függ a környezeti levegő átlagos hőmérsékletétől, az évszakoktól, valamint a talajvíz vízszintjét és áramlási viszonyait a felszíni mesterséges és természeti hatások nagymértékben befolyásolják, a vízszint és a hőmérséklet ingadozik. Ezért a neutrális zóna (kb. 9-12m-es mélység), valamint egy vízzáró réteg alatti, nyugvó (nem áramló) rétegvíz vagy karsztvíz a megfelelő hőtároló közeg. Általában 20 és 300 m mélységek közötti vízréteget használnak. Előnyös hőszivattyúval kombinált rendszereket kialakítani, amelyek nyáron hűtenek, télen fűtenek. A hideg és a meleg rész lehet azonos mélységben, de kellő távolságra egymástól, vagy különböző mélységű vízrétegekben. Ilyen hőtárolást (és hűtést) alkalmaznak pl. Berlinben a Reichstag fűtésére is [159].

Ennél a hőtárolási módnál a napenergiából begyűjtött vagy más helyről származó (pl. hőszivattyútól) hőt hőcserélőn keresztül adják át a kútból kitermelt vízhez, majd ezt a felmelegedett vizet vezetik vissza a vízréteg egy másik, a kitermelési helytől eltérő helyére. Mivel közvetlenül használják a természeti vizet, aminek só- és oldott széndioxid tartalma van, a vízkémiai problémák fellépésére számítani kell.

Jól mutatja a FAVT-k elterjedését és életképességét a 2.2.3.4-4 ábra.



2.3.3.4-4 ábra

A Hollandiában megvalósult és működő FAVT rendszerek számának alakulása. Az előrejelzések szerint a növekedés folyamatos [129].

**A felszín alatti kőzetekben és talajokban történő hőtárolásnál** (FAKT-nál) külön kell választani a neutrális zóna feletti és alatti hőtárolókat.

A neutrális zóna feletti FAKT-kat többnyire a felszín alá vízszintesen lefektetett hőátadó csövekből álló rendszerek alkotják. Problémát okoz egyrészt az előbb említett talajvíz, annak viselkedése, másrészt a réteg időjárástól függő hőmérséklet-ingadozása. Ha nincs talajvíz, akkor a hőmérséklet-ingadozás és a külső meteorológiai hatások (pl. eső) előnytelen hatását felső hőszigeteléssel, vízzárással javítani lehet. Talajvízes esetben vagy a talajvízszint fölé kell helyezni a hőtároló réteget, vagy csak akkor javasolható az ilyen kialakítás, ha a talajvíz elég stabil, nincsenek benne áramlások és vízszint-ingadozások. Ilyen földfelszínhez közeli tárolókat mesterségesen is ki lehet alakítani, tudatos kőzet összetétellel vagy mesterséges hőtároló anyag felhasználással (bár ez utóbbira még nincs példa, de javasolható). Ezek gyakorlatilag inkább már a nagyméretű hőtároló vermekre hasonlítanak.

Sokkal fontosabb terület a neutrális zóna alatti részt kihasználó hőtárolási mód. Az energia bevitele és kivétele a függőleges (30-65m mély, de léteznek még mélyebbek is pl. 200m) furatokba helyezett U-csöves hőcserélőkkel történik. Angol nevük is ezt jelzi: Borehole Thermal Energy Storage – BTES. A tároló kőzet lehet sziklatömbös, vagy akár lazább üledékes kőzet is. A kőzet hőtechnikai jellemzői határozzák meg, hogy előnyös-e az adott terület a hőtárolásra vagy sem. Tervezés és telepítés előtt szükséges felmérni a kőzet hőtechnikai tulajdonságait. Hogy mennyire új eljárás ez, az is jelzi, hogy az első ilyen földalatti kőzet hőtechnikai tulajdonságait felmérő mérőkocsi ötletét és tervét 1996-ban ismertette két svéd hallgató a diplomamunkájában [55]. Magyarországon ilyen még nem is létezik.

2005 és 2008 között példamutató, neutrális zóna alatti FAKT rendszer épült a németországi Crailsheimben [162]. Ez a napenergiás hőközpont 7300 m<sup>2</sup> külön telepített napkollektor felülettel és 37500 m<sup>3</sup>-es függőleges furatos (80 db 60 m mély) földalatti hőtárolóval (FAKT-val) létesült. A második ütemre már 75000 m<sup>3</sup>-es tárolót terveznek. Egy másik, szintén példamutató rendszer a 2005 és 2007 között a kanadai Okotoksban létesült 52 családi ház hőenergia ellátásának segítésére [169,170]. A tároló működésének felfutását kb. 4 évre tervezték és a 2011/12-es fűtési szezonban már 90 %-ban ez a napenergia látta el a települést. Itt 2300 m<sup>2</sup> háztetőkre telepített kollektor felület és 34000 m<sup>3</sup>-es függőleges furatos (144 db 35 m mély) földalatti hőtároló (FAKT) található. Mindkét település északabbra található Magyarországtól.

**A felszín alatti üregekben, barlangokban történő tárolás** (FAÜT) során természetes vagy mesterséges sziklaüregeket használnak gyakorlatilag tartályként [129]. Lényeges, hogy a tárolt közegre nézve ne legyen átteresztő a határoló kőzet, a tárolt anyagot tartsa meg. Főleg hidegtárolóként, hó és jég tárolására terjedtek el, ahol a hó és a jég mellett természetesen megjelenik a folyékony halmazállapot, a víz is. Érdekesség, hogy gáztárolóként is használhatóak egyes üregek, mint komprimált levegőtartályok (angolul: Compressed Air Energy Storage – CEAS) [165]. Ilyeneket mesterségesen is készítenek.

A földalatti hőtárolási módszereknél a hőmérsékletszint alapján megkülönböztetnek

- alacsony hőmérsékleten működő tárolókat, ahol a maximális hőmérséklet 40-50 °C, valamint
- magas hőmérsékleten működő tárolókat, ahol a maximális hőmérséklet > 50 °C (70-90 °C) [128].

A földalatti vízrétegben tárolókat (FAVT-kat) és a felszín alatti kőzetekben, talajban tárolókat (FAKT-kat), közülük is főleg az alacsony hőmérsékleteken üzemelő tárolókat, sok esetben hőszivattyús rendszerrel is kombinálják [116].

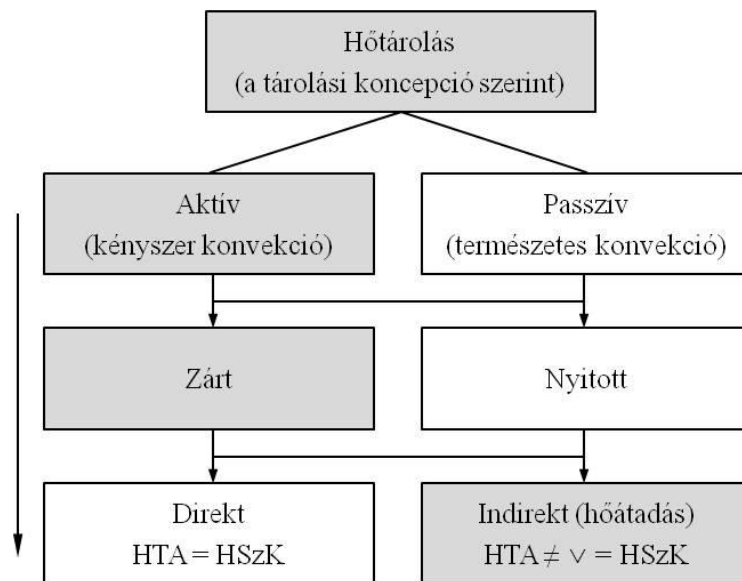
### **2.3.3.5 A hőtárolók működési koncepciója**

**A hőtároló rendszer kialakítása** (működési koncepciója) **szerint (3)** megkülönböztetünk aktív és passzív hőtároló rendszereket (2.3.3.4-5 ábra). Az aktív hőtároló rendszereknél a hőtároló anyag kényszer konvekcióval mozog (pl. a termikus réteggel rendelkező tartályoknál), a passzív hőtároló rendszereknél a hőtároló anyag nem mozog vagy csak a természetes konvekció mozgatja. Nem keverendő össze ez a hőtároló anyagra vonatkozó csoportosítás a napenergia hasznosító rendszer ilyen csoportosításával, amikor a hőforrás (ez a napenergia begyűjtő rendszer) és a hőtároló közötti HSzK áramlási módjára vonatkozik az aktív vagy a passzív megkülönböztetés [139]. Ha a hőszállító közeget mesterségesen áramoltatják pl. szivattyú vagy ventilátor segítségével (kényszer konvekcióval), akkor aktív a rendszer, míg a passzív rendszereknél ez az áramlás természetes úton jön létre (természetes konvekcióval).

A tároló anyag, a hőforrás (a kollektor vagy a hőcserélő) és a „tartály” között elhelyezkedhet nyitott helyzetben (pl. nyitott hurok) vagy zárt helyzetben (pl. zárt hurokban vagy egy adott zárt térfogatban). Ezért a hőtároló lehet zárt vagy nyitott rendszerű. Zárt hőtárolóknál a hőtároló anyaga nem cserélődik, a mennyisége állandó, míg nyitott hőtárolók esetén a

hőtároló közegből olyan anyagelvételek is történnek, amelyet külső forrásból kell a körbe visszapótolni. A zárt rendszereknél csak a működési veszteségeket (pl. a szivárgást) szükséges pótolni.

Vannak esetek, amikor maga a hőszállító közeg (HSzK) egyben a hőtároló anyag (HTA) is, ezeket direkt rendszereknek nevezzük. Más esetben a HSzK hőátadással adja át az energiát a HTA-nak. Ezek az indirekt rendszerek. Indirekt rendszereknél a hőátadás a lényeg, így a HSzK és a HTA lehet azonos anyag is, de különbözhetnek is egymástól [54].



2.2.3.5-1 ábra

#### Hőtároló technológia kialakítási lehetőségei

Direkt rendszerű pl. a spanyolországi Gemasolar Erőmű, ahol a hőtároló só olvadékokat heliosztát síktükrös naptoronyban közvetlenül hevítik, majd szivattyúkkal mozgatják (aktív és zárt rendszer). Indirekt rendszerű pl. a szintén spanyolországi Andasol I. Erőmű, ahol hőcserélőn keresztül jut az energia a tárolóba.

#### 2.3.3.6 A tárolási idő

Az egyik legfontosabb szempont, hogy milyen időtartamú hőtárolást szeretnénk. Az időtartam szerint a szakirodalomban 4 kategóriát különböztetnek meg [5, 57]:

- rövid idejű hőtárolás (Short-term Storage),
- egy napos hőtárolás (Diurnal Storage),
- középtávú hőtárolás (Medium-term Storage),
- hosszútávú vagy szezonális hőtárolás (Long-term Storage, Seasonal Storage).

**Rövid idejű hőtárolók** (0,5-1 óra) főleg a közvetlen gőzturbinára termelő fókuszált napenergia rendszereknél használatosak, ahol az átmeneti felhősödéseket kívánják ilyen módon kivédeni. Erre tökéletesen megfelelnek a Ruths-féle hőtárolók.

Az **egy napos hőtárolók** (max. 14 óra) főleg az éjszakai, napsütésmentes idő áthidalására szolgálnak. Ide sorolhatóak a tárolóval ellátott fókuszált naperóművek, ahol a jelenlegi gyakorlat szerint az eutektikus só olvadékat tartalmazó dupla tartályos (hideg és meleg tartályt alkalmazó – a meleg tartály valamivel nagyobb) rendszerek „terjedtek el”. Itt a tartály méretek is már jóval nagyobbak (pl. Andasol I. erőmű, 14 000 m<sup>3</sup>-es tartályok és 8 óra tervezett tárolási idő). Ide tartoznak még a távfűtő rendszerekhez használt erőművi forróvíz tartályok és a napkollektoros rendszerekhez csatlakoztatott forróvíz tartályok is.

A **középtávú hőtárolók** (4 – 5 nap) szorosan kapcsolódnak az egy napos hőtárolókhoz, valójában csak a tárolókapacitás különbözteti meg őket egymástól. Mind a két csoporthoz tartozó tárolók főleg takarékosági célokat szolgálnak és az egyéb fosszilis tüzelésű kazánok kiegészítő rendszerei (kombinált fűtési rendszerek).

A **hosszú távú vagy szezonális hőtárolók** (max. 2 hónap) célja, szintén az, hogy minél nagyobb mértékben ellássák az épületek hőigényét napenergiával, azaz az épületek jobb hőszigetelése mellett, ezzel is csökkentsék az egyéb forrásból származó hőfelhasználást. A műszaki próbálkozásoknál 2 fő irányt különböztethetünk meg:

- az egy családi házra tervezett rendszereket és
- a több családi házra, lakóépületekre (távfűtés), illetve a nagyobb hőigényre tervezett rendszereket.

Ausztriában készítettek néhány kísérleti rendszert önálló családi házak hőellátására, ahol a házakhoz 80 m<sup>2</sup> körüli napkollektor rendszert és 80 m<sup>3</sup> körüli melegvízes hőtárolót használtak. A piaci és a műszaki siker valójában elmaradt, mert nagy hőveszteségek és magas költségek lettek.

Jobb eredményeket értek el a több lakóház ellátására tervezett, a távfűtési rendszerekhez csatlakozó tárolók esetén. Itt a nagyobb energiaigények miatt már nagyobb tárolókat is alkalmaztak, amelyek egyrészt a nagyméretű medencés melegvízes tárolók, másrészt a föld alatti kőzetekben, talajban tárolók voltak. Azonban elmondható, hogy napkollektoros rendszereket valósítottak meg, ezért a tárolók hőmérsékleti szintje alacsony, max. 95°C. Készítettek ugyan fókuszált napenergiát felhasználó hőellátó rendszereket is nagyobb épületek hőellátásának segítésére (Magyarországon is található néhány), de a tárolásnál

melegvizes tartályokat használnak, ezért a napenergia begyűjtés által biztosított magasabb hőmérsékleti szintet nem használják ki.

A tárolási időhöz kapcsolódóan a szakirodalom használja kisméretű hőtárolók (angolul: small-scale thermal energy storage) és a nagyméretű hőtárolók (angolul: large-scale thermal energy storage) kifejezést.

### ***2.3.3.7 Észrevételek a napenergia hasznosításban alkalmazott hőtárolási módszerekről***

Az a műszaki elv, hogy a fókuszált napenergia begyűjtéséből származó magas hőfokú energiát érdemes egyúttal magas hőfokon tárolni, még csak a naperóművi só olvadékokat használó rendszereknél található meg, de ott sem abból a célból, hogy a tároló  $\Delta T$ -jét növeljék hanem, hogy gőztermelési lehetőség megmaradjon.

A másik műszaki elv, hogy a hőveszteség csökkentése miatt érdemes a tároló méreteit növelni, erről nem hallani. Mégis, a fajlagos költségek csökkentése, valamint a kapacitások növelése miatt, egyre nagyobb méretű tárolók építése történik a világban. Ilyen pl. 2012-ben a dániai Marstal településen elkészített 75000 m<sup>3</sup>-es medencés hőtároló, amelynél víz a hőtároló közeg. Azonban a méret, ahogy majd a kutatási fejezetben látható lesz, nem csak a tárolókapacitás szempontjából fontos, hanem a hőveszteség és a hőszigetelés szempontjából is. Sajnos ennél a megépített 75000 m<sup>3</sup>-es tárolónál sem törekedtek a kis fajlagos felület elérésére. A tárolót téglatest alakúra készítették, amelynél lehetett volna kedvezőbb alakot is találni. Természetesen ezeknek a nagyméretű tárolóknak a fajlagos hővesztesége még így is jobb, mint a kisebb tárolóké.

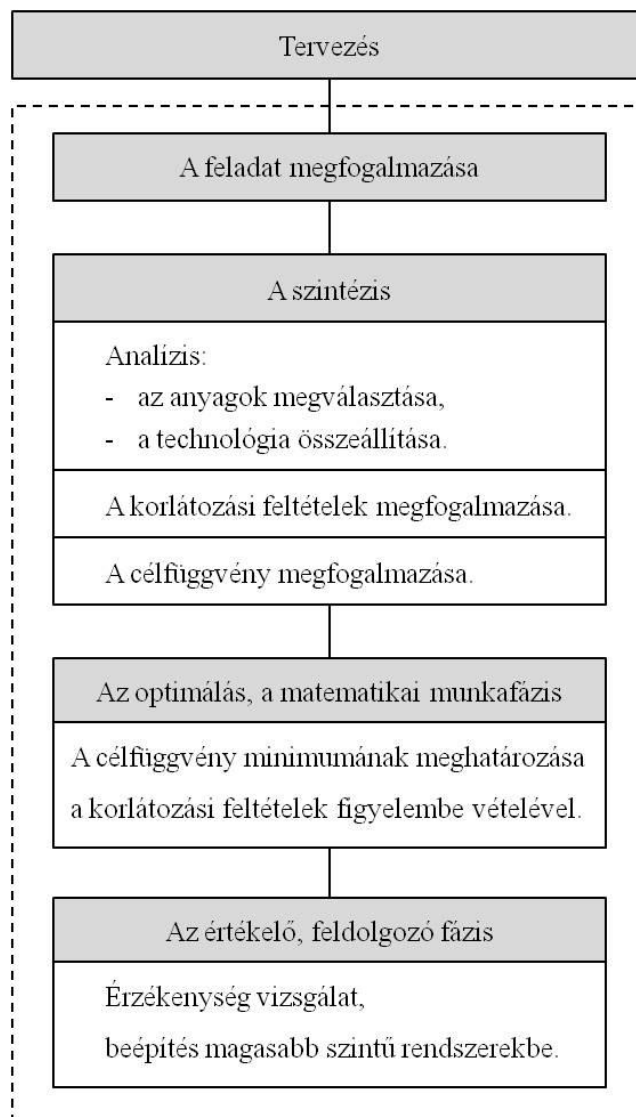
## **2.4 A GAZDASÁGOS TERVEZÉS, AZ OPTIMÁLÁS**

Az optimálás nem más, mint egy matematikai számítás, szélsőérték keresési feladat. A szélsőérték, a valamilyen szempontból optimális megoldás megtalálására a kutatók különböző módszereket, stratégiákat dolgoztak ki. Ugyanis nem lehet mindent „erőből” megoldani úgy, hogy az összes lehetséges megoldást megvizsgáljuk, mert ez a legtöbbször olyan sok időt venne igénybe, hogy az már kivitelezhetetlen, még abban az esetben is, ha elméletileg ez is járható lenne. A matematikának, ez a stratégiákat kidolgozó ága az operációkutatás, amely szóban az operáció a hadműveletre, a stratégia megvalósítására utal. A módszerek, a stratégiák általában feladat-specifikusak [49, 64, 70, 109, 174, 180, 200]. Nincs olyan stratégia ugyanis, ami minden feladathoz jó. Azaz nem létezik olyan algoritmus, amely az összes feladattípuson minden más módszernél hatékonyabb megoldást biztosítana [193]. A gyakorlati életben ez azt jelenti, hogy az adott problémánkra kell megkeresni:

- azt a speciálisan kifejlesztett eljárást, amit olyan típusú feladatok megoldására dolgoztak ki, mint a megoldandó feladat, vagy pedig
- egy olyan algoritmust kell alkalmazni, amelyek a problémák széles spektrumán alkalmazható és az adott problémára is alkalmas (ez utóbbi stratégiát követjük majd).

Az optimalás matematikai módszereinek fejlődésével, valamint a tervezési gyakorlatban való elterjedésével, maga a tervezés is egy bonyolultabb, összetettebb folyamattá vált. Az optimalást is alkalmazó modern tervezési tevékenység négy fő munkafázisra bontható (2.4-1 ábra) [60].

Amikor az optimalásra használt célfüggvényünk valamilyen költségfüggvény [40, 66, 181], akkor használjuk a gazdaságos tervezés kifejezést.



2.4-1 ábra

A modern tervezés fázisai

## 2.4.1 A genetikus algoritmus (GA)

*„Three billion years of evolution can't be wrong.  
It's the most powerful algorithm there is.”*

Dr. David E. Goldberg  
University of Illinois, 1989

A tudomány fejlődésében mindig nagy szerepet játszottak az empirikus megfigyeléseken alapuló elméletek, majd az elméletek igazolására tett erőfeszítések. Miért találjunk fel valamit, ha az már a természetben jól működik? A kutatók észrevették, hogy sok, természetben megfigyelt jelenség alkalmas optimalásra, optimalási stratégia kidolgozására.

Az élővilágban lejátszódó evolúció is igen összetett feladatokat oldott meg az idők folyamán. Fő célja az adott körülmények, feltételek között a fajok életben maradása, a fennmaradás. Az evolúció ezt a célt sikerrel valósította meg, mégpedig úgy, hogy az élővilág egyedei a körülményeket létrehozó dolgokról ismeretekkel nem rendelkeztek (problémafüggetlen metaheurisztika – szabályokon és véletlenszerűségeen is alapuló). Az evolúció a szelekciót, a keresztezést és a mutációt felhasználva egyedek egy adott generációjából egy újabbat generál úgy, hogy az utód generáció már nem egyezik meg az eredetivel. Emiatt időről időre felbukkan egy vagy több olyan utód, amely olyan génekkel rendelkezik, hogy az életben maradás tekintetében előnyt élvez más utódokkal szemben (domináns utódok). Emiatt ezek az utódok nagyobb eséllyel maradnak életben és nagyobb eséllyel szaporodnak a többi utódhoz képest. Így egy sikeres génállomány előbb-utóbb meghatározóbbá válik, mint egy kevésbé sikeres és elterjed a populáción belül, míg a sikertelen háttérbe szorul. Az egyedek közötti szelekciót nem más, mint a természetes kiválasztódás hajtja végre.

A természetben megfigyelhető evolúciós mechanizmushoz hasonlóan működik a genetikus algoritmus (GA) vagy a német nyelvterületen használt kifejezéssel élve az evolúciós algoritmus (EA), amely egy globális optimaló eljárás. A GA a feladatok széles spektrumán alkalmazható [67, 82, 87, 89, 105, 106, 150, 164, 191].

### 2.4.1.1 A GA alapfogalmai

A GA a feladat összes megoldását tartalmazó keresési tér elemei között párhuzamosan egyszerre több potenciális jelölttel (megoldással) dolgozik. A különböző lehetséges megoldásokat **egyedeknek** (species, individuals) nevezzük, és nagy *E*-vel jelöljük.

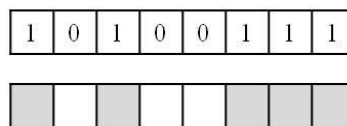
Az első fontos dolog az egyedek ábrázolása, leírása. A leggyakrabban erre egy kromoszómaszerű adatstruktúrát hozunk létre, neve: **genotípus**. Az egyedet a tulajdonságai azonosítják. Ezeket a tulajdonságokat kell megjelenítenünk az adatstruktúrában. Ahhoz, hogy az ábrázolandó tulajdonságokból az adatstruktúra szerinti adatot, adatokat létrehozzuk, illetve az adatból, adatokból a tulajdonságokat visszaállíthassuk, egy „kódoló - dekódoló” algoritmus szükséges. Ez a kód az, ami tehát előállítja a tulajdonságokból (a fenotípusból) a genotípust, illetve visszaállítja a megoldást, a **fenotípust**.

Az adatstruktúra (genotípus) lehet:

- egy bitsorozat (bináris sorozat) vagy
- egy vektor.

A klasszikus GA-ok bitsorozattal, vagy valós vektorral megvalósított egyedábrázolást alkalmaznak.

Az egyedek bitsorozattal (bitsztringgel) történő leírása akkor megfelelő, ha leírásuknál egy tulajdonsághalmazt használunk, és mindössze arra vagyunk kíváncsiak, hogy az adott tulajdonság jellemzi-e az adott egyedet vagy nem (bináris igen-nem jelölés). Előnye ennek az ábrázolásnak az egyszerűsége. Egy adott pozíciós genotípus, egy adott értékekkel rendelkező genotípus a **gén** (2.4.1.1-1 ábra). A gén egyes értékei az **allélok** (ha pl. egy betűsor alkotja a gént, akkor az egyes betűk az allélok).



2.4.1.1-1 ábra

Egy bitsorozattal ábrázolt kromoszóma (gén).

Az egyes biteket a biológiával analóg módon alléleknek is nevezik.

Az egyedek másik gyakori leírási módja a valós vektoros ábrázolás. Ezt akkor érdemes alkalmazni, ha fontos az egyes tulajdonságok mennyiségi értéke is. Vektoros megoldásokkal nagyon sok mindent könnyen le lehet írni és a számításokat is az egyszerű lineáris algebrai ismeretekkel könnyen el lehet végezni. Vektorokkal bármely olyan egyedtípus ábrázolható, amelyet fix darabszámú mennyiséggel jellemezhető tulajdonság ír le.

Léteznek más egyedleírási módok is. Például az utazó ügynök probléma megoldásánál, a megoldás egy sorrend, az elemek egy permutációja (meghatározott sorrendje). Ilyenkor a gén

egyes értékei (az allélek) az alapelemek (városok) sorszámai lesznek a felsorolásuk sorrendjében. Tehát a különböző sorrendek adják az egyedeket (a megoldási lehetőségeket). Az adatstruktúra a permutáció: pl. a városok abc-szerinti sorrendje (számokkal jelölve).

Meg kell említeni egy magasabb egyedleírási szerveződést is: az egyedek teljes kódja a kromoszóma, a kromoszómák elemei a gének és a gének lehetséges értékei az allélek.

A továbbiakban véges bitsorozatos és a valós vektoros ábrázolással foglalkozunk. Ezt indokolja a gyakorlati megvalósításhoz használt MATLAB szoftvernek a lehetőségei is.

A GA minden egyes iterációs lépése során létrejövő új egyedek összessége a **generáció**. Az azonos időbeli egyedek egy adott csoportját pedig **populációnak**  $P$  nevezik. A populáció egyik jellemzője az elemszám  $\mu = |P|$ . Az elemszámba beletartoznak az egymással azonos elemek is. Az új egyedek beépülnek a populációba, annak lecserélve az összes vagy néhány tagját. Ha a populáció összes tagját lecserélik, akkor generációs algoritmusról beszélünk. Vannak eljárások, ahol a populáció egy részét nem cserélik le, hanem hozzáadják az új generációhoz. Ezek a megtartott egyedek értelemszerűen a populáció legjobb példányai. Az ilyen eljárást elitista módszernek nevezik.

Van egy elemű populáció is  $\mu = 1$ . A későbbiekben látni fogjuk, hogy ebben az esetben a változást a mutáció okozza.

Azonban egy időben lehet több populáció is (mint a pl. népcsoportok, vagy országok), és lehet kapcsolat is (ami általában korlátozott) a különböző populációk egyedei között, aminek eredményeként új egyedek is keletkeznek, amelyek valamelyik populáció tagjai lesznek.

A megoldásokat (az egyedeket) valamilyen szempont szerint értékelni, összehasonlítani, majd szelektálni kell. Erre hozzuk létre a célfüggvényt, vagy a GA-ban használt terminológia szerint a jósági vagy **fitness-függvényt**. Az egyedek fitness függvény értéke adja meg az adott egyed elfogadhatóságát.

A célfüggvény kiválasztása az egyik legfontosabb döntés lehet az egész optimalizációs eljárás során [105]. Itt sincs másképp, hiszen ezzel mérjük az egyedek rátermettségét, megfelelőségét. A fitness függvénnyel szemben a legfontosabb elvárás az, hogy a jobb megoldáshoz nagyobb értéket rendeljen, másrészt a két egyed jóságának különbsége arányos legyen a jósági értékeikkel [97]. Kiszámolása a bonyolultságától és a populáció méretétől függően jelentős időt vesz igénybe, erre is gondolni kell.

### 2.4.1.2 A GA műveletei

Miután megkaptuk a generáció minden egyes egyedének fitness-függvény értékét vagy célfüggvény értékét, az egyedeket **szelektálnunk** kell. Ki kell választani a populációból a következő generációt létrehozó szülőket. Erre a szelekciós operátort használjuk. Az így kiválasztott egyedek kerülnek a szülői állományba (mating pool).

A szelekcióra (a kiválasztásra) sokféle módszer van:

- véletlen kiválasztásos szelekció,
- rátermettség-arányos szelekció (rulett kerék szelekció),
- sztochasztikus univerzális mintavétel,
- pár-verseny szelekció [193],
- rangsor alapú szelekció [30, 31], stb.

Az egymástól különböző szelekciós módszerek működését összehasonlíthatjuk, többféle tulajdonsággal értékelhetjük. Főbb mutatók:

- szelekciós intenzitás,
- változatosság elvesztése,
- szelekciós változatosság,

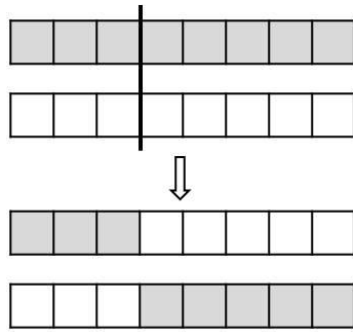
amelyeket itt most nem részletezünk.

Az új egyedek előállítására, azaz a reprodukció, **genetikus műveletekkel** történik. A két leggyakrabban alkalmazott genetikus művelet a **keresztezés** (recombination), amely két (vagy több) szülőből állít elő utódot vagy utódokat, valamint a **mutáció**, amely egy szülőből állít elő egy vagy több utódot. A genetikus műveletek közös jellemezője az utódlétrehozásban mindig fellelhető véletlenszerűség. A keresztezésnek és a mutációnak is sok fajtája van, amelyből a legfontosabbakat bemutatjuk.

A **keresztezés** vagy rekombináció feladata a szülő egyedek genetikus kódjának a kombinálása.

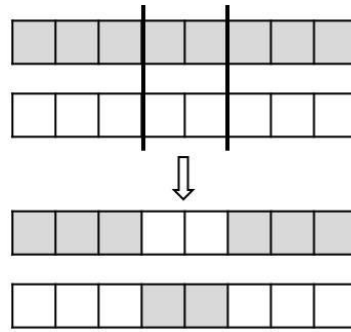
**Az egy pontos keresztezés.** Ez a legegyszerűbb eljárás, ahol a két szülő génjét a program egy véletlenszerű pozícióban elvágja, majd egymás között felcseréli őket és újra egyesíti, így állítva elő az újabb egyedeket (2.3.1.3-1.a ábra).

**A két illetve az N pontos keresztezés.** Itt nem egy, hanem két illetve N ponton történik az elvágás és a felcserélés. A vágási helyek között nincs kitüntetett, mindegyiknek a valószínűsége megegyezik (2.3.1.3-1.b ábra).



2.3.1.3-1.a ábra

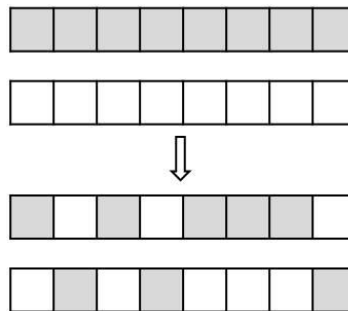
Egypontos keresztezés,  
két testvér (utód) létrejöttével.



2.3.1.3-1.b ábra

Kétpontos keresztezés,  
két testvér (utód) létrejöttével.

**Egyenletes vagy uniform keresztezés** [1]. Ekkor az utódegyedek génjei az azonos pozícióban lévő allélokból kerülnek ki 50-50% valószínűséggel 2.3.1.2-2 ábra.



2.3.1.2-2 ábra

Egyenletes keresztezés.

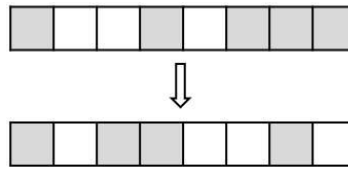
A két utód ennél a véletlenszerű esetről 3-3 allél pozíciónál tér el a szülőktől.

Létezik olyan keresztezési mód is, ahol az allélok az utódba nem azonos értékkel kerülnek át, hanem az átkerülés folyamata alatt egy függvény szerint módosulnak. Az új egyed génjeiben található allélok már nem azonosak, de nem is függetlenek a szülők génjeitől.

**Mutáció.** A mutáció egy egyedre módosít úgy, hogy a gén alléljait illetve az allélok egy részét véletlenszerűen megváltoztatja. Az allél megváltozása egy tulajdonság megváltoztatását jelenti. Ezzel a keresési tér szélesedik, viszont óvatosan szabad csak alkalmazni, mert elronthatja a gondosan kiválasztott szülői tulajdonságokat. Éppen ezért a mutáció jelentősége a GA során kisebb, mint a rekombinációé.

**A véletlen génenkénti mutáció.** A mutáció legegyszerűbb formája. A bitsorozatú gén esetén simán negáljuk a megváltoztatandó allél/allélok értékét/értékeit (2.3.1.2-3 ábra). Valós vektoroknál az eredeti értékeket egy véletlen értékkel helyettesítjük, ügyelve természetesen

arra, hogy az új érték értelmezhető legyen az adott pozícióban.

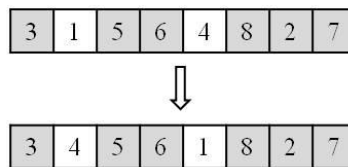


2.3.1.2-3 ábra

Véletlen bitenkénti mutáció.

Az egyed három allélja negálódott.

**A véletlen elemi permutáció.** Ennek akkor van jelentősége, ha az egyedek permutációval vannak ábrázolva, hiszen az egyedek ezen értékeit (sorszámait) a mutáció során sem szabad elrontani. Ilyen esetekben helycsere mutációt végezhetünk úgy, hogy az aktuális permutációt (gént) egy  $(i, j)$  transzpozícióval megszorozzuk, aminek az eredményeként az  $i$  és  $j$  érték felcserélődik.

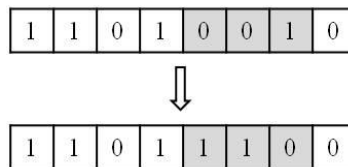


2.3.1.2-4 ábra

Véletlen elemű permutációalkalmazása.

Az eredeti egyed a  $(2,5)$  transzpozícióval szorozva kapjuk az új mutánst.

**Az inverziós operátor.** A gén egy-egy szakaszát invertáljuk, alakítjuk át. A szakasz hossza véletlenszerű. Bitsorozatnál az invertálás a negációt jelenti. Valós vektoroknál az értelmezési tartomány alapján definiálni kell az inverz fogalmát.



2.3.1.2-5 ábra

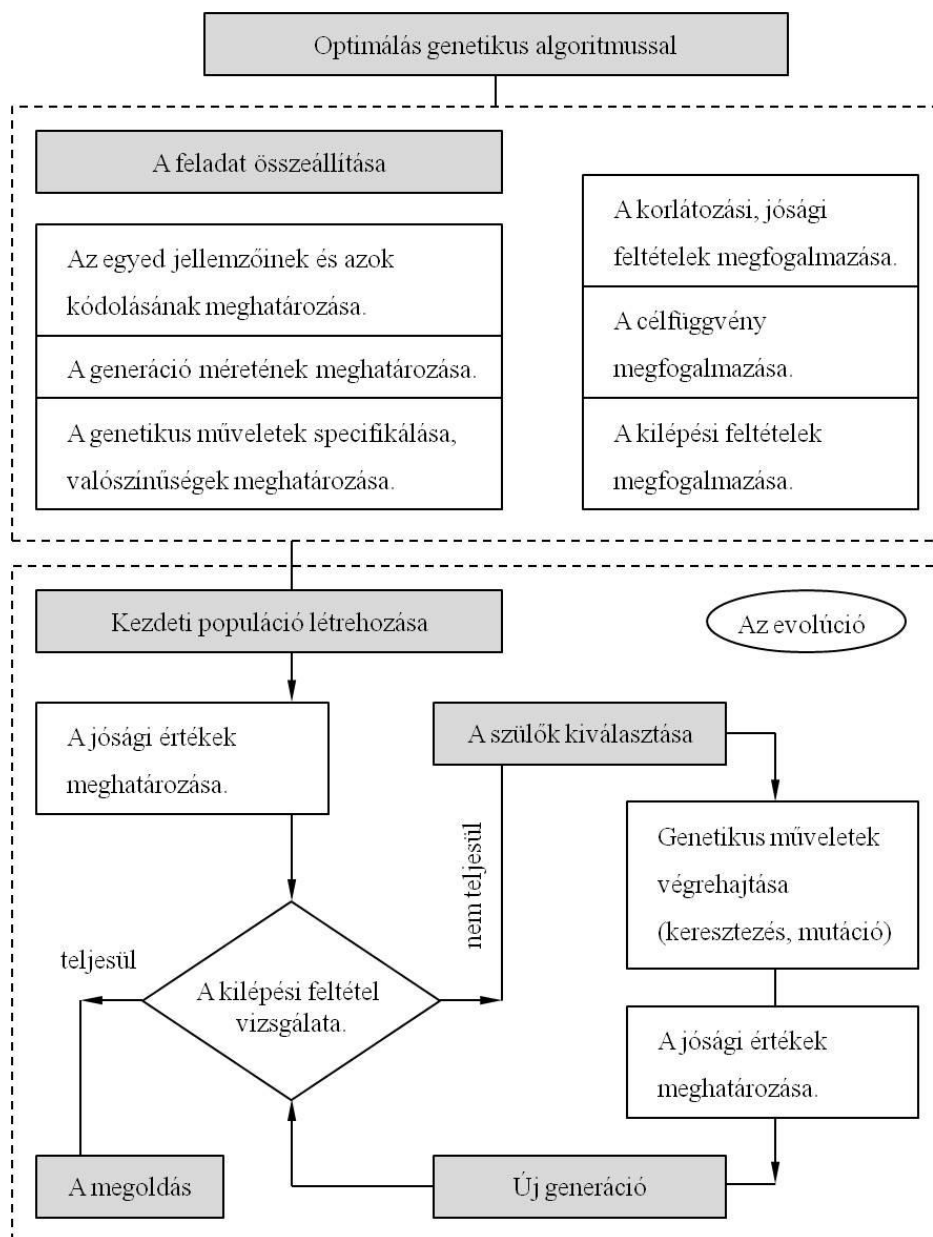
Inverziós operátor alkalmazása a gén 5. és 7. pozíciója közötti szakaszra.

Látható, hogy a keresztezés, a meglévő tulajdonságokból azok megfelelő kombinációjával és értékével az optimális megoldás kiválasztására alkalmas, de mivel új tulajdonságot nem hoz létre valódi újítást, „felfedezést” létrehozni nem tud. A mutáció az a reprodukció, amely új

tulajdonságot is létre tud hozni! Kutatások szerint az emberi beszédképességet is egy ilyen mutáció hozta létre, majd ez az egyed egyre jobban elterjedt a populációban.

### 2.4.1.3 A GA működési folyamata az evolúció

A számítógépek segítségével ezt az evolúciós folyamatot a biológiai fejlődéshez képest nagyon gyorsan végig tudjuk számolni, bár a mi napjainkhoz viszonyítva azért időigényes számításról van szó. Programtól, egyedszámtól, populációk számától, stb. függően esetenként több napos vagy több hetes számítás is lehetséges. A genetikus algoritmus összefoglaló sémáját ismerteti a 2.4.1.3-1 ábra [14].



2.4.1.3-1 ábra

A genetikus algoritmus általános sémája.

**A kilépési feltétel.** Az algoritmus lépéseinek leállítását a kilépési függvény határozza meg. Ennek eldöntésére többféle megközelítés létezik:

- Elértünk egy előre meghatározott generációs számot (ezt alkalmazom).
- Vizsgáljuk a generáció állapotát. A legrátermettebb egyed és a populáció átlagos rátermettségének aránya elért egy előre meghatározott értéket.
- A populáció egyedei konvergálnak, azaz például a teljes populációban a gének 95%-ban azonosak.

Ha a kilépési feltétel teljesült, akkor megkaptuk a megoldást. Ezzel zárul a modern tervezési folyamat matematikai fázisa.

### 3. KUTATÁSI RÉSZ

*„Az energia uralásának a képessége,  
legyen szó a tűzgyújtásról, vagy erőművek építéséről,  
a civilizáció előfeltétele.”*

Isaac Asimov

#### 3.1 A DIREKT SUGÁRZÁSBÓL SZÁRMAZÓ HAZAI NAPENERGIA POTENCIÁL MEGHATÁROZÁSA ÉS ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

Ez az alfejezet, csak a magyarországi direkt napsugárzási viszonyokat vizsgálja, majd összehasonlítja a fókuszálással kinyerhető napenergia fajlagos területigényét az energianövény termesztés, a napelemes energiatermelés és a lignitbányászat fajlagos területigényével [24].

Sokszor hallani olyan vélekedést, hogy Magyarországon a napenergiával állami, vagy hazai nagyvállalati szinten foglalkozni nem érdemes, mert:

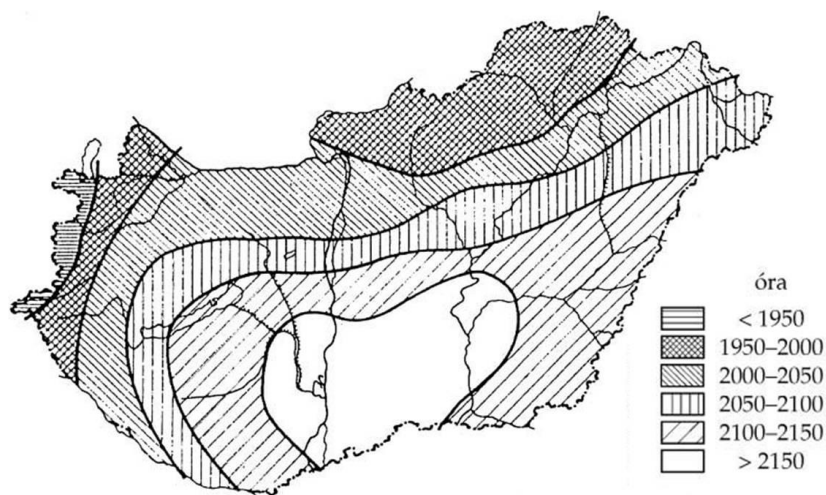
- költséges,
- nagy a helyigénye,
- az ország makrogazdasági energiamérlegében eddig is gyakorlatilag nulla volt és ezután sem fog ez lényegében változni, ugyanis nem a Szaharában vagyunk,
- maximum az egyéni felhasználók segédenergiája lehet a nyári időben, stb..

A felsorolt vélemények egy része valós tényeken alapszik, pl. a beruházás igényesség (bár ez is csak a költség-haszon vizsgálattal együtt értelmezhető), más részük, pl. a helyigényesség, már kevésbé igazolhatóak.

Mivel a tőlünk északabbra fekvő Németország a napenergia hasznosítással igen komolyan foglalkozik, folyamatos kutatás, az ipari termékek fejlesztése és gyártása jellemzi ott ezt az energetikai területet is, érdemes megvizsgálni a hazai viszonyokat, lehetőségeket.

#### *A direkt sugárzás*

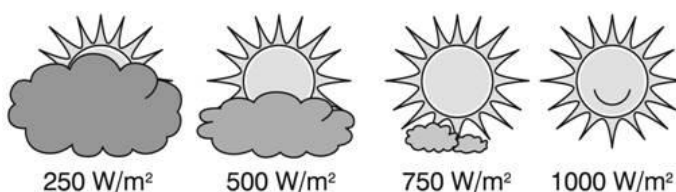
Magyarországon a több éves statisztikai adatok alapján 1900-2200 óra körül van évente a napsütéses órák száma, azaz amikor a direkt sugárzás teljesítménye több mint  $210 \text{ W/m}^2$  (3.1-1 ábra). De pl. 2011-ben az ország délkeleti részén 2500 órát is mértek.



3.1-1 ábra

A napsütéses órák száma Magyarországon

Tiszta időben a sugárzásra merőleges felületre vetítve a direkt sugárzás teljesítménye az  $1000 \text{ W/m}^2$  értéket is eléri.<sup>7</sup> Mind a napsütéses órák száma, mind pedig a mérhető teljesítmények világviszonylatban is jó értékeknek számítanak [38, 59, 118, 130, 137]. Természetesen a napsütéses órák alatt, a felhősödéstől függően a direkt sugárzás teljesítménye változik (3.1-2 ábra).



3.1-2 ábra

A direkt napsugárzás fajlagos teljesítménye

Az adatokból könnyen megbecsülhető, hogy  $\text{m}^2$ -enként évente mennyi energia érkezik hozzánk. Hogy ne tévedhessünk, az éves napsugárzási órák számát 2100 órának, az átlagos teljesítményt  $400 \text{ W/m}^2$ -re vesszük. Ez alapján biztonsággal mondható, hogy évente, a sugárzásra merőleges felületre vonatkoztatva kb.

$$Q = 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 2100 \frac{\text{h}}{\text{év}} = 1,44 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{h}} \cdot 2100 \frac{\text{h}}{\text{év}} \approx 3000 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{év}} \quad (3.1-1)$$

fókuszálható napenergia érkezik Magyarországon.

A ténylegesen kinyerhető energia meghatározásához a (3.1-1) egyenletben kiszámított értéket

<sup>7</sup> Mérték ennél nagyobb sugárzási teljesítményt is Magyarországon pl.:  $1200 \text{ W/m}^2$ -t, de csak rövid ideig. Ilyenkor a direkt sugárzás mellett egyidejűleg fellépő szórt sugárzás növelte meg a mérési értéket.

korrigálni kell, egyrészt mert a fókuszálás során a tükrök elhelyezése a hasznos területnél valamivel nagyobb helyet igényel, másrészt a fókuszált energia begyűjtésnek is van hatásfoka. A modern, vonalba fókuszáló Fresnel lencsés kollektorok kb. 60%-os eredő hatásfokkal (optikai és termikus) dolgoznak. Összesítve az 1 m<sup>2</sup>-re bejövő energiát 2 m<sup>2</sup>-ről gyűjtjük be. Így a ténylegesen begyűjthető energia egy adott területről:

$$Q \approx \frac{3000 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{év}}}{2} = 1500 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{év}}. \quad (3.1-2)$$

Ez nagyon nagy energiaforrás. Nézzük, mit is jelent ez. Ehhez a hazai energiamérleget kell megismerni, bár ez nem egyszerű feladat.

Ha valaki ugyanis a hazai energiamérlegre kíváncsi, hamar rájön, hogy zavaros területre tévedt. Ez a gazdaság Bábel tornya, ahol mindenki a saját, a többitől eltérő mértékegységét használja a TWh-tól a PJ-on keresztül a Mtoe (millió tonna olajegyenérték)-en át a különböző, de fűtőérték nélkül feltüntetett energiahordozó mértékegységekig, a szilárd anyag ezer tonnában, a folyadék millió literben vagy millió hordóban, a földgáz millió m<sup>3</sup>-ben (Mm<sup>3</sup>). Aztán találni olyat is, hogy a PB gáz mértékegysége a tonna, mert pl. a közlekedés használja. Ehhez jönnek még a különböző fajlagosak és hatásfokok, valamint az angolszász mértékegységek. Tehát nem árt járatosnak lenni a prefixumok és a mértékegységek tengerében. Azért, aki veszi a fáradságot, az össze tudja gyűjteni a számára fontos információkat.

Magyarország éves primer energiafelhasználása 2008-ban 1120 PJ (P=10<sup>15</sup>) [126]. Az is elmondható ráadásul, hogy az utóbbi 10 évben elég stabilan az 1100 PJ környékén stagnál. Magyarország területe kb. 93030 km<sup>2</sup>. Azaz Magyarország területére évente összesen

$$Q = 1500 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{év}} \cdot 93030 \cdot 10^6 \text{m}^2 \approx 1,40 \cdot 10^{20} \frac{\text{J}}{\text{év}} = 140000 \text{PJ} \quad (3.1-3)$$

fókuszálható napenergia érkezik.

A primer energiaigény kb. 38%-a, azaz kb. 431 PJ közvetlen hőigényként (lakossági, közintézményi és ipari fűtési célú felhasználás, használati melegvíz, stb.) jelentkezik [126]. Ez az éves termikus energia Magyarország területének kb. 0,3 %-án begyűjthető lenne. De ismerjük el, ez még mindig nem eléggé kézzelfogható információ a fókuszálható napenergia potenciálról, ezért hasonlítsuk össze más energiatermelő technológiák helyigényével.

### **3.1.1 A direkt napsugárzás fajlagos területigényeinek összehasonlító vizsgálata**

#### **Összehasonlítás az energianövény termesztés területi igényével**

Az energianövények éves energiahozama (fűtőértékre számítva) a szakirodalmak szerint 100 – 350 GJ/(ha·év), attól függően, hogy milyen a növény (fás szárú vagy lágyszárú, stb.). Ez megfelel évi 10 – 35 MJ/(m<sup>2</sup>év)-nek. Ezt az értéket kell viszonyítani az éves napsugárzásból származó, a (3.1-2) egyenlettel kiszámolt 1500 MJ/(m<sup>2</sup>év) értékhez. Látszik, hogy kb. százszor nagyobb a helyigénye az energianövény termesztésének, mint a fókuszált napenergia begyűjtésnek. Két nagyságrend különbség! Ráadásul az energianövények eltüzelése ugyanúgy CO<sub>2</sub> kibocsátással jár, mint a fosszilis tüzelőanyagok eltüzelése, valamint a fás szárú növények aprítása energiaigényes technológiai művelet.

#### **Összehasonlítás a globális sugárzást hasznosító napelemes energiatermelés területi igényével**

Globális sugárzás alatt a napból érkező közvetlen sugárzás (direkt sugárzás értéke 3000 MJ/m<sup>2</sup> évente), valamint az égbolt minden részéről érkező szórt sugárzás összegét értjük. A mérések szerint Magyarországon a globális sugárzás éves értéke kb. 4300 -4900 MJ/m<sup>2</sup> között van [130]. Számításunkban a 4600 MJ/m<sup>2</sup>-es számtani középértéket vesszük alapul.

A globális sugárzás ipari hasznosításának két lehetséges módja:

- a napkollektoros és
- a napelemes.

A napkollektoros rendszerekkel, főleg terjedelmi okok miatt, ebben a dolgozatban nem foglalkozunk. Jellemzőjük, hogy alacsony hőmérsékletű energiát szolgáltatnak, valamint a kollektor-panelek hővesztesége miatt ezt is főleg csak a nyári és a nyár közeli időszakban. A termelt energia alacsony hőmérséklete miatt a hosszú idejű energiátárolás ez idáig nem megoldott. Ennek a dolgozatnak az eredményei azonban itt is segíteni fognak. Ugyanis a víz hőtároló közegű, de minél nagyobb méretű tárolók készítése, az alacsony (max 95°C)-os hőfokszint ellenére, a tároló nagy mérete miatt, biztosítani fogja a kis fajlagos hőveszteséget.

A másik lehetőség a napelemek használata. A napelemek a legfontosabb tulajdonsága műszaki szempontból a hatásfok azaz, hogy mennyi energiát tud a napsugárzás energiájából árammá alakítani. A fókuszálás nélküli 3 rétegű napelemek hatásfoka jelenleg már 25% felett van (Sanyo, Radboud University., Alta Devices) [111]. Azonban a kereskedelmi forgalomban kapható celláknál realisabb a 18%-os hatásfokkal számolni, ami a veszteségekkel (csatlakozási, átalakítási) 15%-ra csökken. Az így kinyerhető villamosenergia

$$Q = 4600 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{év}} \cdot 0,15 = 690 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{év}}. \quad (3.1.1-1)$$

Ezt a 690 MJ/(m<sup>2</sup>év) értéket kell hasonlítani a fókuszált napenergia begyűjtés 1500 MJ/(m<sup>2</sup>év) értékéhez.

Napjainkban nagyon sok kutatást végeznek abból a célból, hogy a napelemek hatásfokát növeljék. A Delaware Egyetemen (University of Delaware) pl. már 42,8%-os hatásfokú napelemet is sikerült előállítani [186]! E mellett nagyon jó eredményeket mutatnak fel a kutatók a fókuszált napenergia napelemes hasznosításának területén is. Ilyen fókuszált energiáknál már szintén 40% feletti napelem hatásfokok vannak, ami a fókuszált napenergiából termelt villamosenergia termelési technológiák közötti versenynél lesz nagyon érdekes. A magas hatásfokú napelemek jelenleg még nagyon drágák, főleg az űrtechnikában alkalmazzák őket.

Azért azt mindenképpen látni kell, hogy csak a legalább 30-40% hatásfokkal rendelkező napelemek lesznek képesek területarányosan annyi energiát begyűjteni (termelni), mint amit a fókuszált napenergia begyűjtés biztosítani képes. Ahhoz pedig, hogy a fókuszált napenergia begyűjtési lehetőség teljesen érdektelenné váljon a 40% feletti napelem hatásfok szükséges (és természetesen megfelelő, azaz olcsó áron). Ha majd lesznek ilyen hatásfokú olcsó napelemek, akkor már a fűtést is érdemes lesz a napelemek által termelt villamos áramból biztosítani.

### **Összehasonlítás a lignitbányászat területi igényével**

A külszíni fejtésű lignitbányák fontos jellemzői közé tartozik, hogy milyen vastag a lignitréteg és milyen mélyen helyezkedik el. A természeti adottságokban azonban igen nagy eltérések tapasztalhatóak, amelyek a fajlagos kitermelés költségét nagymértékben befolyásolják (mennyi meddőt kell letermelni, a víztelenítés, a szállítás, a rekultiválás, stb.). Ezért csak egy nagyvonalú összehasonlító becslést tudunk e dolgozat keretében elvégezni. Tekintsük viszonyítási alapnak a hazai visontai és bükkábrányi lignitmező jellemzőit [84, 107, 134, 183], ahol kb. 90 m fedőréteg alatt helyezkedik el az 5-15 m-es lignitréteg. Körülbelül 7,5-8-szoros meddő kitermelés van. Átlagos 6,2 MJ/kg visontai és bükkábrányi lignit fűtőértékét<sup>8</sup> és az ennek megfelelő kb. 1,3 t/m<sup>3</sup> nyers bányalignit sűrűséget figyelembe véve kiszámítható, hogy 1 m<sup>2</sup> bányaterületről kb. mennyi energia termelhető ki:

<sup>8</sup> A lignit fűtőértékét az irodalom definíciószerűen 3,5-10 MJ/kg között adja meg.

$$Q \approx 1 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ m} \cdot 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 13000 \text{ kg} \cdot 6,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 80600 \text{ MJ} \quad (3.1.1-2)$$

Figyelembe kell venni, hogy általában egy nagyobb termőterületet vonnak ki művelésre a „természetből”. Kiépítik az infrastruktúrát (utak, stb.) és kb. 3 évig termelnek rajta, majd ezt követi a rekultiválás, ami megint plusz kb. 2 év. A művelésre kivont nagyobb bányaterület biztosítani tudja a humuszréteg és a meddő deponálási helyigényét is. Tehát a bányaterület használatára kb. 5 évet feltétlenül számolni kell, amely az előkészületi időből, a leművelési időből és a rekultiválási időből áll. Tehát nem egy év alatt termelik ki egy adott területről a hasznos ásványvagyont. Ezzel a kb. 5 éves teljes bányászati idővel korrigálni kell a (3.1.1-2) képlettel kiszámított értéket:

$$Q \approx \frac{80600 \text{ MJ} / \text{m}^2}{5 \text{ év}} \approx 16100 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ év}} \quad (3.1.1-3)$$

Ezt kell összehasonlítani a fókuszált napsugárzásból begyűjthető 1500 MJ/(m<sup>2</sup>év) értékkel. Jól látszik, hogy az 5 év terület használati idő alatt kb. 10-szer több energia nyerhető ki így egy területről, mintha a fókuszált napenergiát gyűjtöttük volna be. Jobb fűtőértékkel és vastagabb lignitréteggel számítva ez akár 10-15szeres is lehet.

Azért azt nem szabad elfelejteni, hogy a külszíni bányászat igen drasztikus környezeti beavatkozással jár. E mellett, kéntelenítési technológia és salak, pernye elhelyezési feladatok is vannak. Összességében, a lignitbányászat környezeti terhelése nagyon nagy.

### A különböző energiaforrások területigényeinek egymáshoz viszonyított aránya

A 3.1.1-1 táblázatban összefoglalva látható, hogy a fókuszált napenergia felhasználás területigénye igen kedvező.

energiaforrás	1 m <sup>2</sup> -en, évente kinyerhető energia mennyisége [MJ/(m <sup>2</sup> év)]	az évente kinyerhető energia aránya a fókuszált napenergiához képest	a területigények aránya a fókuszált napenergiához képest
energianövény termesztés, biomassza	10 – 35	≈ 0,007 – 0,023	≈ 43 – 150
globális sugárzás napelemes hasznosítása	690	0,46	2,17
direkt napsugárzás fókuszált hasznosítása	1500	1	1
lignitbányászat	16000 – 20000	≈ 10 – 13	≈ 0,075 – 0,1

3.1.1-1 táblázat

Különböző energiaforrásokból kinyerhető energiák fajlagos területigénye Magyarországon

Az a Magyarországon elterjedt megállapítás, hogy a napenergia felhasználásának nagy a területigénye, egyértelműen látszik, hogy nem igaz. Az is jól látszik, hogy az energianövény termesztés helyigénye viszont rendkívül nagy.

### **A hazai Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terv [125]**

Az Európai Parlament és Tanács RED irányelve Magyarország számára 2020-ra – jogilag kötelező módon – minimum 13 százalékban határozta meg a megújuló energiaforrásból előállított energia **bruttó végső energiafogyasztásban** képviselt részarányát. Magyarország a kötelező 13%-os minimum célszámot meghaladó, 14,65%-os érték elérését tűzte ki célul a „Megújuló energia hasznosítási cselekvési tervében”.

A bruttó végső energiafogyasztás kevesebb, mint a primer energia felhasználás, mivel a primer energia tartalmazza az energiaátalakítások veszteségeit is. A veszteségek aránya az országos energiaigényben 2008. évben 23,2 % volt. Többféle prognózis létezik arra vonatkozólag, hogy 2020-ban mennyi primer energiaigény lesz és mekkora lesz a primer energia más energiaterméké történő átalakításával és szállításával előálló veszteség aránya. Jelen dolgozatban vegyük alapul a [125] dokumentumban megadott közepes jóslatot, a referencia forgatókönyv szerint kalkulált 947 PJ bruttó végső energiafelhasználást 2020-ra. Céljaink szerint ennek kell a 14,65%-át megújuló energiaforrásból fedezni:

$$Q \approx 947 \text{ PJ} \cdot 0,1465 \approx 139 \text{ PJ} . \quad (3.1.1-5)$$

Ez az ország éves gázfelhasználásának (363PJ) kb. 40%-a, vagy a közlekedés által felhasznált energiának (192PJ) több mint 70%-a. Tehát nagyon nagy érték.

Ezt az ország valójában energianövény termesztéssel (beleértve az erdészeti tevékenységet is) szeretné biztosítani (most eltekintünk a meglévő vízenergia és szélenergia termeléstől, ami ehhez képest nem jelentős).

Ha ez a szándék valóban megvalósul, akkor annak hatalmas területigénye lesz. Az energianövény termesztéssel kitermelhető átlag 22,5 MJ/m<sup>2</sup>-es fajlagos energiamennyiséggel számolva, a vállalt megújuló energia hasznosítás, az energiaátalakítás veszteségeit figyelmen kívül hagyva, évente kb.

$$A = \frac{139 \cdot 10^{15} \text{ J}}{22,5 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}} \approx 6,2 \cdot 10^9 \text{ m}^2 = 6200 \text{ km}^2 = 620000 \text{ ha} . \quad (3.1.1-6)$$

területről nyerhető ki. A 620 ezer ha nagyon nagy terület. Ismerve a „food or fuel” dilemmát, újra érdemes lenne végiggondolni, hogy valóban ez lenne az ésszerű megoldás? Ilyen

mértékben szükséges erre az energiatermelési módra támaszkodni? Ez a terület Magyarország mezőgazdasági területének (6,2 millió ha) 10%-a, az erdőterületének (2 millió ha) pedig több mint a 30%-a. És ez a területigény még tovább nőhet, ha figyelembe vesszük a primer energiára vetített energia kitermelés veszteségét is. Amikor a 30%-os hatásfokú erőművekben villamos áram termelésre is használják a biomasszát, akkor az még tovább ront a helyzeten. Márpedig ez jelenleg is folyik, mert a hatóság megelégedett a 30%-os energetikai hatásfok előírásával az egyszerű biomassza tüzelésű kondenzációs erőművek esetében. Sőt a kiemelt árral nem csak megengedi az ilyen termelést, de preferálja is azt. Ilyenkor a 30%-os hatásfokkal termelt áram lesz a végső energia, ami azt jelenti, hogy több mint háromszor annyi energianövény felhasználás kell majd a vállalt célok eléréséhez. Az így termelt áram területigénye a napelemes áramtermeléshez képest is 100-szoros!

A középtávú tervek (7-15 év) a mezőgazdasági és az erdészeti területről közel 190 PJ energiaforrás rendelkezésre állásával számolnak [125]. Az elképzelés az, hogy élelmiszertermelő ágazatból részben energiatermelő ágazattá átalakítva a mezőgazdaságot, valamint átalakítva az erdőgazdaságot is, biztosítják a kívánt megújuló energia mennyiséget.

Ezzel szemben, a fókuszált napenergia hasznosítása esetén ezeknek a területeknek csak a századrésze lenne szükség és nem lenne CO<sub>2</sub> kibocsátás sem! Így valóban szolgálhatnánk a nemes célt, a közvetlen környezetünknek és bolygónknak a védelmét.

Sajnos a hazai terv pl. a fókuszált napenergia hasznosításával egyáltalán nem számol, ezzel nem is tervezi.

### **A valódi megújuló energia**

Minden ember érzi a különbséget a valódi megújuló energia (nap, szél, víz, hullám, ár-ápály, geotermikus) és az energianövény termesztés, a biomassza termelés között. Valójában ez utóbbi nem is megújuló energia (még ha statisztikailag ide is sorolják), hanem csak újratermelődő energia, ami egy adott területen időlegesen ki is merülhet. A hatalmas területigényt látván (3.1.1-1 táblázat), érdemes lenne inkább a valódi megújuló energiaforrások felé fordulni.

### **3.1.2 Következtetések**

A 3.1 fejezetben a fókuszálható napsugárzás hazai potenciálját mutatom be, összehasonlítva a területi igényét az energianövény termesztés, a napelemes energiatermelés, valamint a lignitbányászat területigényével. A számításokból kiderült, hogy az a megítélés, miszerint

Magyarországon a napenergiának nagy a területigénye, nem igazolható, sőt az energianövény termesztéshez viszonyítva a területigénye nagyon kedvező, attól 2 nagyságrenddel kisebb.

Bár a napenergia potenciál bemutatására csak egyféle (de nagyon lényeges) aspektusból került sor, a 3.1 fejezetben prezentált összehasonlítás mégis elősegítheti annak a hazai szemléletnek a megváltozását, hogy a napenergiával, mint megújuló energiával, Magyarországon foglalkozni ipari (nagyüzemi) szinten nem érdemes.

### **3.2 ANYAGOK HŐTÁROLÓ KÉPESSÉGÉNEK ÖSSZEHAONLÍTÓ VIZSGÁLATA**

A hőtároló anyagok alkalmasságának vizsgálatánál két lényeges szempontot érdemes figyelembe venni:

- mekkora hőmérsékleti tartományban lehet a gyakorlatban alkalmazni az adott hőtároló anyagot (1) és ez hogy illeszkedik a napenergia begyűjtési lehetőségekhez, valamint
- mekkora a hőtároló (a hőtároló anyagtól és az alkalmazási hőmérséklettől is függő) létesítési/beruházási (tartály + anyag + egyéb szerkezetek), üzemeltetési és karbantartási költsége (2).

Abból indultam ki, hogy a napenergiát 70-800°C közötti tartományban lehet begyűjteni. Tehát ezt a hőmérséklettartományt célszerű minél jobban kihasználni. Ilyen szempontból az a szemlélet, hogy a víz, az egyetlen valóban lehetséges és kizárólag jó hőtároló anyag, ebben a technológiai környezetben már nem indokolható, összehasonlítva más anyagok alkalmazhatóságával és a hőtároló képességével.

Kiszámítottam néhány hőtároló anyag légköri nyomáson mért gyakorlati hőtároló képességét. A számításoknál az alábbi egyszerűsítési feltételeket alkalmaztam:

- a fajhőjük (ill. a fajlagos térfogati hőkapacitásuk) az alkalmazási hőmérséklet tartományban állandó,
- a hőmérsékletváltozással járó térfogatváltozást elhanyagoljuk, azaz a sűrűség is állandó.

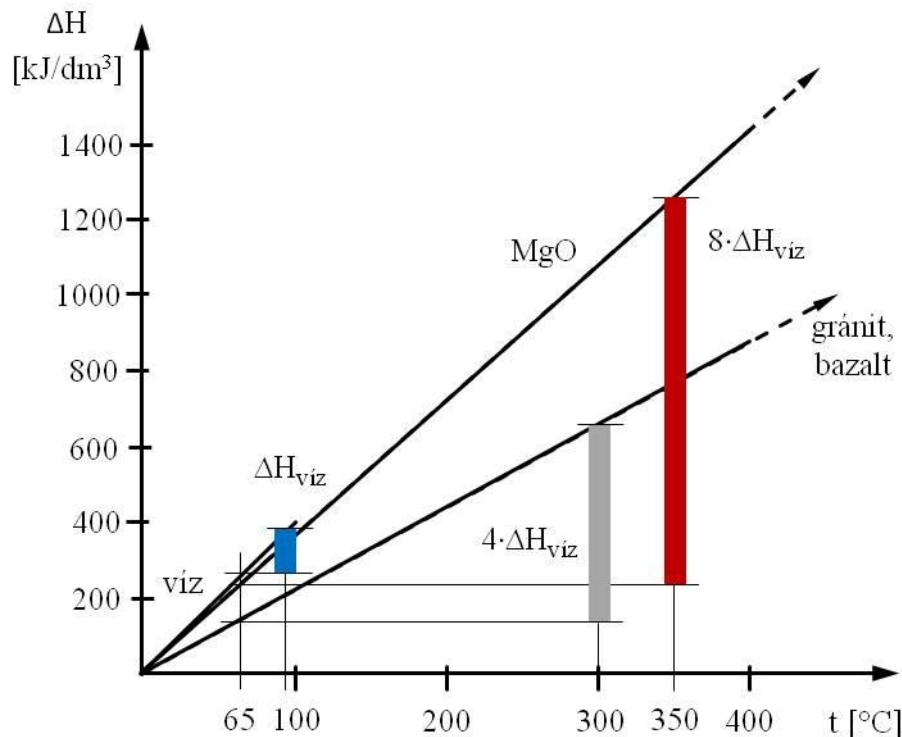
Ekkor a (2.1.5-3) és a (2.1.5-4) egyenlet analógiájára, a térfogategységben eltehető energia mennyisége pl. a víz, a szilárd közet (bazalt, gránit) és a magnezit esetében a következő:

$$\Delta H_{\text{víz}} \approx c_p^{\text{térfogati}} \cdot V \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = 4,1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 1 \text{m}^3 \cdot (95^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}) = 123 \text{MJ}, \quad (3.2-1)$$

$$\Delta H_{\text{bazalt,gránit}} \approx 2,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 1 \text{m}^3 \cdot (300^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}) \approx 540 \text{MJ}, \quad (3.2-2)$$

$$\Delta H_{\text{magnezit}} \approx 3,54 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 1 \text{m}^3 \cdot (350^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}) \approx 1009 \text{MJ}. \quad (3.2-3)$$

Jól látszik, hogy légköri nyomáson a vízhez képest, szilárd közetekben legalább négyszer több energiát, magnezitben (MgO-ban) pedig nyolcszor több energiát lehet tárolni, mivel a légköri nyomáson a szilárd anyagoknál lehetőség van a hőmérséklet különbséget növelni (3.2-2 ábra).



3.2-2 ábra

A különböző anyagokban légköri nyomáson 65 °C felett tárolható energia mennyisége

A mesterségesen kialakított szilárd hőtárolók esetén még magasabb hőmérsékletek is elérhetőek (400°C vagy e feletti is), vagy jobb térfogati hőkapacitású közet alkalmazásával ezek a vízhez viszonyított különbségek még tovább növelhetőek. A napenergia hasznosításban, de más termikus energia hasznosításban is a vízhez képest elérhető az 5-10-szeres különbség. Ez mindenképpen figyelemreméltó!

Meg kell jegyezni, hogy a Ruths-hőtárolók esetében, amelyek tulajdonképpen gőz-víz egyensúlyon alapuló nyomás alatti forróvíz tárolók és telített gőzt szolgáltatnak (miközben a nyomásuk és a hőmérsékletük esik), a légköri nyomásnál nagyobb nyomás alkalmazása miatt a 100°C-nál magasabb vízhőmérsékleti szintet is el lehet érni, ami lehetőséget ad víz esetében is a hőmérséklet-tartomány növelésére és a nagyobb energiatartalom tárolására. Azonban ez, főleg a nagyméretű nyomástartó edény készítés problémája miatt a hosszútávú hőtárolás szempontjából akkora energiatárolási növekedést nem tud produkálni, ami vetekedne a szilárd anyagban tárolható energiatartalommal. Ugyanis vagy a nagy nyomást lehet biztosítani, de akkor a tartálméret növelése okoz problémát, azaz a tartály kicsi, vagy a tartálméretet növelik, de akkor meg a tartálynomás növelése okoz gondot [179]. Ezek a nyomástartó edények azonban mindenképpen költséges energiatárolók. Az erőművi gyakorlatban használt Ruths-hőtárolók általában 2 és 20 bar között működnek és az ennek megfelelő egyensúlyi hőmérsékleteken 120-210 °C-on, de ezeknek a tartályoknak a mérete sokkal kisebb, mint ami egy hosszútávú hőtároláshoz szükséges lenne. Az utóbbi években több nagyméretű víztározót is készítettek (pl. Münchenben 5700 m<sup>3</sup>-est [162]), de ezek nem nyomásalatti tárolók és a tárolt forróvíz hőmérséklete max. 90 °C. Kialakításuknál a termikus átmeneti réteggel rendelkező tárolóra és ennek megfelelő töltésre és ürítésre törekszenek.

A fentiekben ismertetett gondolatmenet vezetett el ahhoz, hogy a számítási példákban alkalmazott hőtárolónál a magnezit téglá térfogati hőkapacitásával és alkalmazható hőmérséklet-tartományával számoljak.

### **3.3 CSALÁDI HÁZ ÉVES HŐIGÉNYÉNEK BIZTOSÍTÁSA NAPENERGIÁVAL**

Ebben a fejezetben azt a kérdést vizsgálom meg, hogy lehetséges-e napenergiával az épületek, a lakóházak teljes hőigényét folyamatosan, egész éven át biztosítani (monovalens üzemmód) [15, 16, 17]. A számításokat, egy átlagos családi ház hőszükségletének biztosításán keresztül tárgyalom, majd ezt lehet adoptálni nagyobb távfűtési rendszerekre, nagyobb hőigényű rendszerekre, a villamosenergia termelésére.

#### **3.3.1 A tervezési alapok**

##### **Egy családi ház hőenergia felhasználása**

Alapvetően kétféle hőigény van: a melegvíz előállításának hőigénye (HMV) és a fűtés

hőigénye [190]. A gyakorlati tapasztalatokra támaszkodva, egy 5 fő által lakott kb. 100 m<sup>2</sup>-es családi házra teljes hőigényként évi 80000 MJ energia felhasználását vettem alapul a számításoknál. Ez megközelítőleg 2350 m<sup>3</sup> földgáz felhasználásnak felel meg (a földgáz égéshője kb. 34 MJ/m<sup>3</sup>, kb. 240.000,- Ft éves gázdíj) és összesen kb. 220 kWh/(m<sup>2</sup>év) fűtési és melegvíz energiaigényt jelent, ami a jelenlegi átlagos és valós értékeknek szintén megfelel. Az új építésű házaknál ennél már alacsonyabb az energiafelhasználás a szigorúbb szigetelési követelmények miatt. A panel- és a társasházakban szintén alacsonyabb az egy lakásra jutó energiaigény, energiafogyasztás.

### **A napsugárzásra merőleges felület meghatározása**

A 3.1 fejezet szerint 1 m<sup>2</sup> napsugárzásra merőleges felületen kb. 400 W direkt sugárzási teljesítményből nyert energiát lehet éves átlagban a napsütéses órák alatt összegyűjteni. A napsütéses órák száma legyen 2100 óra/év. Mivel a családi ház éves energiaigénye 80000 MJ, ezt az energiát plusz a tárolás alatti hőveszteséget kell majd begyűjteni.

Első lépésben csak a ténylegesen felhasználandó energiaigényre számolunk. Tehát az évi energiaigényünkből (80000 MJ) és a gyűjtési lehetőségéből kiszámítható az energia begyűjtéséhez szükséges, a nap sugárzására merőleges felület:

$$A = \frac{80000 \frac{\text{MJ}}{\text{év}}}{400 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot 2100 \text{h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \approx 26,5 \text{ m}^2 . \quad (3.3.1-1)$$

Jól látható, hogy a 26,5 m<sup>2</sup> reális, emberi léptékű méret.

### **A szükséges hőtároló kapacitás meghatározása**

A töltés és a fogyasztás (ürítés) meghatározza a tárolási igényt. Ennek alakulását a 3.3.1-1 táblázat mutatja. A legnagyobb tárolási igény adja a hőtároló szükséges nagyságát. Ez októberben van.

A szükséges hőtároló kapacitásra 52.000 MJ értéket kaptuk (ez az éves 80.000 MJ energiafelhasználás 65%-a). Ha ezt a hőtárolást biztosítani tudjuk, akkor ekkora kapacitású hőtárolóval, a napsütéses órákban történő napenergia begyűjtés mellett, egész éven át biztosítani lehet a lakóház teljes hőigényét.

Időszak (nap)	Napsütéses órák száma	Töltés [MJ] a 28 m <sup>2</sup> -ről begyűjtött energia	Fűtés [MJ]	Melegvíz [MJ]	Ürités [MJ] az összes hőigény	A tároló tartalma
április (30)	187	7470	1840	1200	3040	4430
május (31)	253	10110	900	1240	2140	12400
június (30)	267	10670	0	1200	1200	21870
július (31)	297	11870	0	1240	1240	32500
augusztus (31)	278	11110	0	1240	1240	42370
szeptember (30)	202	8070	260	1200	1460	48980
október (31)	139	5550	1900	1240	3140	51390 ≈ <b>52000 MJ</b>
november (30)	63	2520	9470	1200	10670	43240
december (31)	40	1600	14730	1240	15970	28870
január (31)	57	2280	16830	1240	18070	13080
február (28)	83	3320	12100	1120	13220	3180
március (31)	136	5430	7360	1240	8600	10
éves (365)	2002	80000	65390	14600	79990	

3.3.1-1 táblázat

Egy lakóház hőigénye havi bontásban és a hőtárolási igény alakulása

### 3.3.2 A hőtárolás módja és a hőtárolás mérete

Hőtárolásra a közvetlenül mérhető, érzékelhető hőtárolási módot választottam. Ezen belül további cél az volt, hogy lehetőleg olyan hőtároló anyagot válasszak, amely megfelel az alábbi műszaki követelményeknek:

- minél nagyobb legyen az alkalmazható hőmérséklet-tartománya, a mindennapi fűtéshez minimálisan szükséges 65 °C-os hőmérséklet felett,
- minél nagyobb legyen a térfogati hőkapacitása,
- minél jobb hővezetési tényezővel rendelkezzen,
- termikusan és kémiaiilag stabil és időálló legyen,
- ne legyen korrozív, és a környezetre ártalmas,
- ne legyen tűz és robbanásveszélyes, valamint
- egyszerűen ellenőrizhető legyen (kontrol).

Több hőtároló anyagot is számba vettem. A só olvadékokat, a szintetikus ionos folyadékokat,

a termikus olajokat, a szilárd anyagokat, a hidrogént, stb. A választás a 3.2 fejezetben ismertett okok miatt, a jó térfogatú hőkapacitással rendelkező magnezit téglára (MgO) esett. Az irodalom alapján itt találtam a legkedvezőbb térfogati hőkapacitás értéket. Ezt a téglát főleg tűzállóanyagként alkalmazzák kemencéknél, kazánoknál, de ilyen téglát használnak az elektromos hőtároló kályhákban is. Jellemzőit a 3.3.2-1 táblázat ismerteti.

A térfogati hőkapacitása  $3,54 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$  megközelíti a víz  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ -on mért térfogati hőkapacitását  $4,05 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ , annak majdnem 90%-a, de sokkal nagyobb hőmérséklet tartományban használható (olvadáspontja  $2820 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Az alkalmazás felső határát valójában a hőtároló közeg jellemzője határozza meg.

Meg kell említeni, hogy az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  alapú téglák szintén nagyon jó térfogati hőkapacitással rendelkeznek:  $3,3 \text{ MJ}/\text{m}^3$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  tartalom 95%).

Összetétel	Alkalmazási hőmérséklet tartomány $\Delta T$	Fajhő $[\text{kJ}/(\text{kgK})]$	Sűrűség $[\text{kg}/\text{m}^3]$	Térfogati hőkapacitás $[\text{MJ}/(\text{m}^3\text{K})]$	Hővezető képesség $[\text{W}/(\text{mK})]$	Ár $[\$/\text{tonna}]$
37 – 98 % MgO 1 – 60 % CaO és/vagy $\text{Cr}_2\text{O}_3$	$> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (65 – $400^\circ\text{C}$ )	1,172	3020	3,54	8,4 ( $500^\circ\text{C}$ -on)	100 – 500

3.3.2-1 táblázat

A magnezit téglá jellemzői [176, 177]

A példában a tároló belső maximális hőmérsékletére  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot választottam. Valójában nem a magnezit téglá használhatósága határozza meg a tároló belső hőmérsékletének maximumát, hanem hogy mennyire fókuszálunk, mi a napmezőt, a napenergia begyűjtő rendszert elhagyó közeg kilépő hőmérséklete és mi a napmező és a tároló közötti hőszállító közeg (HSzK). A pontba fókuszáló rendszerekkel  $800\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot is el lehet érni. A vonalba fókuszáló rendszerekkel pedig a  $4\text{-}500^\circ\text{C}$  körüli kimenő hőmérsékleteket lehet elérni. A vonalba fókuszáló rendszereknél termikus olajokat, ionos folyadékokat és só olvadékokat használnak HSzK-nek. A só olvadék használata egyszerű rendszereknél nem jön szóba (hidegben megdermed), de a termikus olajok és az ionos folyadékok megfelelőek HSzK-nek. Létezik olyan ionos folyadék, amelynek az alkalmazhatósági hőmérséklet tartománya  $-75^\circ\text{C}$  –tól  $459^\circ\text{C}$ -ig tart [196]. Ezzel bőven biztosítható a hőtároláshoz szükséges hőfoklépcső a napenergia begyűjtésből a tároló maximális hőmérséklete esetén is.

A már meghatározott puffer tároló kapacitásból (52 000 MJ), az alkalmazási hőmérséklet tartományból ( $\Delta T = 400^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C} = 335^\circ\text{C}$ ), a térfogati hőkapacitásból a tároló (a magnezit téglák) térfogata kiszámítható:

$$Q = c_p^{\text{térfogati}} \cdot m \cdot \Delta T \rightarrow m = \frac{Q}{c_p^{\text{térfogati}} \cdot \Delta T}, \quad (3.3.2-1)$$

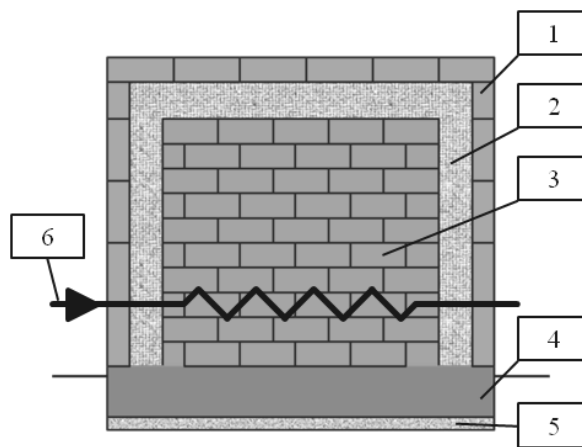
$$m = \frac{52 \cdot 10^9 \text{ J}}{3,54 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot (400 - 65)} \approx 44 \text{ m}^3. \quad (3.3.2-2)$$

Jól látható, hogy a  $44 \text{ m}^3$  is egy elfogadható méret. Régen ekkora széntárolókat építettek a házakhoz (kb.  $4 \times 4 \times 2,7\text{m}$ -es helyiség).

### 3.3.3 A hőszigetelő-réteg vastagságának és a tároló hőveszteségének értékei

#### A hőtároló elvi felépítése

Mivel magnezit téglák a hőtároló anyag, a tároláshoz tartály nem is szükséges. Ez a költségeket is jelentősen csökkenti. A hőtárolóra általam javasolt elvi konstrukciót a 3.3.3-1. ábra szemlélteti [184].



3.3.3-1 ábra

A magnezit téglából épített hőtároló elvi felépítése

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

Gyakorlatilag kétféle lehetséges geometria vizsgálható, a kocka és a henger. Térfogatra számítva a legkisebb fajlagos felülete a téglatestek közül a kockának van, hengeres testeknél pedig azoknak a hengeres testeknek, ahol a  $H/D \approx 1$  arány van. Azonos térfogatnál a kocka felülete kb. 8,4%-al nagyobb, mint a minimális felületű hengeres testé. A téglák miatt először csak a kocka alakú tárolót vizsgálom.

### A tároló termikus ellenállásai

Egyszerűsített modellt alkalmazok. A tároló alját és a felső részét különböztetem meg. A tároló alja végső soron a talajjal érintkezik, a felső részek (oldalai, teteje) pedig a környezeti levegővel [110]. A tároló oldalát és a tetejét hőátadás szempontjából egyformának kezeltem.

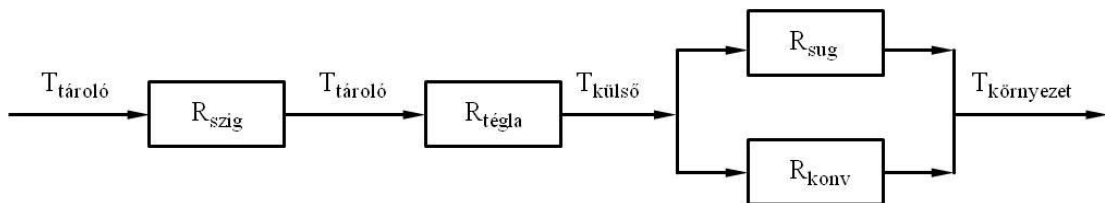
A tároló felső részének és aljának termikus ellenállásai:

$$R_{\text{vez}} = \delta/\lambda, \text{ illetve } R_{\text{átad}} = 1/\alpha$$

az alábbiak szerint alakulnak:

*A tároló föld feletti részének eredő termikus ellenállása*

$$R_{\text{felső}} = R_{\text{szig}} + R_{\text{tégla}} + R_{\text{átadási}} = R_{\text{vez}} + R_{\text{átadási}} \cdot \quad (3.3.3-1)$$

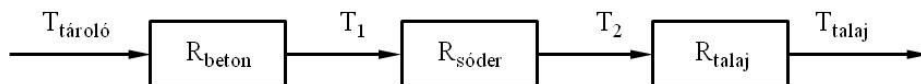


Az eredő átadási termikus ellenállás, amely tartalmazza a sugárzást és a konvekciót is:

$$R_{\text{átadási}} = \frac{1}{\alpha_{\text{konv}} + \alpha_{\text{sug}}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \quad (3.3.3-2)$$

*A tároló aljának eredő termikus ellenállása*

$$R_{\text{alsó}} = R_{\text{beton}} + R_{\text{sóder}} + R_{\text{talaj}} \cdot \quad (3.3.3-3)$$



### A hővesztesség számításához felhasznált értékek, adatok és anyagjellemzők

Az MSZ 04-140-02 szerint az épületek külső felületeire a hőátadási tényező tervezési értéke:  $\alpha = 24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

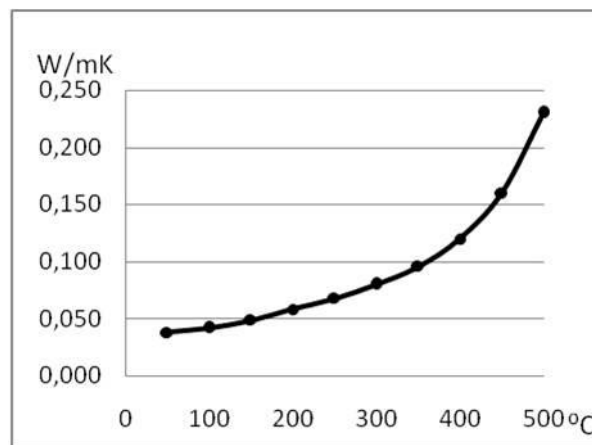
A tároló alapzatához  $700 \text{ kg}/\text{m}^3$  sűrűségű és  $>1,50 \text{ N}/\text{mm}^2$  nyomószilárdságú könnyűbetont választottam. Alatta a sóderágy és a talaj van. A számításokhoz felhasznált anyagjellemzőket és adatokat a 3.3.3-1 és a 3.3.3-2 táblázat mutatja [154, 177].

ásványgyapot		tégla/cserép	könnyűbeton	sóder	talaj
400 – 300 °C	0,100 W/(mK)	0,64 W/(mK)	< 0,17 W/(mK)	0,35 W/(mK)	1,3 W/(mK)
300 – 200 °C	0,070 W/(mK)				
200 – 100 °C	0,049 W/(mK)				
< 100 °C	0,038 W/(mK)				
$\delta_{\text{szig}} = \text{számítandó}$		$\delta_{\text{tégla}} = 0,12 \text{ m}$	$\delta_{\text{beton}} = 0,6 \text{ m}$	$\delta_{\text{sóder}} = 0,3 \text{ m}$	$\delta_{\text{talaj}} = 0,4 \text{ m}$

3.3.3-1 táblázat

A számításoknál alkalmazott  $\lambda$  hővezetési tényezők és  $\delta$  rétegvastagságok értékei

A hőszigetelő anyag hővezetési tényezője jelentősen nő a hőmérséklet növekedésével  $\lambda(T)$ , lásd a 3.3.3-1 ábrát. Ezt a számításoknál is figyelembe kell venni. Így minden hónapban tulajdonképpen más-más termikus ellenállású hőszigetelés van.



3.3.3-2 ábra

Az ásványgyapot  $\lambda$  hővezetési tényezőjének hőmérséklettől függő változása

Az ásványgyapot (szigetelőanyag) termikus ellenállása:

$$R_{\text{szig}} = R_{\text{szig}}^{400-300^{\circ}\text{C}} + R_{\text{szig}}^{300-200^{\circ}\text{C}} + R_{\text{szig}}^{200-100^{\circ}\text{C}} + R_{\text{szig}}^{<100^{\circ}\text{C}}. \quad (3.3.3-4)$$

A környezeti levegőhőmérsékleteket és a talaj hőmérsékletét 1m-es mélységben a 3.3.3-2 táblázat tartalmazza.

### A hőszigetelő-réteg vastagságának és a tároló hőveszteségének értékei

A hőáram számítását a többrétegű sík fal hőátszármaztatásaként modelleztem. A kocka alakú hőtároló 5 oldala a környezeti levegővel, 1 oldala pedig a talajjal érintkezik. Az átadási és a

vezetési hőáram megegyezik, így ismert külső falhőmérséklettel a hőáram és a szigetelőréteg vastagsága az alábbiak szerint számítható:

$$\dot{q}_{\text{átad}} = \frac{\Delta T_{\text{átad}}}{R_{\text{átad}}} \quad \text{és} \quad \dot{q}_{\text{vez}} = \frac{\Delta T_{\text{vez}}}{R_{\text{vez}}}, \quad \text{valamint} \quad \dot{q}_{\text{átad}} = \dot{q}_{\text{vez}} = \dot{q}. \quad (3.3.3-5)$$

A tároló belső hőmérsékletének és a környezeti hőmérsékletnek az ismeretében, a szabvány által megadott hőátadási tényezőt felhasználva, felvéve egy kezdeti külső falhőmérsékletet, iterációs számítással meghatározható a helyes külső falhőmérséklet és a hozzá tartozó fajlagos hőáram ( $\dot{q} = \dot{q}_{\text{átad}} = \dot{q}_{\text{vez}}$ ). A fajlagos hőáram és a felület ismeretében pedig számítható a hőveszteség (a számítás részletes leírását a függelék tartalmazza):

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A. \quad (3.3.3-5)$$

A méretezést max. 400 °C-os belső hőmérsékletre és 30 cm-es, illetve később 40 cm-es ásványgyapot szigetelőréteg vastagságra végeztem el [19]. Az egyes hónapokban fellépő hőáramok (hőveszteségek) a szigetelőréteg vastagságából és az adott hónapban kialakult tároló belső hőmérsékletéből és a külső környezeti hőmérsékletből (a hőmérséklet-különbségből) numerikusan számíthatók. A veszteség azon hatását, hogy valamennyire csökkenti a tároló belső hőmérsékletét is az adott hónapban, a hőmérséklet-különbség számításánál az egyszerűség kedvéért nem vettem figyelembe. Ha ezt is figyelembe vennénk még kedvezőbb eredmények jönnének ki a hőveszteségre nézve, ezért elhanyagolásuk a végső lényegi következtetést nem befolyásolja.

A 3.3.3-2 és 3.3.3-3 táblázat tartalmazza a számításoknál figyelembe vett termikus értékeket és a hőtároló tartály belső hőmérsékletének alakulását, amelyeket a tárolt hő mennyiségéből (töltés-ürítés) és a minimálisan biztosítandó 65 °C-os tároló hőmérsékletéből számítottam ki. A számítások először 1 lakóház energiaigényére (a 44 m<sup>3</sup>-es tárolóra) végeztem el (3.3.3-2 táblázat).

Az eredmények azt mutatták, hogy hiába lehetséges kis helyről (26,5 m<sup>2</sup>) begyűjteni a szükséges energiát, hiába lenne elég egy kis (44 m<sup>3</sup>) tároló is az energia elraktározására, a hőveszteség olyan nagy, hogy a hőt hosszú időre eltenni nem lehet. A tároló nagyobb ütemben képes elveszíteni a hőt, mint amilyen ütemben mi tölteni szeretnénk.

Ezt követően, kiszámítottam 50 lakóház energiaigényének megfelelő közös 2200 m<sup>3</sup>-es tároló hőveszteségét, majd 100 lakóház energiaigényéhez szükséges 4400 m<sup>3</sup>-es tároló

hővesztését is. Az eredményeket a 3.3.3-2 és 3.3.3-3 táblázat mutatja. Jól látszik, hogy a fajlagos hővesztések eredményeiben hatalmas változás állt be a 44 m<sup>3</sup>-es tároló fajlagos hővesztéséhez viszonyítva.

30 cm vastag ásványgyapot szigetelés							44 m <sup>3</sup>	2200 m <sup>3</sup>	4400 m <sup>3</sup>
időszak	T <sub>belső</sub> [°C]	T <sub>fal,külső</sub> [°C]	T <sub>körny</sub> [°C]	Q <sub>felső, vesz</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	T <sub>talaj</sub> [°C]	Q <sub>alsó, vesz</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]
ápr. (30)	94	12	12	10	10	18	2,2	30	47
máj. (31)	145	18	17	17	14	28	3,8	51	81
jún. (30)	206	21	20	27	18	40	5,7	77	122
júl. (31)	274	24	22	42	20	54	8,8	120	190
aug. (31)	338	24	21	61	21	68	12,5	169	268
szept. (30)	381	20	17	75	19	77	14,6	198	315
okt. (31)	396	14	11	81	14	81	16,2	220	350
nov. (30)	344	9	6	64	10	71	12,6	171	272
dec. (31)	251	4	2	39	7	52	8,2	112	178
jan. (31)	149	1	0	20	5	31	4,4	59	94
febr. (28)	85	2	2	10	4	17	2,0	27	44
márc. (31)	65	6	6	7	5	13	1,6	22	35
Az éves hővesztés:							92,6	1257	1995
Az éves felhasználás:							80,0	4000	8000
Az éves veszteség százalékos aránya:							116%	31%	25%

3.3.3-2 táblázat

A 30 cm-es ásványgyapottal hőszigetelt, különböző méretű hőtárolók éves hővesztései

Szinte hihetetlen, hogy mennyire lecsökkent! Ennek oka a fajlagos felület csökkenése. 200 lakásnál (8800 m<sup>3</sup>-es tároló) már csak 20%, 500 lakásnál (22000 m<sup>3</sup>-es tároló) pedig még kevesebb, 15% a fajlagos hővesztés! Igazolódott a hipotézis, a fajlagos hővesztés jelentősen csökken a méret növekedésével.

A még kedvezőbb fajlagos hővesztés értékek eléréséhez, azonos feltételek mellett, növeltem a szigetelőanyag rétegvastagságát, azaz növeltem a hővesztéssel szembeni termikus ellenállást. A 40 cm-es ásványgyapot szigetelésnél a veszteségek természetesen tovább csökkentek (3.3.3-3 táblázat).

40 cm vastag ásványgyapot szigetelés							44 m <sup>3</sup>	2200 m <sup>3</sup>	4400 m <sup>3</sup>
időszak	T <sub>belső</sub> [°C]	T <sub>fal,külső</sub> [°C]	T <sub>körny</sub> [°C]	Q <sub>felső, veszt</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	T <sub>talaj</sub> [°C]	Q <sub>alsó, veszt</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]	Q <sub>összes</sub> [GJ]
ápr. (30)	94	12	12	8	10	18	1,9	25	40
máj. (31)	145	18	17	13	14	28	3,1	42	67
jún. (30)	206	21	20	20	18	40	4,5	61	97
júl. (31)	274	24	22	32	20	54	7,1	97	154
aug. (31)	338	24	21	46	21	68	9,9	135	214
szept. (30)	381	20	17	57	19	77	11,7	159	252
okt. (31)	396	14	11	61	14	81	12,9	175	278
nov. (30)	344	9	6	49	10	71	10,2	139	220
dec. (31)	251	4	2	30	7	52	6,7	92	145
jan. (31)	149	1	0	15	5	31	3,5	48	76
febr. (28)	85	2	2	8	4	17	1,7	23	37
márc. (31)	65	6	6	5	5	13	1,3	17	27
Az éves hőveszteség:							74,6	1013	1608
Az éves felhasználás:							80,0	4000	8000
Az éves veszteség százalékos aránya:							93%	25%	20%

3.3.3-3 táblázat

A 40 cm-es ásványgyapottal hőszigetelt, különböző méretű hőtárolók éves hőveszteségei

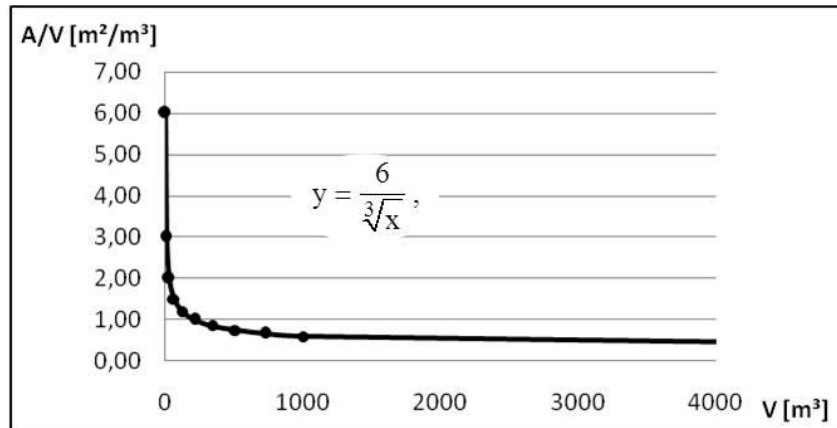
Tovább növelve a méretet, egyre kedvezőbb eredmények lettek. 200 lakásnál (8800 m<sup>3</sup>-es tároló) már csak 16%, 500 lakásnál (22000 m<sup>3</sup>-es tároló) pedig 12% lett a fajlagos hőveszteség!

Megvizsgáltam, hogyan függ az A/V fajlagos felület a V térfogattól. A vizsgálatot először kockára végeztem el. A 3.3.3-4 táblázat mutatja a különböző a élhosszúságok mellett adódó felület és fajlagos felület értékeket, majd ezt ábrázoltam is 3.3.3-3 ábrán.

a [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50
A [m <sup>2</sup> ]	6	24	54	96	150	216	294	384	486	600	2400	5400	9600	15000
V [m <sup>3</sup> ]	1	8	27	64	125	216	343	512	729	1000	8000	27000	64000	125000
A/V [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	6,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,60	0,30	0,20	0,15	0,12

3.3.3-4 táblázat

A kocka fajlagos felülete a méret függvényében



3.3.3-3 ábra

Kocka esetén a felület és a térfogat aránya a térfogat függvényében

Nagyon fontosnak tartom kiemelni, hogy a mértani testek fajlagos felülete nem csak az alakjuktól függ, hanem a méretüktől is!

Alak szerint az azonos térfogatú mértani testek közül a legkisebb fajlagos felülettel a gömb rendelkezik, majd ezt követi az a hengeres alakú test, ahol az átmérő és a magasság megegyezik ( $H/D = 1$ ), és csak ezután jön a kocka alakú mértani test. Az összes többi testnek a fajlagos felülete ezeket meghaladja. Azonos térfogatú testek alaktól függő fajlagos felületi arányai:

- kocka / henger ( $H/D = 1$ ) = 1,084 (8,4%),
- kocka / gömb = 1,24 (24%),
- henger ( $H/D = 1$ ) / gömb = 1,145 (14,5%).

Felírtam a mértani testek mérettől függő, azaz a térfogattól függő fajlagos felület változását (3.3.3-3 ábra) megadó algebrai kifejezéseket ( $y = \frac{A}{V}$ ,  $x = V$ ) is:

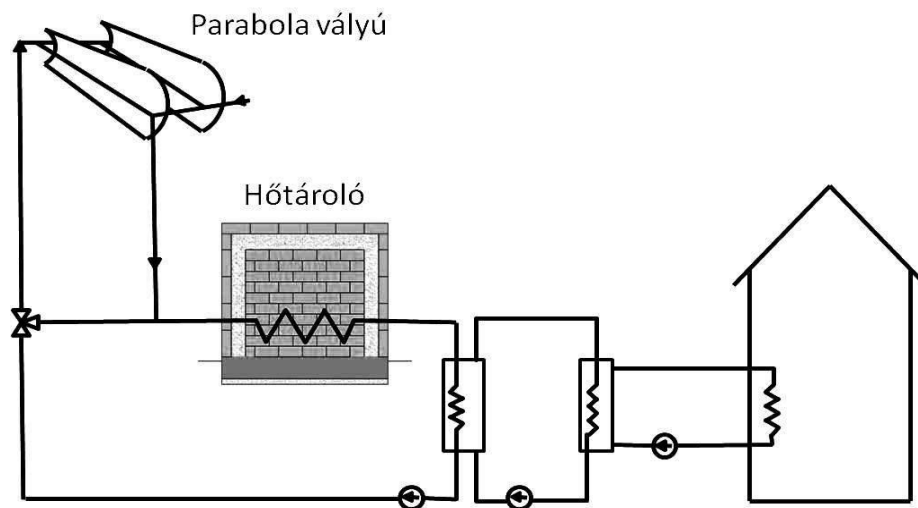
- kocka esetén  $y = \frac{6}{\sqrt[3]{x}}$ ,
- henger ( $H/D = 1$ ) esetén  $y = \frac{5,54}{\sqrt[3]{x}}$ ,
- gömb esetén  $y = \frac{4,84}{\sqrt[3]{x}}$ .

Bár a fajlagos felületről leírtak triviálisnak tűnnek, de részletesen beszélni kell róla, mert csak így lehet nagyon szemléletesen bemutatni, lásd a 3.3.3-3 ábrán látható görbét, hogyan csökken egy azonos alakú test fajlagos felülete és ezzel együtt hogyan nő az átadási oldalon a

termikus ellenállás. A hőveszteség a felületen zajlik, a felületen keresztül megy végbe, ezért a méretnövekedést kísérő ilyen mérvű fajlagos felület csökkenés jelentősen tudja befolyásolni a test fajlagos hőveszteségét.

### 3.3.4 Következtetések

A számítások alapján megállapítom, hogy elméletileg lehetséges kis hőveszteséggel a hosszúidejű, szezonális hőtárolás, de ezt csak a nagyméretű hőtárolókkal lehet megvalósítani. A fókuszált napenergia begyűjtéssel (pl. parabolavályúval vagy Fresnel lencsés napkollektor rendszerrel) elérhető a magas hőmérsékletű hőtermelés. Ezt a magas hőmérsékletű hőtermelést magas hőmérsékletű hőtárolással párosítva (pl. magnezit téglá hőtárolóban), egész éven át folyamatosan biztosítani lehet a lakóépületek teljes fűtési és melegvíz hőigényét Magyarországon is. Mivel csak nagy méretekben jó a hőtárolás, ezért egy egyedi lakóház hőenergia ellátására létrehozni egy ilyen elven működő technológiát nem javasolt, de nagyobb energiaigények fedezésére már kifejezetten ajánlható, mivel itt a fajlagos hőveszteséget alacsony értéken lehet tartani. Az ipari méretek miatt a rendszer ezért főleg távhő szolgáltatásra lehet alkalmas (3.3.4-1 ábra).



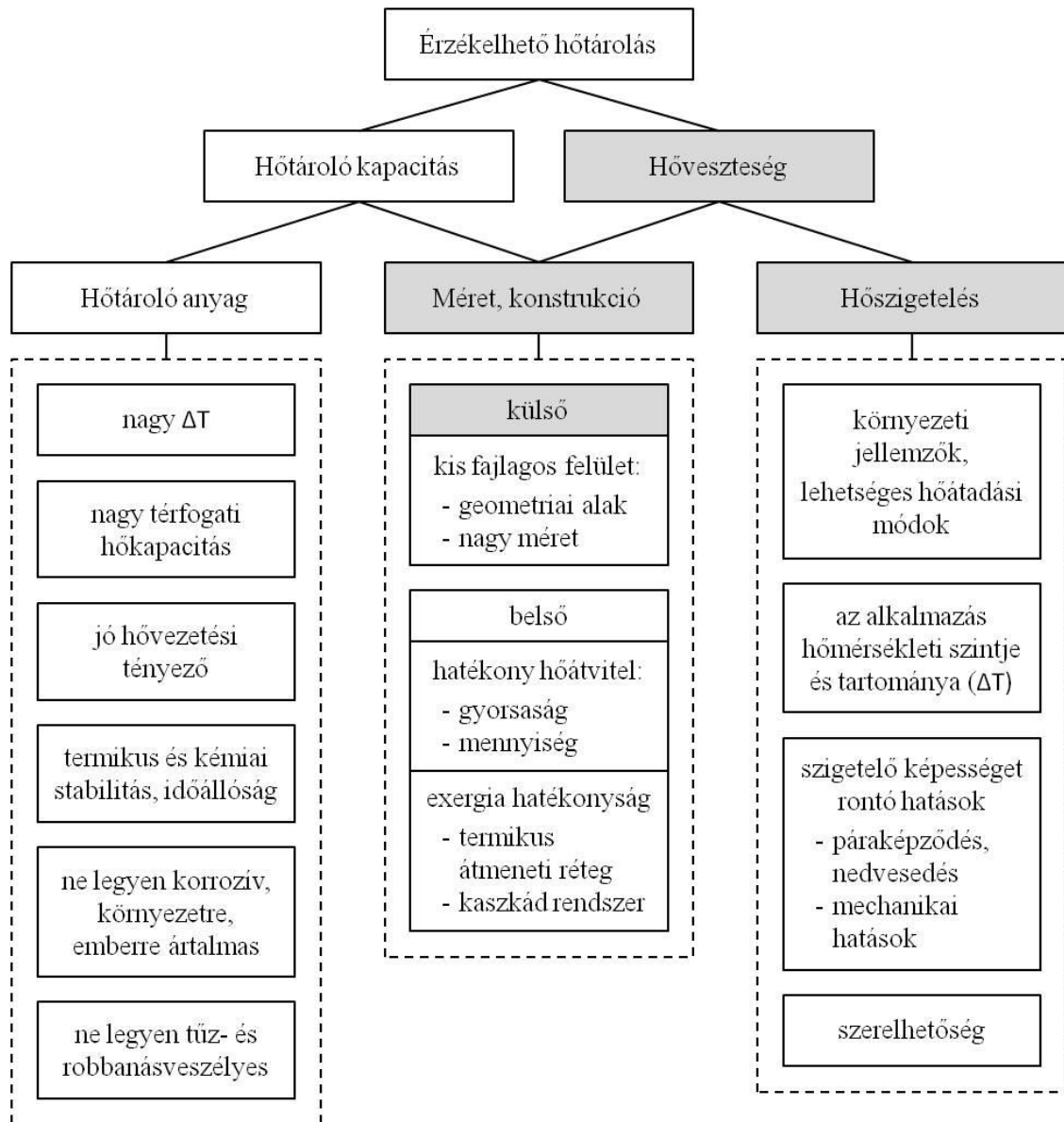
3.3.4-1 ábra

Hőtárolóval ellátott, napenergiával működő távfűtési rendszer egyszerűsített elvi sémája

A hőtároló magas hőmérséklete ráadásul biztosítja az energia kinyerés jó arányát is. Egy ilyen elven felépülő technológia egyszerű, biztonságos és teljesen környezetbarát. Az egy lakásra kiszámított arányok emberi léptékűek, a megvalósíthatóságuk reális. Az éves hőveszteség, ezt a későbbi számítások is igazolták 10 % alatt tartható. Más peremfeltételekre

tervezve a villamosenergia termelés nagy és folyamatos energiaigényének fedezésére is alkalmas a technológiai elv (3.5.2-1 ábra).

A kutatási eredmény ismeretében a 3.3.4-2 ábrában összefoglaltam, hogy az érzékelhető hő tárolás helyes kialakításánál, tervezésénél milyen műszaki szempontokra kell figyelemmel lenni.

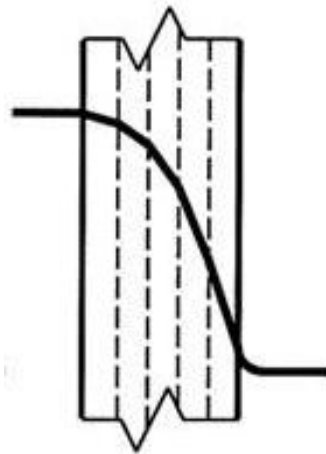


3.3.4-2 ábra

Az érzékelhető hő tárolás tervezésének műszaki szempontjai

A bevezetőben megfogalmazott kutatási cél azon kérdésére, „*Hogyan csökkenthetjük a hő tárolók hővesztését?*” az új válasz az, hogy a hő tárolók fajlagos hővesztését kell csökkenteni és erre alkalmas a méret növelése is.

A számítások további tanulsága, hogy a homogén anyagú, de magas hőmérsékletű és nagy hőmérséklet-tartományú szigeteléseknél a szigetelésben kialakuló hőmérsékletprofil nem lineáris a  $\lambda = f(T)$  miatt. Ezért hiába állandó a szigetelőréteg vastagsága az időben változó hőtároló belső hőmérséklete miatt időben változó termikus ellenállást nyújt az állandó vastagságú szigetelés. Mivel a  $\lambda = f(T)$  függvény algebrai kifejezését többnyire nem tudjuk, vagy nem lehet megadni, de ismerjük az egyes hőmérsékletekhez tartozó hővezető képesség értékeit, ezért a számításoknál jó módszer, ha a homogén anyagú hőszigetelést is többretegű hőszigetelésként kezeljük, ahol az egyes rétegeket az adott hőmérséklet-tartományra állandó értékre felvett hővezető-képességük jellemzi (3.3.4-3 ábra). Mivel a hőmérséklet-tartományok is változnak, az egyes rétegek vastagságai is időben változnak a teljes szigetelőréteg vastagságon belül.



3.3.4-3 ábra

A sík fal hőszigetelésében a  $\lambda(T)$  miatt kialakuló nemlineáris hőmérsékleti profil modellezése a rétegekre vett lineáris hőmérséklet-eloszlásokkal

### 3.4 A HŰLÉS (MELEGEDÉS) SEBESSÉGÉNEK FÜGGÉSE A FAJLAGOS FELÜLETTŐL

Az előző fejezet számításai alapján kiderült, hogy nagyon fontos összefüggés van a fajlagos felület és a hőveszteség között. Az irodalom a lehűlés folyamatát vezetési oldalról, a szilárd testeken belüli hőmérséklet-eloszlás változásának vizsgálatán keresztül tárgyalja. Azonban a teljes hőáramot mind a vezetési oldal, mind az átadási oldal meghatározza. Tehát nem elég csak a vezetési oldalt alaposan vizsgálni, hanem az átadási oldalt is szükséges. Ezért megvizsgáltam az átadási oldalról a hűlés folyamatát, hogy a bevezetőben ismertetett hipotézist alátámasszam.

Ahhoz, hogy függetlenítsem magam a vezetési oldaltól, azzal a feltevessel életem, hogy vezetési oldalon ne legyen a hőterjedéssel szemben termikus ellenállás, azaz legyen a test belső ellenállás nélküli test ( $\lambda = \infty$ ). Ilyen módon ki tudom mutatni azt, hogy milyen hatással van a külső oldal a hűlés folyamatára.

Tehát a kérdés, hogyan változik egy szilárd test hőmérséklete az idővel, ha hidegebb vagy melegebb közegbe (fluidumba) kerül? A probléma megoldásánál felhasznált egyszerűsítő feltételek:

- A szilárd test fajhője ( $c_p$ ) legyen a folyamat közben állandó.
- A szilárd test sűrűsége ( $\rho$ ) legyen állandó.
- A szilárd test legyen belső hőellenállás nélküli test [79]. Ebben az esetben a szilárd test hőmérséklete ( $T_{\text{test}}$ ) a folyamat közben időben változik ( $T_{\text{test}}(\tau)$ ), de a hőmérséklet-eloszlás a test belsejében egy adott időpillanatban gyakorlatilag azonos. A test egészének hőmérséklete egyetlen, időtől függő hőmérséklettel jellemezhető. Ez a hőmérséklet nem függ a helytől, és ugyanakkora a test belsejében mindenhol, mint a felületén ( $T_{\text{test}} = T_w$ ).
- A testet körbevevő fluidum (közeg) hőmérséklete ( $T_f$ ) legyen a folyamat alatt állandó érték.
- A test és a közeg közötti hőátadási tényező ( $\alpha$ ) értéke a folyamat alatt legyen állandó.

Ilyen feltételek mellett, felhasználva a (2.1.5-4) egyenletet, a test és a közeg közötti hőáram:

$$\dot{Q}_a = \frac{\delta Q}{d\tau} = c_p \cdot m \cdot \frac{dT_{\text{test}}}{d\tau}. \quad (3.4-1)$$

Másrészt alkalmazva a (2.1.2-1) egyenletet, a hőátadás alapegyenletét, felírhatjuk, hogy:

$$\dot{Q}_a = c_p \cdot m \cdot \frac{dT_{\text{test}}}{d\tau} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_f),$$

ami a feltételek miatt megegyezik az alábbi egyenlettel:

$$c_p \cdot m \cdot \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_f).$$

ahol  $T_{\text{test}} = T_w = T$ . Átrendezve az egyenletet kapjuk az alábbi differenciálegyenletet:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} \cdot (T - T_f). \quad (3.4-2)$$

Alkalmazva az alábbi egyszerűsítő jelölést:

$$b = \frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m}, \quad (3.4-3)$$

ahol  $b$  a feltételek miatt egy adott testnél konstans. A (3.4-2) differenciálegyenlet az alábbi lesz:

$$\frac{dT}{d\tau} = b \cdot (T - T_f). \quad (3.4-4)$$

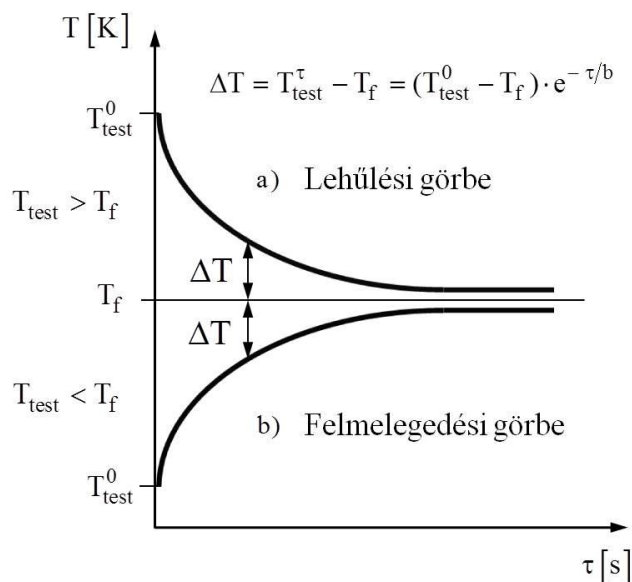
A (3.4-4) differenciálegyenlet megoldása:

$$(T^\tau - T_f) = (T^0 - T_f) \cdot e^{-b \cdot \tau}, \quad (3.4-5)$$

ahol  $T^\tau$  a test hőmérséklete a  $\tau$  időpontban,  $T^0$  pedig a  $\tau = 0$  időponthoz tartozó kezdeti testhőmérséklet. Ez, a (3.4-5) egyenlet, a Newton-féle lehülési törvény.

A Newton-féle lehülési törvényből látszik, hogy a hőmérséklet-különbség exponenciálisan változik az idővel és a hőmérséklet-különbség határértéke nulla, ha  $\tau$  tart  $\infty$ -hez (3.4-1 ábra):

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} T(\tau) = T_f \quad (3.4-6)$$



3.4-1 ábra

A szilárd test hőmérsékletének időbeli változása, ha tőle eltérő hőmérsékletű közegbe kerül (a Newton-féle hőátadási törvény szerint)

Egy szabadban álló, környezeténél melegebb test lehűlésekor a test hőmérsékletének időbeli változását szintén ez az egyenlet adja meg, tehát a hőtároló hőmérséklete is e szerint, exponenciálisan csökken.

Azonban, ha nem egy adott testre írjuk fel a (3.4-4) differenciálegyenletet és a felületet nem tekintem állandónak, akkor

$$b = \frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} \neq \text{konstans}, \quad (3.4-7)$$

mert az A értéke nem konstans. A tömeg lehet konstans és változó is. Amikor a tömeg konstans, akkor ez a sűrűség állandósága miatt, az azonos térfogatú, de különböző alakú (és egyben fajlagos felületű) testek esete. Ha a tömeg változó, akkor az a különböző térfogatú testek esete, amely testek lehetnek azonos alakúak vagy különböző alakúak.

Az előző fejezet számításának eredményeként, a fajlagos felület fontosságának ismeretében tovább vizsgálva a b változót írható, hogy:

$$b = \frac{\alpha \cdot A}{c_p \cdot m} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{A}{V} = b' \cdot \frac{A}{V}, \quad (3.4-8)$$

ahol b' egy új konstans lesz, az A/V pedig nem más, mint a szilárd test fajlagos felülete. A b' az  $\alpha$  hőátadási tényező és az állandó nyomáson vett fajlagos térfogati hőkapacitás hányadosa:

$$b' = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho} = \frac{\alpha}{c_p^{\text{térfogati}}}. \quad (3.4-9)$$

Így felírva a Newton-féle lehűlési törvényt az alábbi új összefüggést kapjuk:

$$(T - T_f) = (T_0 - T_f) \cdot e^{-b' \cdot \frac{A}{V} \cdot \tau}. \quad (3.4-10)$$

A (3.4-10) egyenlet alapján jól látható, hogy a hőmérsékletváltozás exponenciális kitevője, azaz a hőmérséklet változása (a hűlés sebessége), nem csak az időtől (és a vezetés belső ellenállásától), hanem a fajlagos felülettől is függ. **Ez az egyik legfontosabb megállapítása a dolgozatnak.** A (3.4-10) egyenlettel igazoltam a bevezetésben megfogalmazott hipotézisemet.

Tehát azonos térfogatú anyagok esetében biztos, hogy nem a gömb hűlési sebessége a legnagyobb, hiszen annak a legkisebb a fajlagos felülete. A belső és a külső ellenállás együttesen határozza meg a kialakuló hőáramot. Minden esetben az egyes tényezők, a hőmérséklet-vezetési tényező ( $\alpha$ ), a méret (V), a hőátadási tényező ( $\alpha$ ), a fajlagos felület

(A/V), valamint ezek egymáshoz viszonyított mértéke, a termikus ellenállások határozzák meg.

Az azonos alakú testeknél pedig a méret növelésének kettős hatása van

- egyrészt növeli a belső ellenállást, ezzel csökken a hűlés sebessége,
- másrészt csökkenti a fajlagos felületet, ami szintén csökkenti a hűlés sebességét.

A 2.1.1.3 fejezetben leírtakat az alábbiakkal egészítem ki:

1) A félrevezető egyszerűsítésekhez sorolható, hogy az irodalomban fellelhető hőátadási, lehűlési levezetéseknel általában még a tömeget sem tüntetik fel, hanem a műszaki gyakorlatból vett szokás miatt, egyszerűen csak a test hőkapacitásával írják fel az egyenleteket, és mivel egy adott testet vizsgálnak, ezt veszik állandónak:

$$\dot{Q}_a = \frac{\delta Q}{d\tau} = C \cdot \frac{dT_{\text{test}}}{d\tau}, \quad (3.4-1)$$

a fajlagos hőkapacitás és a tömeg meg sem jelenik ilyenkor a további levezetésekben:

$$C = c_p \cdot m. \quad (3.4-11)$$

2) Az átadási modellalkotás során bevezetett dimenzió nélküli számokkal kiküszöbölik a test méretét, amit érthetően bizonyos szempontból előnyként értékelnek [121]. De ezzel egyúttal elrejtik a geometriai méreteket is.

3) Sajnos a hűlést és a melegedést vizsgáló kísérleti munkák, mérések folyamán sem derülhetett ki ez a jelenség, aminek valószínűleg az volt az oka, hogy a vizsgált testek viszonylag kis méretűek voltak, ezért nagy fajlagos felülettel rendelkeztek. A nagy fajlagos felület miatt pedig a felület sebességkorlátozó szerepe nem mutatkozhatott meg, csak a hőátadási tényezőé.

A Fourier-féle differenciálegyenlet lehűlésre/felmelegedésre történő megoldása során az egyértelműségi feltételek között a harmadfajú peremfeltétel nem számol a hőcserét befolyásoló felülettel, csak a hőátadási tényezővel, ami tévedéshez vezet. Ugyanis egy test felületegységére írja fel a mérlegegyenletet [90, 121]:

$$-\lambda \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha \cdot (T_w - T_f). \quad (3.4-12)$$

de ez a mérlegegyenlet csak egy adott testen kialakuló folyamatra igaz és nem jeleníti meg a felületet, mint befolyásoló tényezőt.

### 3.5 A HŐTÁROLÓ JELLEMZÉSE A FAJLAGOS HŐVESZTESÉG CSÖKKENTÉSÉNEK SZEMPONTJÁBÓL

#### *A hőszigetelés új szempontú tervezésének számítási alapjai*

Legtöbbször a hőszigetelés célja a hőveszteség csökkentése. Egy adott rendszert vizsgálva pedig a cél a gazdaságosan elérhető legkisebb fajlagos hőveszteség. Ennek a feladatnak a megoldásához ebben a fejezetben új szempontból vizsgáljuk meg az optimális hőszigetelés kialakítását [15, 16, 17, 18, 19]. Az új szempont a fajlagos felület figyelembe vétele. Ennek fontossága derült ki az előző fejezetekben. A mérettől függő fajlagos felületet a tervezési feladatoknál ez idáig senki nem vette figyelembe. Az alaktól függő fajlagos felületet természetesen eddig is figyelték, és ahol lehetőség volt rá, ott figyelembe is vették. Ezért készítettek pl.  $H/D = 1$  arányú hengeres, termikusan értelemben kevert (termikusan nem rétegzett), só olvadékot tartalmazó hőtárolókat a két hőtartályos naperóművi rendszereknél, ahol a hideg és a meleg tartályok előre eltervezett, meghatározott hőmérsékleten üzemelnek. Ugyanígy előnyként jelentkezik az alaktól függő fajlagos felület csökkenés a folyékony „gázt” tartalmazó nyomás alatti gömbtartályok létesítésénél is. Az ipari tárolóknál ezért alkalmazzák szívesebben a gömb alakú tárolókat a fekvő hengeres tartályoknál.

A dolgozat további részénél is alkalmazom a tárolóra a 3.4 fejezetben leírt öt egyszerűsítő feltételt.

Amint azt előzőleg megállapítottam, egy adott alakú hőtárolónál két módon lehet csökkenteni a fajlagos hőveszteséget:

- az eddig is ismert módon, a hőszigeteléssel, azaz a hőszigetelő anyag termikus ellenállásával és
- az előző fejezetek alapján, a mérettől függő fajlagos felület csökkentésével.

Bizonyos tervezési feladatoknál mindkét hatással számolni kell. A fajlagos hőveszteség csökkentése nem más, mint egy rendszer „hőszigetelésének” komplex módon történő értelmezése.

Az új szempont, a mérettől függő fajlagos felület figyelembe vétele megváltoztatja a tervezés alapjait is. Eddig a tervezések úgy történtek, hogy egy megadott értékre, egy megadott hőtároló kapacitásra terveztek. Legyen a tárolónk pl. 10.000 MJ kapacitású. Igen ám, de ezzel már meg is határoztuk a geometriai méretét is, csak a tároló alakjának eldöntésénél van

választási lehetőség. Ennél az új tervezésnél nem adjuk meg a tároló kapacitását, ez a tervezés eredményeként jelenik majd meg. Csak korlátozó feltételeket adunk meg, ami kijelöli a lehetséges megoldások tartományát. Ezen a tartományon belül pedig tudjuk, hogy végtelen sok megoldás létezik. A korlátozó feltételek természetesen lehetnek méretkorlátozó feltételek is, amelyek kapacitási feltételeknek is felfoghatóak. De ha nem adunk meg egy konkrét méretet (kapacitást), csak egy tartományt, akkor a megoldást a kiválasztási függvény, vagyis a célfüggvény szélsőértéke (általában a gazdaságosság) fogja megadni az optimális méretet, az optimális kapacitást, az optimális telepítési nagyságot. Ki mondja meg előre, hogy mekkora napenergia begyűjtő rendszert telepítsünk és ehhez mekkora hőtárolót pl. a villamosenergia termeléshez? Melyik lesz a gazdaságos létesítés, a gazdaságos egységméret? A számítás nem egyszerű, de megoldható.

Ahhoz, hogy a különböző méretű és szigetelésű tárolók közül majd kiválaszthassuk, hogy egy adott feladatnál melyik lesz a legjobb, a különböző tárolók használhatóságát kell összehasonlítani. Ezért ebben a fejezetben a fajlagos hőveszteség szempontjából jellemezzük a hőtárolót és számítási módszert dolgozunk ki egy adott méretű hőtároló alkalmazhatóságának meghatározására [20, 22].

### **3.5.1 A hőtároló és hőszigetelésének jellemzése**

#### ***3.5.1.1 A tároló alap- és üzemviteli jellemzőinek meghatározása***

Az azonos anyagból készült tárolókat hőveszteség szempontjából csak két alapjellemző különbözteti meg egymástól:

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

Ehhez már csak az ár jön, ami ezekből számítható. De az ár nem műszaki jellemző. Ezek az alapjellemzők lesznek a hőtároló „egyedjellemzői” a GA során.

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. a meteorológiai, földrajzi adottságok).

Az üzemviteli jellemzők a következők:

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

Az üzemviteli jellemzők tulajdonképpen azok a feltételek, amelyek között és szerint a tárolót használni szeretnénk. Ezek meghatározásában a felhasználási cél is fontos szerepet játszik.

### ***3.5.1.2 A tároló használati jellemzőinek meghatározása az alap- és az üzemviteli jellemzőkből***

Ha van egy adott alapjellemzőkkel ( $x_1$  és  $x_2$ ) meghatározott tárolónk, akkor arról el kell tudnunk dönteni, hogy az adott üzemviteli jellemzők, feltételek között mire is alkalmas.

Ha már van egy adott méretű tárolónk, akkor arra a használat során már csak két dolog jellemző:

- mennyit tudok beletölteni és
- mennyit tudok kivenni belőle.

A kettő különbsége a veszteség. Nevezzük ezeket jellemzőket a tároló használati jellemzőinek.

Egy adott tároló használati jellemzői az üzemviteli jellemzőktől függenek. Különböző feltételek között az azonos alapjellemzőjű tárolóknak más-más értékű használati jellemzői lesznek!

Meghatározandó használati jellemzők:

- a töltés,
- az ürítés és
- a veszteség (hatásfok).

Könnyű belátni, hogy egy tárolót a maximális kapacitását kihasználva érdemes üzemeltetni. Azaz ki kell használni teljesen a megengedett maximális és a megengedett minimális hőmérsékletek közötti hőmérsékleti tartományt. Természetesen lehet kisebb hőmérsékleti tartományban is üzemeltetni egy tárolót, mint amire képes, de az többnyire gazdaságtalanabb.

Annak eredményeként, hogy a hőmérséklet emelkedésével a hőszigetelő réteg termikus ellenállása csökken, előállhat olyan helyzet, amikor egy hőmérséklet felett már csak nagy költséggel tudom tovább tölteni a tárolót, mert a betöltött hő nagyobb és egyre nagyobb része távozik veszteségként és csak egyre kisebb része marad a tárolóban. Ez produkálhat olyan esetet, amikor gazdaságosabb egy nagy tárolót alacsonyabb hőfokon működtetni, mert a magasabb hőfokon a veszteség már olyan nagy arányú és nagyságú, hogy a hőveszteség ára nagyobb, mint a nagyobb tárolóval járó plusz beruházási költség. Ez azt a további kérdést is feszegeti, hogy valójában mi a tároló maximális megengedett hőmérséklete? Az, amit el tudunk érni és a tároló károsodás nélkül elvisel, vagy az, ahol még a betöltött hőmennyiség nagyobb része a tárolóban tud maradni és csak a kisebb része távozik veszteségként? A tárolóknak is van tehát jelleggörbéjük, amely megmutatja, hogy egy adott hőmérsékleti szinten milyen hatásokkal dolgozik. A területi korlátok miatt ennek részletes bemutatásával és elemzésével itt nem foglalkozunk. Természetesen ezt az esetet is kezelniük kell és kezeljük is. A problémát a költségérzékeny optimum számítás fogja megoldani (3.6 fejezet), kivédeni! Az megadja, mekkora tárolót kell építeni.

Ismerve, a tároló két alapjellemezőjét ( $x_1$ -et és  $x_2$ -t) és az üzemeltetési jellemzőket, ebből kell meghatározni a töltési és ürítési jellemzőket, valamint a veszteséget, az adott körülményekre vonatkozó használati jellemzőket és végül majd kiválasztani az optimálisat. Nem egyszerű feladat. Ugyanis nem arról van szó, hogy kiszámítjuk mennyi az egyszeri maximális kapacitása a tárolónak, és mennyi a maximálisan feltöltött tároló hővesztesége egy adott szigetelőréteg vastagságnál. Majd változtatjuk a szigetelőréteg vastagságát és nézzük a szigetelőréteg, valamint a hőveszteség árát. Ahol a két árgörbéből képzett közös, eredő görbe minimumhelye van, az lesz a szigetelőréteg vastagságának az optima. Eddig mindenki így tervezett. Ebben az esetben a szigetelőréteg vastagságának optimalása történik az adott felületű, méretű hőtárolóra. Ez a mi komplex hőszigetelésünknek az egyszerűsített esete, amikor probléma megoldásánál kimarad a fajlagos felület változása, az egyik fajlagos hőveszteség csökkentő módszer, tehát ekkor a fajlagos felületet állandóként kezeljük. Leegyszerűsítettük a problémát egyrészt hőszigetelő réteg vastagság optimalási feladattá, másrészt nem vettük figyelembe a ciklusidő alatti üzemeltetési jellemzőket és azok következményeit sem. A jelen optimalási feladatnál mivel a méret változó, emiatt a felület és a fajlagos felület is tulajdonképpen változó ( $x_1$  és  $x_2$  fogja végül meghatározni). Nemcsak az  $x_2$  értéke (a hőszigetelő réteg vastagsága) változó, hanem az  $x_1$  értéke is (amit hőszigetelnünk kell). Nem egy maximális kapacitásra, mint statikus hőmérsékleti állapotra, vagy akár

figyelembe véve a működést is, változó hőmérsékleti viszonyokra számítunk egy adott méretű tárolóra egy optimális szigetelőréteg vastagságot, hanem a különböző méretű és ezzel különböző fajlagos felületű és szigetelésű tárolók közül fogjuk végül kiválasztani a leggazdaságosabbat. A számítások során pedig figyelembe vesszük a komplex működést is, a tároló időciklusát is, amely alatt a töltés és az ürítés is különböző, ennek eredményeként a tároló belső hőmérséklete is különböző, ezért a változó belső hőmérséklet következményeit, a szigetelőanyag szigetelőképességének változását is figyelembe vesszük. A külső, környezeti hőmérséklet időbeli változása pedig szintén hatással van a veszteséges hőáram mértékére. Tehát a tároló méretezése sokkal bonyolultabb, mint az eddig ismert hőszigetelési méretezések.

### **Az üzemi jellemzők és az egyszerűsítő feltételek**

1) Első közelítésben azért, hogy észrevehessük a tárolóra jellemző fő tendenciákat, a tároló oldalait termikusan egyformának tekintjük az egyes időszakokban.

A veszteséget okozó hőáramot a tároló minden oldalára - az aljára is - a felső részre kapott számítási eredmények adják. Bár a tároló alja más felépítésű, mint az oldala, vagy a teteje, de a levegő átlagos környezeti hőmérséklete és annak alakulása nagyon hasonló a talaj 1 m-es mélységében mért hőmérsékleti értékeivel.

A tároló aljának eltérő felépítését csak a költségeknél vesszük figyelembe. Az alapozást a talaj jellemzői, a talaj teherbíró képessége nagymértékben befolyásolja. Példánkban a tárolónak beton síkalapja van. A síkalapot a jó hőszigetelő képesség biztosítása miatt lehet könnyűbetonból is készíteni, ügyelve a szükséges teherbírásra.

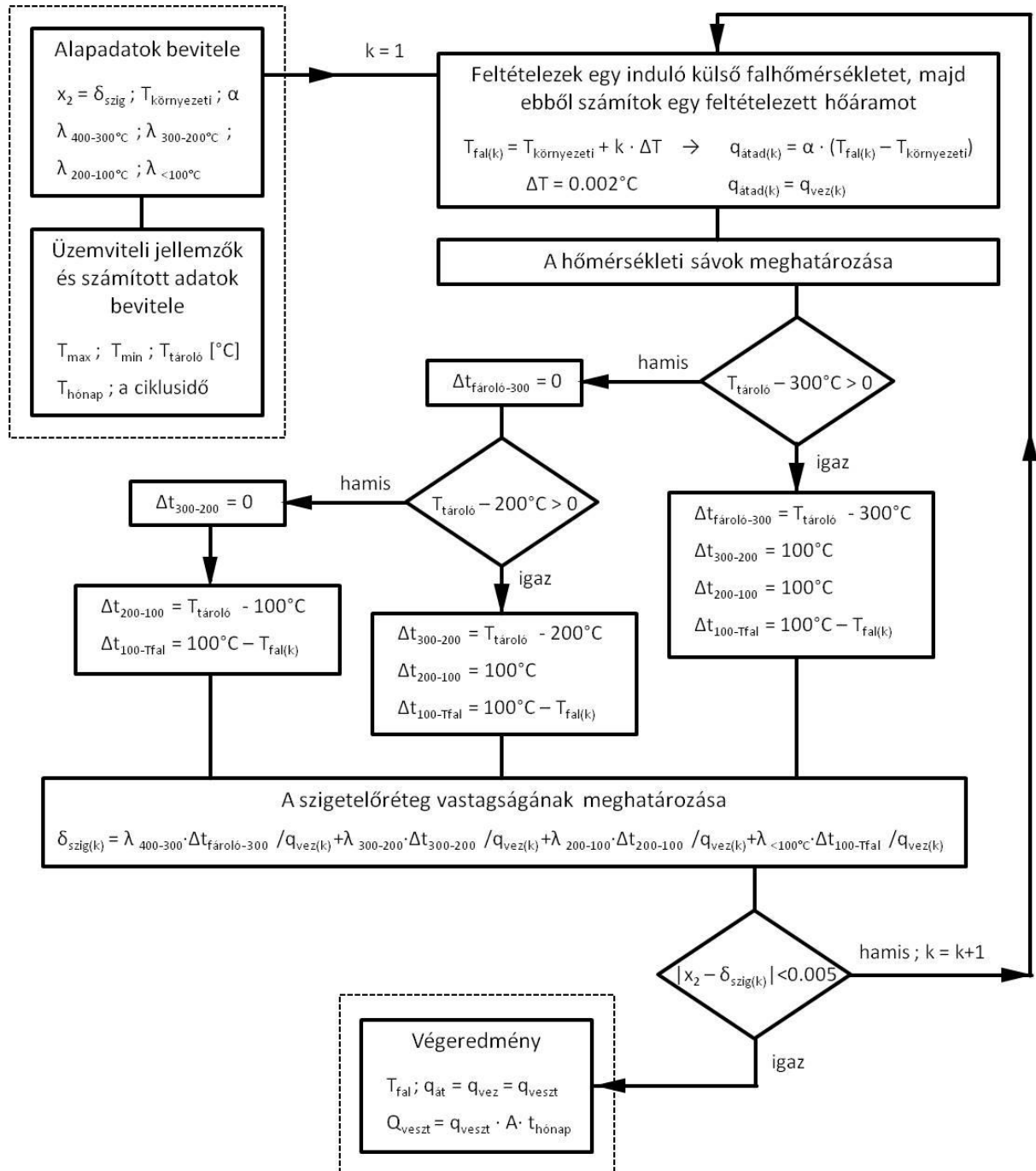
2) További egyszerűsítés, hogy a szigetelőréteget védő külső téglafalazatnak és a tetőnek a termikus hatását elhanyagoljuk. Ezt is csak a költségeknél vesszük majd figyelembe járulékos tételként.

Tehát az előbbi feltételezésünk szerint, csak a kocka alakú tároló és annak minden oldalán a termikusan azonos szigetelőréteg van. Az oldalak termikus ellenállásai, amelyek a tároló belső- és a külső levegő hőmérsékletének a függvényében változóak, de egymással mindig azonosak.

3) További egyszerűsítő feltétel, hogy a tárolón belül a hőátadás és a hővezetés sebessége nem korlátozza az energiaátadást, azaz az energia bevitele és kinyerése veszteség nélkül pillanatszerűen lejátszódó folyamat. Végül nem szabad megfeledkezni a 3.4 fejezetben leírt 5 egyszerűsítő feltételről sem.

### A használati jellemzők meghatározása az alap- és üzemviteli jellemzőkből

Ahhoz, hogy a hőveszteséget meghatározzuk, ismernünk kell a hőszigetelő réteg külső falhőmérsékletét. De ezt az értéket nem ismerjük és csak numerikus módszerrel határozható meg (3.5.1.2-1. folyamatábra).



3.5.1.2-1 folyamatábra

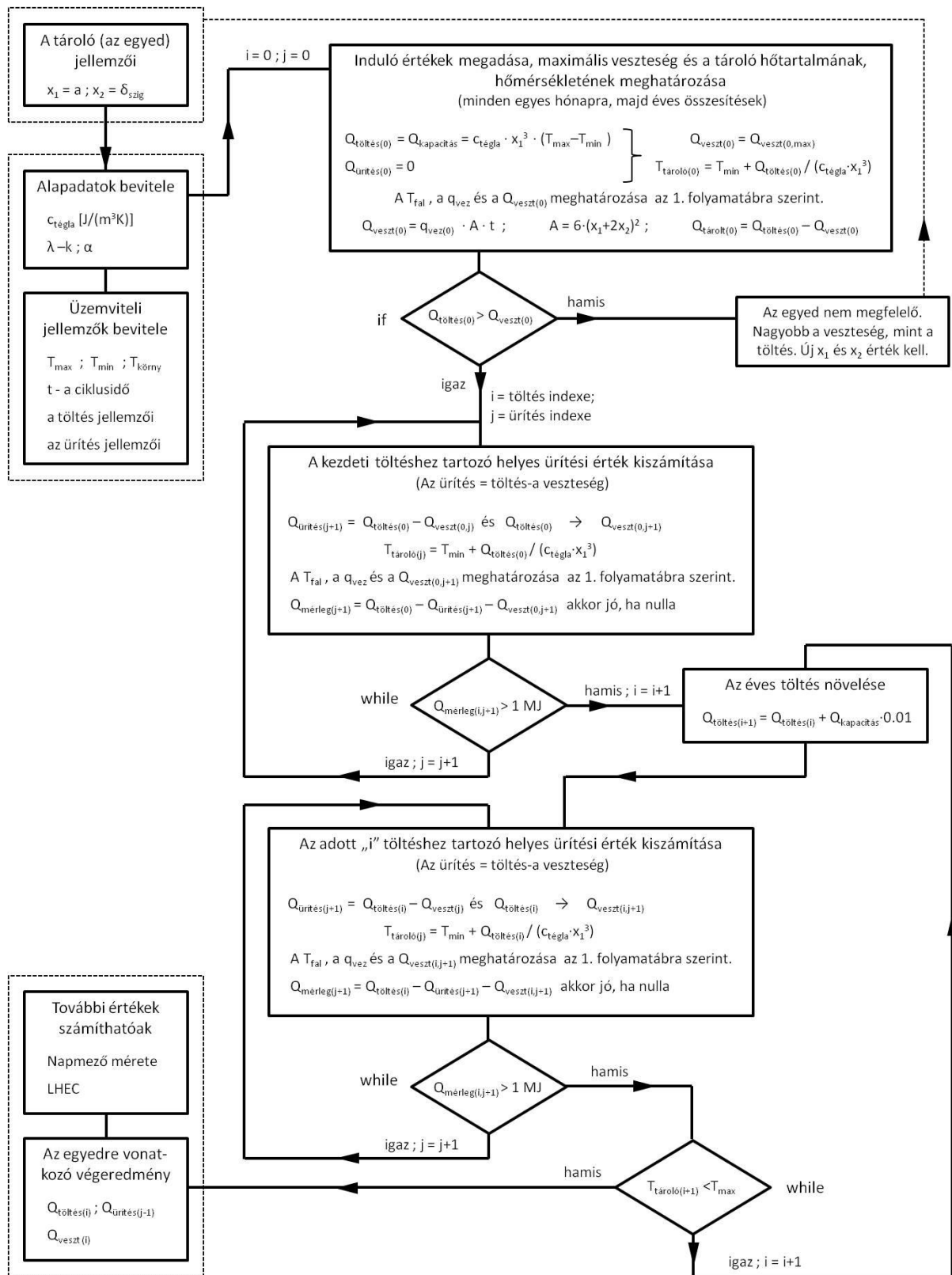
A külső falhőmérséklet és a hőveszteség meghatározása

Ehhez a számításhoz ismerni kell a tároló belső hőmérsékletét és az arra az időpontra

vonatkozó külső, környezeti levegő hőmérsékletét (üzemviteli jellemzők). Feltételezünk egy külső falhőmérsékletet, és felhasználva az építészek által a külső levegővel érintkező építményekre megadott és szabványban (MSZ 04-140-02) rögzített hőátadási tényező  $\alpha$  értékét, kiszámolunk egy feltételezett átadási hőáramot. Az építmény és a levegő közötti átadási hőáram egyenlő a szigetelőrétegben fellépő vezetési hőárammal. A feltételezett vezetési hőáramból, figyelembe véve a hőszigetelő anyag hővezetési tényezőjének hőmérséklet függését is, kiszámolható egy szigetelőréteg vastagság. Ezt a kiszámított szigetelőréteg vastagságot összehasonlítjuk a tényleges szigetelőanyag vastagsággal. Amíg a két érték különbözik, változtatjuk (léptetjük) a külső falhőmérsékletet. Amikor a számított szigetelőanyag vastagsága megegyezik a tényleges rétegvastagsággal, megkaptuk a helyes hőáramot.

A tároló belső hőmérsékletét a töltésből és az ürítésből lehet kiszámítani. De mi nem ismerjük a tárolónak ezeket a használati jellemzőit sem, mivel ezek nem csak az alapjellelmezőktől, hanem az üzemviteli jellemzőktől is függnek. Tehát meg kell határozunk ezeket a jellemzőket is.

A számítászt szintén csak numerikusan lehet elvégezni (3.5.1.2-2. folyamatábra). A számításnál a tároló induló töltésének a tároló kapacitásával egyenlő töltést választunk. Ennyi biztosan befér a tárolóba a felső hőmérsékleti érték túllépése nélkül. A töltést természetesen nem egyszerre végezzük el a ciklusidő elején, hanem az üzemviteli jellemzőkben meghatározott menetrend szerint. Az induló elvételt nullának tekintjük. Az induló töltésből és a nullának vett ürítésből meghatározható az induló töltéshez tartozó maximális veszteség. A veszteség a ciklusidő alatt folyamatosan fellép és folyamatosan befolyásolja a tároló belső hőmérsékletének időbeli alakulását. A ciklusidőn belüli időszakokra kiszámított veszteségek összege adja a ciklusidőre vonatkozó teljes veszteséget. Megvizsgálva az induló töltés és a maximális veszteség közötti különbséget, két eset lehet. Ha a teljes ciklusidőre vonatkozó töltés nagyobb, mint a teljes veszteség, akkor van lehetőség ürítésre. Ellenkező esetben a tároló nem megfelelő és új tároló méretet kell választani. Ha a tároló alkalmas, akkor töltés és a veszteség közötti különbséget tekintjük a következő lépés ürítési értékének. Újra kiszámoljuk a veszteséget, most már ürítést is figyelembe véve oly módon, ahogy az ürítést az üzemviteli jellemzők meghatározzák. Az ürítés csökkenti a tároló hőmérsékletét és ezzel csökkenti az adott töltésre vonatkozó veszteséget is. Amikor meghatároztuk a veszteséget, akkor hőmérleget tudunk számítani. Ha az ürítés és a veszteség összege nem éri el a töltés összegét, akkor még növelni tudjuk az ürítést és ezzel az új ürítési értékkel újra számoljuk a



3.5.1.2-2 folyamatábra

A hőtároló használati jellemzőinek meghatározása

veszteséget. Ezt mindaddig végezzük, amíg az ürítés és a veszteség összege el nem éri a töltés értékét. Ha elértük, akkor van lehetőségünk a töltés növelésére és az előbb említett módszerrel kiszámítjuk az ehhez a töltéshez tartozó ürítés és veszteség értékeket. Amikor megkaptuk az adott töltésre vonatkozó helyes ürítést és veszteséget, akkor vizsgálatot kell végeznünk arra vonatkozóan, hogy a tároló belső hőmérsékletére előírt maximális hőmérsékleti korlátot a ciklusidő alatti minden időszakban tartani tudtuk-e. Ha igen, akkor tovább növelhetjük a töltést és az előzőekben leírtak szerint meghatározzuk a hozzá tartozó helyes ürítési és veszteség értékeket. Ha elérjük a tároló belső hőmérsékleti korlátját valamelyik időszakban, akkor tovább már nem növelhetjük a töltést. A számítást befejeztük, meghatároztuk a tároló használati jellemzőit: a töltést, az ürítést és a veszteséget. Ezek a használati jellemzők az üzemviteli jellemzők figyelembevételével a tároló teljes kihasználtságára, a tárolóra meghatározott hőmérsékleti tartomány teljes kihasználtságára vonatkoznak.

A tárolók hőtechnikai számításaival mérlegeivel (töltés, ürítés, veszteség) sokan foglalkoznak pl.: [155, 156]. De mindig csak egy adott méretet vizsgálnak. Az a megközelítés, amelyet itt alkalmaztam, ismereteim szerint egyetlen irodalmi forrásban sem szerepel.

### **3.5.2 Számítási mintapélda megadott alap és üzemviteli jellemzőkkel rendelkező tároló használati jellemzőinek meghatározására**

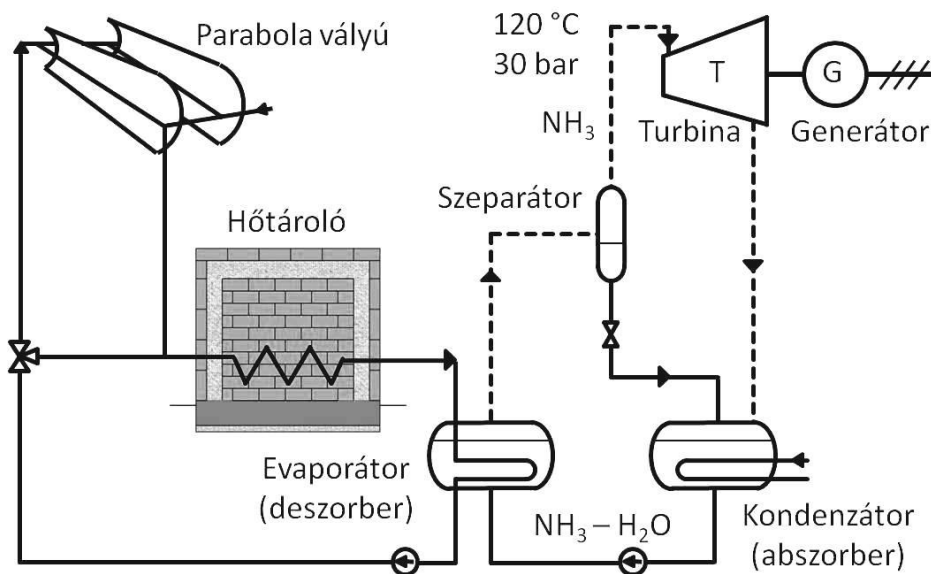
Egy feltételezett alkalmazásra (használatra), amelynek elvi technológiai sémáját a 3.5.2-1 ábra mutatja be, kiszámítottam különböző méretű hőtárolók használati jellemzőit az előző, 3.5.1 fejezetben leírtak szerint [20, 21, 71].

A számítások elvégzésére MATLAB programcsomagot készítettem, amely a 3.5.1.2-1 és a 3.5.1.2-2 folyamatábra szerint működik.

**A feltételezett üzemvitel** (a hőtároló képzeletbeli használati módja) a következő:

#### **Energia bevitel (töltés):**

Egész éven át folyamatos, a magyarországi direkt sugárzási (napsütési) viszonyok (napsütéses órák száma, környezeti hőmérséklet) szerint. Tehát úgy folyamatos az energia bevitel (töltés), hogy csak a napsütéses órákban növeljük a tároló hőtartalmát, azonban amikor nem „süt” a nap, akkor értelemszerűen energia bevitel (töltés) nincs.



3.5.2-1 ábra

Hőtárolóval ellátott, koncentrált napenergiával folyamatosan termelő termokémiai erőmű egyszerűsített elvi sémája

### Hőkinyerés (ürítés):

Az év nyolc hónapjában (márciustól október végéig) a tárolóból folyamatos hőkiadás történik (pl. elektromos áram termelés céljára). A téli hónapokban (november, december, január, február) a tárolóból ürítés nincs, energiakiadás nem történik.

### Bemenő adatok:

A tároló kocka alakú, magnezit téglából épült és ásványgyapot hőszigetelés borítja.

*alapjellemzők:*  $x_1$  és  $x_2$  - a táblázat szerint

*üzemviteli jellemzők:*

- a tároló max. hőmérséklete: 400 °C, min. hőmérséklete: 130 °C,  $\Delta T_{\max} = 270$  °C;
- napsütéses órák száma az egyes hónapokban (januártól decemberig):  
[57, 83, 136, 187, 253, 267, 297, 278, 202, 139, 63, 40];
- napsütéses órákban a direkt sugárzás átlagteljesítménye: 400 W/m<sup>2</sup>;
- a külső átlaghőmérséklet az egyes hónapokban (januártól decemberig) [°C]:  
[0, 2, 6, 12, 17, 20, 22, 21, 17, 11, 6, 2];
- napok száma az egyes hónapokban: [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
- ürítés: 8 hónapon keresztül (márciustól október végéig) havi egyenletes mértékű;
- ciklusidő 1 év és novembertől október végéig tart (október végén ürül ki a tároló és február végéig nincs hőkiadás);

- magnezit téglá térfogati hőkapacitása:  $3,54 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ ;
- ásványgyapot hővezetési tényezője  $\lambda$ :

400 – 301 °C	1,000 W/(mK)
300 – 201 °C	0,070 W/(mK)
200 – 101 °C	0,049 W/(mK)
$\leq 100 \text{ °C}$	0,038 W/(mK)

- a környezet felé a hőátadási tényező  $\alpha$ :  $24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

### Feladat:

Számítsuk ki a fent megadott bemenő adatok és üzemviteli jellemzők alapján az alábbi méretű (alapjellemezőjű), kocka alakú hőtárolók használati jellemzőit:

A tároló élhosszúsága $x_1$ [m]	25		30		40		50	
A szigetelőréteg vastagsága $x_2$ [m]	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
A tároló élhosszúsága $x_1$ [m]	60		70		80		90	
A szigetelőréteg vastagsága $x_2$ [m]	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4

### Eredmények:

Az egyes tároló méretekhez tartozó használati jellemzők (a kiszámított eredmények) és egyéb járulékos számítási eredmények a 3.5.2-1 táblázatban találhatóak.

### 3.5.3 Következtetések

Ebben a fejezetben kidolgoztam a megadott méretű tárolók használati jellemzőinek számítási módszerét. A számítási folyamatból látszik, hogy az azonos felépítésű és méretű tárolók az üzemeltetési jellemzőiktől függően, amelyet a töltés és az ürítés jellemez, különböző használati tulajdonságokat mutatnak.

Napenergia hasznosítás esetén a tároló töltését az adott földrajzi helyzetre vonatkozó napsütéses viszonyok határozzák meg. Mivel ez földrajzi helytől függően változó, ezért a helytől függően már minden a napenergia hasznosításban működő azonos méretű és felépítésű tároló is más-más használati jellemzővel fog rendelkezni.

Ugyanez vonatkozik az ürítési lehetőségekre is. Mivel a földrajzi elhelyezkedéstől függően a környezeti hőmérséklet is más, a veszteséget meghatározó külső hőmérséklet is a létesítési helytől függ. A veszteség pedig befolyásolja az ürítési lehetőségeket.

Alapjellemezők:	$x_1$ [m]	25		30		40		50	
	$x_2$ [m]	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
	$Q_{\text{kapacitás}}$ [PJ]	14,9		25,8		61,2		119,5	
Használati jellemzők:									
	$Q_{\text{töltés}} = Q_{\text{be}}$ [PJ]	117,8	142,6	238,7	240,0	599,5	550,5	1129,0	1057,4
	$Q_{\text{ürítés}} = Q_{\text{ki}}$ [PJ]	67,9	118,8	166,1	208,1	479,0	498,6	957,4	979,7
	$Q_{\text{veszteség}}$ [PJ]	49,9	23,9	72,6	31,9	120,5	52,0	171,6	77,6
	hatásfok $\eta$ [%]	57,7	83,3	69,6	86,7	79,9	90,6	84,8	92,7
	teljesítmény $P_{\text{ürítés}}$ [MW <sub>th</sub> ]	3,2	5,6	7,8	9,8	22,6	23,6	45,2	46,3
	napmező mérete [m x m]	202 x 202	222 x 222	288 x 288	288 x 288	456 x 456	437 x 437	626 x 626	606 x 606
Alapjellemezők									
	$x_1$ [m]	60		70		80		90	
	$x_2$ [m]	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
	$Q_{\text{kapacitás}}$ [PJ]	206,5		327,8		489,4		696,8	
Használati jellemzők:									
	$Q_{\text{töltés}} = Q_{\text{be}}$ [PJ]	2012,9	1858,1	3114,5	2901,4	4575,6	4306,5	6410,4	6096,8
	$Q_{\text{ürítés}} = Q_{\text{ki}}$ [PJ]	1622,0	1689,7	2614,7	2679,4	3948,4	4021,2	5642,5	5740,7
	$Q_{\text{veszteség}}$ [PJ]	391,0	168,4	499,8	222,0	627,2	285,3	767,9	356,1
	hatásfok $\eta$ [%]	80,6	90,9	84,0	92,4	86,3	93,4	88,0	94,2
	teljesítmény $P_{\text{ürítés}}$ [MW <sub>th</sub> ]	76,6	79,8	123,5	126,6	186,5	190,0	266,6	271,2
	napmező mérete [m x m]	836 x 836	803 x 803	1039 x 1039	1003 x 1003	1260 x 1260	1222 x 1222	1491 x 1491	1454 x 1454

3.5.2-1 táblázat

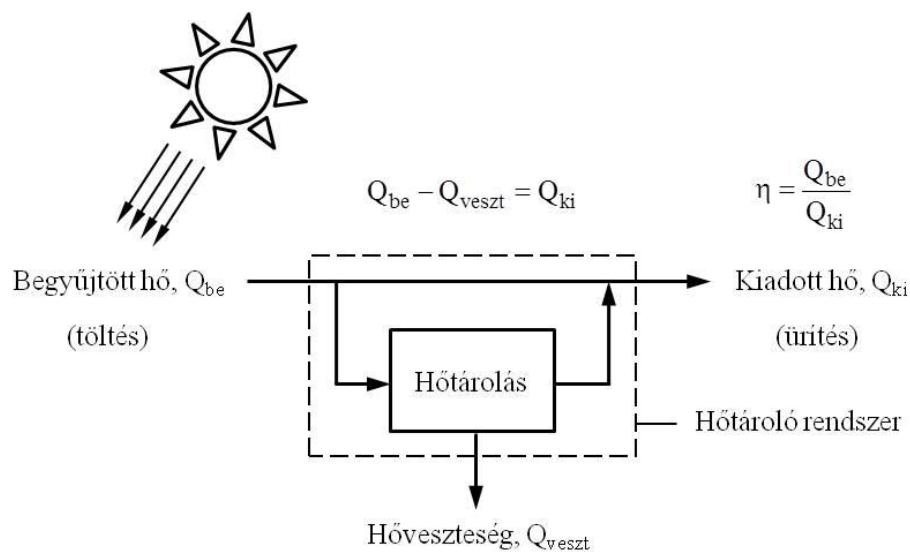
Különböző méretű hőtárolók megadott üzemviteli jellemzők melletti használati jellemzői és egyéb mutatói

Ha azonos felhasználói (ürítési) igényem van (pl. egy adott hőszolgáltatás) két különböző éghajlatú földrajzi helyen, annak kielégítéséhez biztos, hogy más-más méretű és hőszigetelésű tároló lesz majd alkalmas és a napmező méretek is mások lesznek. Más Németországban, más Spanyolországban és más lesz Magyarországon is, mivel mások a napsugárzási viszonyok és a környezeti hőmérsékletek. Nem lehet egyszerűen lemásolni, hogy valahol már építettek valamit és az nekünk is jó lesz. Ki kell számolni az adott helyre vonatkozó használati jellemzőket!

A 3.5.2-1 táblázatban összefoglalt eredményekből látszik, hogy már a 25 m élhosszúságú tárolónál a 60 cm-es szigetelőréteg vastagság mellett elértük a 80 % feletti energetikai

hatásfokot. Ez az energetikai hatásfok a begyűjtött és a hasznosított energia arányát adja meg (3.5.3-1 ábra). Növelve a tároló méretét ugyanolyan vastagságú hőszigetelés mellett javul a hatásfok. 40 m-es tárolónál 60 cm-es szigetelőréteg vastagsággal már jobb, mint 90 % a hatásfok. Az is látszik, hogy tartani tudom az energetikai hatásfokot, ha növelem a méretet és egyúttal csökkentem a szigetelőréteg vastagságát.

További információ, hogy a tároló méretének növelésével, amennyiben persze, ha a tárolót maximálisan kihasználjuk, egyre nagyobb termikus teljesítményeket kapunk. Ez logikus, de a 100 MW-os tartomány elérése (folyamatos teljesítmény leadás a nyolc hónapon keresztül!) mindenképpen figyelemreméltó.



3.5.3-1 ábra

A számított energetikai hatásfok bemutatása

### 3.6 AZ ÚJ SZEMPONTÚ TERVEZÉSEN ALAPULÓ OPTIMÁLIS MÉRETEZÉS

Az előző fejezetben jellemeztem a hőtárolót, és számítási módszert dolgoztam ki arra, hogy megtudjam, egy megadott üzemvitel mellett a hőtároló milyen használati jellemzőkkel rendelkezik. Ebben a fejezetben továbblépek, és számítási módszert mutatok be egy adott üzemvitel mellett működő szilárd hőtároló optimális méretének meghatározására, figyelembe véve a fajlagos hővesztés csökkentés mindkét módszerét [20, 21, 22, 23].

Egy tervezési érték csak valamilyen szempontból lehet optimális. Ezért az első feladat, hogy meghatározzuk azt a szempontot, azt a célfüggvényt, ami szerint megkeressük az optimális megoldást. Termelő beruházásoknál a legfőbb szempont a gazdaságosság. Ezért mi is ezt vesszük alapul [34, 40, 175].

### 3.6.1 A célfüggvény és a korlátozó feltételek megfogalmazása

#### A célfüggvény

Az energetikában, a gazdasági szakemberek, a különböző technológiák gazdasági összehasonlítására alkalmaznak egy számítási módszert (angolul „levelized cost method”), ami megmondja a villamosenergia önköltségi árát. Ezt az önköltségi árat, amelyet az angol nyelvű szakirodalomban „levelized cost of energy” LCOE vagy „levelized energy cost” LEC neveznek, az alábbiak szerint számítjuk [75, 153, 195]:

$$\text{LCOE vagy LEC} = \frac{\text{az élettartam alatti összes költség a beruházási költséggel együtt}}{\text{az élettartam alatt kinyert összes villamos energia}},$$
$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_{\text{beruházási},t} + C_{\text{M\&K},t} + C_{\text{biztosítási},t} + C_{\text{tüzelőanyag},t} + C_{\text{CO}_2,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (3.6.1-1)$$

ahol: LCOE – a kiadott villamosenergia önköltségi ára [Ft/kWh] a tervezett élettartamra számítva,

$n$  – az élettartam [év],

$C_{\text{beruházási}}$  – a beruházási költség [Ft],

$C_{\text{M\&K}}$  – a működési és karbantartási költség [Ft],

$C_{\text{biztosítási}}$  – az éves biztosítási költség [Ft],

$C_{\text{tüzelőanyag}}$  – az éves tüzelőanyag költség [Ft],

$C_{\text{CO}_2}$  – a széndioxid kibocsátási kvóta ára [Ft],

$E$  – a megtermelt villamosenergia [kWh],

a „ $t$ ” index jelzi, hogy az adott költséget, értéket a teljes élettartamra kiterjesztjük,

$r$  – a diszkontálási ráta.

Az  $r$  diszkontálási ráta gyakorlatilag a banki kamatnak [%] megfelelő hányad, amit akkor kapnánk, ha nem a beruházásba fektetnénk a pénzt, hanem egyszerűen csak a bankba tennénk. A működési időtartam alatt ugyanis ezt a banki kamatot is ki kell termelni.

Ezt a (3.6.1-1) képletet adaptáljuk oly módon, hogy nem a megtermelt villamosenergiát, hanem a begyűjtött energiából a tároló által biztosított lehetőséggel felhasznált (kiadott) termikus energiát vesszük energia produktumnak és így alkalmazzuk az önköltség képletet a

mi esetünkre:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_{\text{beruházási},t} + C_{\text{M\&K},t} + C_{\text{biztosítási},t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{\text{ki},t}}{(1+r)^t}}, \quad (3.6.1-2)$$

$$C_{\text{beruházási}} = C_{\text{terület}} + C_{\text{napenergia kollektor}} + C_{\text{tároló}}, \quad (3.6.1-3)$$

ahol: LCOE – a kiadott hőenergia önköltségi ára [Ft/MJ] a tervezett élettartamra számítva,

$C_{\text{terület}}$  – a földterület ára [Ft],

$C_{\text{napenergia kollektor}}$  – itt a parabola vályúk komplett telepítésének az ára, HSzK-el együtt (de lehet más kollektor is) [Ft],

$C_{\text{tároló}}$  – a hőtároló ára [Ft], és

$Q_{\text{ki}}$  – a begyűjtött energiából felhasznált energia mennyisége [PJ].

Jól látható, hogy az LCOE képlet számlálójából hiányzik a tüzelőanyag költsége, mert itt nincs tüzelőanyag, továbbá hiányzik a széndioxid kvóta ára is, mert széndioxid kibocsátás sem történik. Sőt ha az új napenergia hasznosító beruházás széndioxid kvótás energia termelést vált ki, akkor az értékesített kvóta ára költségcsökkentő tényezőként is jelentkezhet.

Az LCOE képlet lesz a célfüggvényünk, az előállított energia önköltségi ára. Feladatunk ennek a minimumát megkeresni. Megkeresni azt a hőtárolót, amely a megadott üzemeltetési jellemzők között a legkedvezőbb önköltséggel termeli ki a hőenergiát.

Most válik érthetővé miért kellett a 3.5 fejezetben meghatározni és értelmezni a tároló jellemzőit és kidolgozni a számításukat. Ezek nélkül nem tudjuk az LCOE célfüggvényünket kiszámolni, mert a napmező méretét és a hozzá tartozó beruházási költséget csak a töltésből lehet visszaszámolni, ugyanígy az LCOE képlet nevezőjében szereplő üritési értékre is szükségünk van. Ha nem tudjuk meghatározni a különböző alapjellemezőjű hőtárolók használati jellemzőit, és ezekből az LCOE értékeit, akkor kiválasztani sem tudjuk a legjobb LCOE értékű hőtárolót.

### *Korlátozási feltételek*

Korlátozási feltételt egyrészt megadhatunk az alapjellemezőkre vonatkozóan, másrészt az üzemeltetési jellemzőkre vonatkozóan is. A számítási példa helyes értelmezése miatt érdemes ezeket különválasztani.

Az alapjellelmezőkre megadott korlátozási feltételek a méretkorlátozási feltételek. Tehát  $x_1$ -re és  $x_2$ -re vonatkozó feltételek. Ha nem konkrét méreteket, hanem méret tartományokat adok meg, akkor a számítás alatt a fajlagos felület változását is figyelembe tudom venni. Ha a tárolóra konkrét méretet írok elő és csak a hőszigetelő réteg vastagságát engedem változni, akkor leegyszerűsítettem a feladatot egy egyszerű hőszigetelőréteg-vastagság optimalizációs feladattá. Méretkorlátozási feltételekhez kell sorolni minden olyan feltételt is, ami méretkorlátozási feltételre visszavezethető, pl. megadom a tároló maximális kapacitását vagy a külső falfelület maximális megengedett hőmérsékletét.

Az üzemviteli jellemzőkre megadott korlátozási feltételek a töltéssel és az ürítéssel függenek össze. Gyakorlatilag minden olyan feltétel ide tartozik, ami nem méretkorlátozási feltétel. Ilyen pl. a tároló hőmérsékleti korlátjai.

### **3.6.2 A számítás és az optimális eredmények**

Az optimális érték meghatározásához a 2.3 pontban bemutatott genetikus algoritmust (GA-t) választottam. A számítások gyakorlati kivitelezéséhez felhasználtam a [142] irodalomban ismertetett és ahhoz CD mellékletben csatolt genetikus algoritmus alapján számoló optimalizációs programcsomagot. Ezt egy kész segédeszközként kezeltem. Ehhez a készen kapott optimalizációs eszközhöz, optimalizációs programcsomaghoz hozzáillesztettem a 3.5.2 fejezetben használt saját magam készített programcsomagot és a 3.6.1 fejezetben ismertetett és kiválasztott célfüggvényt, majd kialakítottam a korlátozási feltételek és a bemenő adatok felvitelének lehetőségét. Az így elkészült komplex programcsomag már alkalmas volt arra, hogy a hőtároló méretének optimalizálását a fajlagos felület figyelembevételével együtt elvégezzem.

#### **Feladat:**

Határozzuk meg a 3.5.2 fejezetben ismertetett rendszerhez tartozó henger alakú ( $H/D = 1$ ) tároló költségtakarékos optimalizációs méretét az előállított energia önköltség függvénye alapján. Továbbá adjuk meg az optimalizációs mérethez tartozó napmező méretét, a rendszer energetikai hatásfokát és teljesítményét.

Az optimalizációs érték számításánál a létesítményre 30 éves tervezett élettartamot vegyünk figyelembe, valamint a hőtároló létesítmény mérete (átmérő illetve magasság) építészeti okok miatt a 40 m-t ne haladja meg. Az ásványgyapot hőszigetelés vastagsága 0,3 – 1,0 m között legyen.

### **Az optimális érték meghatározásához szükséges bemenő adatok:**

A 3.5.2 fejezetben megadott töltési, ürítési jellemzők és bemenő adatok változatlanok. A célfüggvényhez (a költségfüggvényhez) szükséges további adatok pedig a következők:

$$C_{\text{terület}} = 60 \text{ Ft/m}^2 \text{ (elhanyagolható a parabola vályúhoz képest);}$$

$$C_{\text{parabola vályú}} = 57000 \text{ Ft/m}^2;$$

$$C_{\text{alapozás, beton+munkadíj}} = 30000 \text{ Ft/m}^3 \text{ – a hőtároló alapjának becsült fajlagos költsége;}$$

$$p_{\text{magnezit tégl}} = 21000 \text{ Ft/1000 kg, } \rho_{\text{magnezit tégl}} = 3020 \text{ kg/m}^3, p_{\text{anyag/p munkadíj}} = 2/1,$$

$$C_{\text{magnezit tégl+munkadíj}} = 95130 \text{ Ft/m}^3 \text{ – a magnezit téglából épített rész fajlagos költsége;}$$

$$p_{\text{ásványgyapot}} = 54000 \text{ Ft/m}^3, p_{\text{anyag/p munkadíj}} = 2/1,$$

$$C_{\text{ásványgyapot+munkadíj}} = 81000 \text{ Ft/m}^3 \text{ – az ásványgyapot szigetelés költsége (olcsóbb, mint a magnezit tégl!);}$$

$$C_{\text{tároló belső hőátadó csövezeték+munkadíj}} = C_{\text{magnezit tégl+munkadíj}} \text{ – a hőtárolón belüli hőátadó rendszer költsége}$$

$$r = 8 \% \text{ – a diszkontálási ráta; } \quad n = 30 \text{ év – a tervezett élettartam.}$$

A számításokhoz megadott költség adatok 300 Ft/€ árfolyamon, a gyártók által közölt és a gyakorlati tapasztalat alapján felvett becsült adatokon alapulnak, de ezek bármikor változtathatóak. A bemenő költségadatokból azonban megállapítható, hogy a tároló kialakításának költségét a biztonság kedvéért inkább magasra választottam.

### **Korlátozási feltételek:**

$$20 \text{ m} \leq x_1 \leq 40 \text{ m} \quad \text{és} \quad 0,3 \text{ m} \leq x_2 \leq 1,0 \text{ m}, \quad (3.6.2-1)$$

ahol  $x_1$  – a tároló magassága (H) illetve átmérője (D) –  $H/D = 1$ ,

$x_2$  – az ásványgyapot hőszigetelés vastagsága ( $\delta$ ).

### **Célfüggvény:**

Célfüggvényünk a (3.6.1-2) egyenlet, behelyettesítve (3.6.1-3) egyenletet.

### **Eredmények:**

A számításokhoz a 3.6.2 fejezetben leírt MATLAB programcsomagot használtam. Az optimaláshoz létrehoztam 1 generációban 5 populációt és populációnként 20 egyedet. A vizsgálatot, az egyedfejlődést 50 generációra végeztem el.

A program futási ideje viszonylag jelentős volt, közel 5 napig tartott az optimum meghatározása a sok elvégzendő számítás miatt. Az eddiginél jobb számítógép használatával

a futási idő csökkenthető lenne. Az eredményeket a 3.6.2-1 táblázat mutatja.

$x_1$ (H, D)	$x_2$ ( $\delta$ )	$Q_{\text{kapacitás}}$	$Q_{\text{be}}$	$Q_{\text{ki}}$	hatásfok	teljesítmény	napmező mérete	LCOE
38,12 m	0,94 m	41,6 PJ	363 PJ	341 PJ	94 %	16,1 MW	12,6 ha	3,54 Ft/MJ

3.6.2-1 táblázat

Az optimális méret és a rendszer egyéb jellemzői

### 3.6.3 Következtetések

A 3.6 fejezetben bemutatott optimálásnak nem az volt a célja, hogy egzakt gazdasági számítás készüljön hanem, hogy a módszert kidolgozzuk, de ennek ellenére a felvett, és a valóságot megközelítő bemenő adatok alapján az optimális (minimális) önköltségi ár LCOE = 3,54 Ft/MJ lett, ami figyelemre méltó. Viszonyítási alapnak a földgáz kb. 3 Ft/MJ-os árát vehetjük. Olcsóbb tárolási konstrukciót kidolgozva, vagy olcsóbb napenergia begyűjtő rendszert alkalmazva ez az érték tovább csökkenthető.

A sugárzásra merőleges napmező mérete közel 13 ha. A nyolc hónap alatt erről a területről folyamatos és egyenletes energiakiadással 16,1 MW lenne a rendszerünk termikus teljesítménye, ami az ugyanekkora területről származó biomassza eltüzelésével leadható energiatermelésnél több mint százszor nagyobb (kb. 120-szoros).

A rendszer termikus energetikai hatásfoka – szinte hihetetlen – 94 % lett. Tehát a begyűjtött naphő 94 %-át hasznosítani lehetne! Ha néhány folyamat veszteségét el is hanyagoltuk, akkor is látszik, a nagyméretű tárolás kiemelkedően jó eredményeket produkál. Az optimálás megmutatta, hogy a tároló azt a legnagyobb méretet ( $50265 \text{ m}^3$ ) vette fel, amit még a korlátozási feltételek megengedtek. Így biztosítható a legkisebb hőveszteség. Az is látszik, hogy az ásványgyapot hőszigetelés rendkívül olcsó, ezért érdemes azt jól kihasználni.

A végső eredmény egyrészt útmutatást adott arra, hogy hogyan lehet a hőtárolók fajlagos hőveszteségét csökkenteni, másrészt módszert adott arra, hogyan lehet az új tervezési szempontot, a méretet is változóként kezelve meghatározni, adott feltételek mellett, a hőtárolónak és a hőtároló szigetelésének gazdasági szempontból optimális méretét.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

*„Semmi sem olyan gyakorlati, mint egy jó elmélet”*

Boltzmann

Egy kutatómunka valójában soha nem fejeződik be, ezért ennek a dolgozatnak sincs vége, bár igyekeztem egy „kerek”, és gondolatmenetében rendezett disszertációt készíteni. Nagyon sok megvizsgálandó és jobban megvizsgálandó terület van még, aminek a végigjárására rengeteg időre lenne szükség. Ezért most csak összegezni lehet az eddigi eredményeket.

Azonban a disszertáció végén az mindenképpen elmondható, hogy a bevezetőben ismertetett és megfigyelés alapján felállított hipotézisemet a kutatási munka során igazolni tudtam. Megállapítottam, hogy a hőtárolók fajlagos hőveszteségét csökkenteni lehet a hőtárolók méretének növelésével, amelyet a családi házak hőigényének biztosítására tervezett különböző méretű hőtárolókra kiszámított fajlagos hőveszteség értékek is alátámasztottak. Sikerült a Newton-féle átadási egyenlet segítségével matematikailag is kimutatnom a hűlés (melegedés) sebességének függését a fajlagos felülettől.

A munka során kialakult a jó hőtároló anyagra vonatkozó szempontrendszer is. Ebből érdemes kiemelni, hogy a tároló térfogatának minél jobb kihasználhatósága miatt, a nagy térfogati hőkapacitással rendelkező anyagok használatát kell preferálni és a környezeti hőmérséklet feletti minél nagyobb hőmérséklet-tartományban való használattal. Ilyen tárolás megvalósítható egyes szilárd anyagokból (pl. a MgO - magnezitből vagy az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – korrundból) kialakított hőtárolók segítségével vagy akár a földalatti hőtárolással is. Bár jelen dolgozatban a hőtároló anyagon belüli vezetést nem vizsgáltam, de könnyű belátni, hogy a hőtároló anyag jó hőmérséklet-vezetési tényezője szintén fontos, meghatározza a tároló működési sebességét, és ez fontosabb szempont, mint a kis belső termikus ellenállásból adódó hűlés sebességére való hatás. Mindezen ismereteket felhasználva rendszereztem az érzékelhető hőtárolás tervezésének műszaki szempontjait.

A hőtároló hőveszteségének csökkentésére tett erőfeszítések vezettek el a hőszigetelésnél is alkalmazandó komplex energetikai szemlélethez. A rendszer teljes energiamérlegét kell vizsgálni, az energiagazdálkodást célszerű a középpontba állítani. Tehát nem a hőtároló tervezési folyamatának a végén kell a hőszigetelést megtervezni, hanem már a tervezési munka elején figyelni kell a teljes energiagazdálkodásra, aminek része a hőszigetelés is.

A kutatási munkából kiderült, hogy a hőtároló fajlagos hőveszteségét 2 úton csökkenthetjük:

- termikus ellenállás alkalmazásával (ez a hagyományos hőszigetelés) és
- a fajlagos felület csökkentésével.

A fajlagos felület fontosságának felismerése átírta a hőtároló és szigetelésének tervezését is. Egy új szempont került be a tervezésbe, a mérettől függő fajlagos felület. Ezért a hőtárolók fajlagos hőveszteségének csökkentésére új tervezési módszert dolgoztam ki, ahol a mérettől függő fajlagos felület a hőszigetelő réteg vastagságával együtt változóként szerepel.

Definiáltam a hőtároló alapjellemzőit, az üzemviteli jellemzőit és használati jellemzőit. A használati jellemzők meghatározására számítási algoritmust és MATLAB programcsomag készítettem, ami a számításoknál sikeresen működött. E nélkül a komplex optimalizációs feladatot nem lehetett volna elvégezni.

Végül a gazdasági szempontból optimális megoldás meghatározásához felírtam a célfüggvényt, ami a különböző villamosenergia termelési technológiák összehasonlítására kidolgozott önköltség képleten alapul. Az optimális méret numerikus számításánál a genetikus algoritmust (GA-t) használtam. Ehhez segítségül vettem egy kész GA alkalmazó programcsomagot, amelyet kiegészítettem és összeépítettem a saját magam készített MATLAB programcsomaggal. Az így elkészült komplex programcsomag már alkalmas volt arra, hogy a fajlagos hőveszteség szempontjából olyan optimális hőtároló tervezést végezzek, ahol a mérettől függő fajlagos felület, tervezési változóként legyen figyelembe véve. A kapott eredmény alátámasztotta a kutatás során észrevett ismereteket, a méret fontosságát és megadta az optimális szigetelőréteg vastagságot is.

A különböző energiaforrások fajlagos területigényének összehasonlító vizsgálatával sikerült azt is bemutatni, hogy Magyarországon is érdemes a fókuszált napenergiával ipari szinten foglalkozni. Sőt a jó hatásfokú tároláshoz szükséges nagy méretek miatt valójában így érdemes, így gazdaságos.

Mivel minden elméleti állítás gyakorlati igazolást is követel, ezért a Pannon Egyetemen, a dolgozatban leírt gondolatokra alapozva, további kutatási munka indult el, amelynek végső célja a konkrét hőtároló konstrukciójának kialakítása, illetve a nagyméretű, magas hőmérsékletű hőtárolás megvalósítása. A jó hőtároláshoz szükséges nagy méretek miatt a mesterségesen megépített tárolók mellett előtérbe kerültek a földalatti tárolási megoldások is.

## 5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Ackley, D. H.: A connectionist machine for genetic hillclimbing. *Volume 28 of the Springer International Series in Engineering and Computer Science. Norwell, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, 1987.*
- [2] Adeyanju, A. A., Manihar, K.: Comparison of Thermal Energy Storage Techniques. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4 (3), pp.: 221-231, 2009.
- [3] Adeyanju, A. A., Oni, T. O., Akindele, D. O.: Experimental Determination of Thermophysical Properties of Concrete for Thermal Energy Storage. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 (4), pp.: 282-289, 2010.
- [4] Adinberg, R., Epstein, M.: Conception and Design of a Thermal Energy Storage System. Publication of the 5<sup>th</sup> IASME/WSEAS Int. Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Athens, Greece, 2007.
- [5] Adinberg, R., et al.: R15.1 Report on the Methodology to Characterize Various Types of Thermal Storage Systems. EU-founded research project: Solar Facilities for the European Research Area (SFERA), 2010.
- [6] Adinberg, R.: Simulation analysis of thermal storage for concentrating solar power. *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011), pp.: 3588-3594.
- [7] Albert, J.: Hőszigetelő anyagok kémiája és technológiája. *BME Mérnök továbbképző Intézet, Budapest, 1952.*
- [8] Albert, J.: A hőszigetelés kézikönyve. *Budapest, Műszaki könyvkiadó, 1962.*
- [9] Argyelán, J.: Transzportfolyamatok. *Pannon Egyetemi Kiadó, 2009.*
- [10] Ataer, O. E.: *Storage of Thermal Energy*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS publishers), Oxford, UK, 2006.
- [11] Atkins, P. W.: Fizikai kémia I-III. *Tankönyvkiadó, Budapest, 1993.*
- [12] Andersson, O., Hellström, G., Nordell, B.: Heating and Cooling with UTES in Sweden – Current Situation and Potential Market Development. FUTURESTOCK 2003 Conference paper, Warsaw, Poland, 2003.
- [13] Andersson, O., Hägg, M.: Integration of Geothermal Energy into Industrial Applications. Introduction to Underground Thermal Energy Storage and Market Potential in Sweden. SWECO VIAK, Malmö, Sweden, 2007.

- [14] Álmosi, A., Győri, S., Horváth, G., Várkonyiné, K. A.: Genetikus algoritmusok. *Tipotex, Budapest, 2002.*
- [15] Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a napenergia-hasznosításban. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2011 Konferencia Kiadványa, pp.: 31-35, 2011.
- [16] Árpád, I.: Investigation of the Sensible Heat Storage and the Heat Insulation in the Exploitation of Solar Energy. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, IX.3.* pp.: 41-45, 2011.
- [17] Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a hazai napenergia-hasznosításban. *Energiagazdálkodás, 52.évf. 6. szám,* pp.: 7-10, 2011.
- [18] 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).
- [19] Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a hazai napenergia hasznosításban. Pannon Egyetem, Ünnepi Konferencia Kiadvány Dr. Timár Imre 60. születésnapjára, 2012.
- [20] Árpád, I Timár, I.: A hőtároló és a hőszigetelésének optimális méretezése. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2012 Konferencia Kiadvány, pp.: 38-41, 2012.
- [21] Árpád, I., Timár, I.: A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A hőtároló méretének és hőszigetelésének optimalása. Pannon Egyetem, XXIV. Nemzetközi Karbantartási Konferencia 2012., Konferencia kiadvány, pp.: 161-168.
- [22] Árpád, I Timár, I.: Characterization of Sensible Heat Storage. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, X.3.,* pp.: 247-252, 2012.
- [23] Árpád, I., Timár, I.: A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A hőtároló méretének és hőszigetelésének optimalása. Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, Környezettudományi Doktori Iskolák Konferenciája 2012., *Konferencia kiadvány,* pp.: 56-63.

- [24] Árpád, I.: A direkt sugárzásból származó magyarországi napenergia potenciál összehasonlító vizsgálata. *Energiagazdálkodás*, (megjelenés alatt), a cikk beküldésének ideje: 2013. január.
- [25] Árpád, I., Timár, I.: Elérhető hőtárolási lehetőségek a napenergia hasznosításban. *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2013 Konferencia Kiadvány*, pp.: 24-27, 2013, ISSN 2068-1267.
- [26] Bakker, M., van Helden, W. G. J.: Materials for compact thermal energy storage: a new IEA joint SHC/ECES task. *Proceedings of the ASME 2009 3<sup>rd</sup> International Conference of Energy Sustainability ES2009*, San Francisco, California, USA, 2009.
- [29] Bajnóczy, G., Gagyí Pállfy, E., Prépostffy, E., Zöld, A.: *Heat storage by two-grade phase change material*. *Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng.*, Vol. 43, No. 2, pp.: 137-147, 1999.
- [30] Baker, J.E.: Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms. *In Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*. pp.: 101-111. *Grefenstette, 1985*.
- [31] Baker, J.E.: Reducing bias and inefficiency into the selection algorithm. *In Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*. pp.: 14-21. *Grefenstette, 1987*.
- [32] Balázs, Gy.: Építőanyag praktikum. *Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1983*.
- [33] Balikó, S.: *Kemence falazat hőszigetelése. Hőszigetelés számítása*. *Energiagazdálkodás*, 53. évf. (2012), 6. szám, pp.: 26-28.
- [34] Balogh, S.: Többszemponitú gazdasági döntéseket segitő genetikus algoritmus kidolgozása. *Doktori (PhD) értekezés, Kaposvári Egyetem, 2009*.
- [35] Barótfi, I., et al.: *Energiafelhasználói kézikönyv. II. Megújuló energiaforrások*. *Környezet-technika Szolgáltató Kft., Budapest, 1993*.
- [36] Barótfi, I., et al.: *A napenergia hasznosítása. Energia felhasználói kézikönyv*. *Környezettechnikai Szolgáltató Kft., Budapest*.
- [37] Barótfi, I.: *Környezettechnika*. *Mezőgazda Kiadó, 2003*.
- [38] Básti, J., Ünnepe, R.: *Fénykoncentrátoros napelem rendszer tervezése*. *ELTE TDK dolgozat, 2007*.

- [39] Beke, J.: Műszaki hőtan mérnököknek. *Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 2000.*
- [40] Benedek, P., László, A.: A vegyészmérnöki tudomány alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [41] Bridger, D. W., Allen, D. M.: Designing Aquifer Thermal Energy Storage Systems. American Society Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Journal, Vol. 47, No. 9, pp.: 32-37, 2005.
- [42] Brown, B. M., Strasser, M. N., Selvam, R. P.: Development of a structured thermocline thermal energy storage system. Publications of University of Arkansas Department of Civil Engineering, 2012.
- [43] Cammerer, J.S.: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. *Springer-Verlag, Berlin, 1980.*
- [44] Cerbe, G., Hoffmann, H. I.: Einführung in die Wärmelehre. *München, Hanser, 1982.*
- [45] Chen, C. J.: Physics of Solar Energy. *John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011*
- [46] Chwieduk, D.: Underground Thermal Energy Storage in Poland. Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences' Paper, 1997.
- [47] Conolly, D.: A Review of Energy Storage Technologies. For the integration of fluctuating renewable energy. University of Limerick, Ireland, 2009.
- [48] Cruickshank, C. A.: Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications. PhD dissertation, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2009.
- [49] Csendes, T.: Az optimalizálás alkalmazásai. Egyetemi jegyzet. Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 2006.
- [50] Daryabeigi, K.: *Heat Transferring High-Temperature Fibrous Insulation.* Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 17, No. 1, pp.: 10-20, 2003.
- [51] Davison, H. W.: Compilation of thermophysical properties of liquid lithium. NASA Technical Note (NASA TN) D-4650, 1968.
- [52] Demirbas, M. F.: Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview. Energy Sources, Part B, pp.: 1:85-95, 2006.

- [53] Dinçer, I., Rosen, M. A.: *Thermal Energy Storage. Systems and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2002.
- [54] Duffie, J. A., Beckman, W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [55] Eklöf, C., Gehlin, S.: TED A Mobil Equipment for Thermal Response Test. Master's Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 1996.
- [56] Erdey-Grúz, T., Schay, G.: *Elméleti fizikai kémia I-III. Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1962.*
- [57] Faninger, G.: *Thermal Energy Storage*. 5<sup>th</sup> International Summer School Solar Energy 1998. Published by University of Klagenfurt, 1998.
- [58] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S.: A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45 (2004), pp.: 1597-1615.
- [59] Farkas, I.: A napenergia hasznosításának hazai lehetőségei. *Magyar Tudomány*, 2010 (8). pp.: 937-946.
- [60] Farkas, J., Timár, I.: *Fémszerkezetek optimális méretezése. BME Mérnök Továbbképző Intézet, Budapest, 1980.*
- [61] Fejes, G., Fábry, Gy.: *Vegyipari gépek és műveletek II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1975.*
- [62] Fényes I.: *Termosztatika és termodinamika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.*
- [63] Fényes I. et al.: *Modern fizikai kisenciklopédia. Gondolat Kiadó, Budapest, 1971.*
- [64] Fiacco, A. V., McCormick, G. P.: *Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques*. Wiley, New York, 1968.
- [65] Fischer, S., Hauer, A.: *Space Heating and Cooling with a Thermochemical Storage System in the District Heat Net of Munich*. ZAE Bayern, Paper of Department for Thermal Use of Solar Energy, 2000.
- [66] Fluri, T. P., et al.: *Cost analysis of solar chimney power plants*. *Solar Energy*, 83 (2009), pp.: 246-256.
- [67] Fogel, L. J., Owens, A. J., Whals, M. J.: *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. Wiley, 1966.

- [68] Fülöp, L., Szűcs, M., Zöld, A.: A napenergia passzív hasznosításának hazai potenciálja. *Energiagazdálkodás*, 46 (1), pp.: 8-13.
- [69] Fülöp, L.: Aktív szolár és fotovillamos rendszerek. Jegyzet (Tananyag), Pécs, 2012.
- [70] Gallagher, R. H., Zienkiewicz, O. C.: *Optimum Structural Design*. Wiley, London, 1973.
- [71] Gang, P., Jing, L., Jie, J.: Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010), pp.: 998-1004.
- [72] Gantenbein, P., Brunold, S., Fluckiger, U., Frei, U.: Sorbtion materials for application in solar heat energy storage. Paper of Institute für Solartechnik SPF, University of Applied Sciences Rapperswil, Switzerland, 1999.
- [73] Ghobeity, A., Noone, C. J., Papanicolas, C., N., Mitsos, A.: *Optimal time-invariant operation of a power and water cogeneration solar-thermal plant*. *Solar Energy*, 85 (2011), pp.: 2295-2320.
- [74] Giber, J., Sólyom, A., Kocsányi, L.: Fizika mérnököknek I-II. A műszaki fizika alapjai. Egyetemi tankönyv. *Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999*.
- [75] Gielen, D., et al.: Renewable energy technologies: Cost analysis series. Volume 1: Power Sector, Issue 2/5, Concentrating Solar Power, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2012.
- [76] Gil, A., et al.: *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modellization*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010), pp.: 31-55.
- [77] Glasnović, Z., Rogošić, M., Margeta, J.: *A model for optimal sizing of solar thermal hydroelectric power plant*. *Solar Energy*, 85, 2011, pp.: 794-807.
- [78] Grein, M., Nordell, B., Almathnani, A. M.: UTES potential for space heating and cooling in Libya. Paper of Div. Architecture and Infrastructure Luleå University of Technology (Sweden) and Dept. of Environmental Studies Sebha University (Libya), 2006.
- [79] Gróf, Gy.: Hőközlés. Ideiglenes jegyzet. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1999*.

- [80] Gu, Y.: Thermophysical Properties of Chinese Coals. Science in China (Series A), Vol. 34 No. 2, pp.: 201-208, 1991.
- [81] Hauer, A.: Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications. ZEA Bayern, Paper of Center for Applied Energy Research, Germany, 2001.
- [82] Haupt, R. L., Haupt, S. E.: Practical Genetic Algorithms. *John Wiley & Sons, New York, 1998.*
- [83] Hazami, M., Kooli, S., Lazâar, M., Farhat, A., Belghith, A.: *Energy and Exergy efficiency of a daily heat storage unit for buildings heating.* Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, 2009, pp.: 185-200.
- [84] *Hernádi, B., Tóth, K.: A bükkábrányi és a németországi Hambach melletti külszíni lignitbányák elővíztelenítési gyakorlatának összehasonlító elemzése. Mátrai Erőmű, 2010.*
- [85] Herrmann, U., Kearney, D. W.: Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants. Journal of Solar Energy Engineering, Volume 124, Issue 2, Publisher: ASME, p. 145, 2002.
- [86] Hodúr, C., Sárosi, H.: Hőtani műveletek. Jegyzet levelező hallgatók számára. *Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Szeged, 2007.*
- [87] Holland, J. H.: Adaptation in natural and artificial systems. *Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.*
- [88] Horváth, M.: A vegyipari hidegtechnológia alapjai. *Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1963.*
- [89] Horváth, P.: Daruk csőszerkezetből felépülő acélszerkezetének optimális méretezése. PhD értekezés. *BME KSK, Budapest, Veszprém, 2007.*
- [90] Isachenko, V. P., Osipova, V. A., Sukomel, A. S.: Heat transfer. Third edition, Mir Publishers, Moscow, 1977
- [91] Imre, L.: Energiaforrások és rendszerek. *Veszprémi Egyetemi Kiadó. Veszprém, 1995.*
- [92] Imre, L.: *A napenergia növekvő részaránya a hőellátásban.* Magyar Energetika, XVI. évf., 2008/5., pp.: 17-19.
- [93] Imre, L., Szabó, I.: Transzportfolyamatok. *Tankönyvkiadó, Budapest, 1974.*

- [94] Imre, L.: Hőátvitel elmélet és áramlástan. *Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.*
- [95] Imre, L.: Hőátvitel összetett szerkezetekben. *Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.*
- [96] Imre, L., Bitai, A., Hecker, G.: Megújuló energiaforrások. Egyetemi jegyzet. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2009.
- [97] Jármái, K., Iványi, M.: Gazdaságos fémszerkezetek analízise és tervezése. *Műegyetem Kiadó, 2001.*
- [98] Jászay, T.: Műszaki hőtan (Hőközlés). *Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.*
- [99] Jeon, J., et al.: *Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Springer Link, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2012.
- [100] Kaboldy, E.: A napenergia aktív hasznosításának hazai potenciálja. *Energiagazdálkodás, 2005/1, pp.: 19-23.*
- [101] Kapros, T.: Hőtan. Jegyzet. Miskolci Egyetem, 2011.
- [102] Keszei, E.: Bevezetés a kémiai termodinamikába. Egyetemi jegyzet. *Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, 2007. (aktualizálva: 2010.)*
- [103] King, R. R., et al.: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Paper, Hamburg, Germany, Sep., pp.: 21-25, 2009.*
- [104] Konecsny, F., Pásztor, E., Steiger, I.: Műszaki hő- és áramlástan II. kötet. *Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.*
- [105] Koza, J. R.: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. *MIT Press, 1992.*
- [106] Koza, J. R.: Genetic Programming II.: Automatic Discovery of Reusable Programs. *MIT Press, 1994.*
- [107] Kosma, M.: Anforderungen an die Lagerstätten erkundung und –bewertung zur optimierten Betriebssteuerung einer kohlenqualitätsorientierten Kraftwerksbeköhlung bei der Mátra Kraftwerke G. AG. Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola, 2011.
- [108] Környey, T.: Hőátvitel. *Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.*

- [109] Krekó, B.: Optimum-számítás. Nemlineáris programozás. *Közgazdasági és Jogi Kiadó, Budapest, 1972.*
- [110] Kwon, K. C.: *Engineering Model of Liquid Storage Utility Tank for Heat Transfer Analysis*. 1995 International Joint Power Generation Conference, Minneapolis, 1995.
- [111] Laing, D., Lehmann, D., Bahl, C.: Concrete Storage for Solar Thermal Power Plants and Industrial Process Heat. 3rd International Renewable Energy Storage Conference (IRES III), Berlin, 2008.
- [112] Lee, S. C., Cunnington, G. R.: *Conduction and Radiation Heat Transfer in High-Porosity Fiber Thermal Insulation*. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 14, No. 2, pp.: 121-136. 2000.
- [113] Liszi, J.: Fizikai kémia. *Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1993.*
- [114] Lottner, V., Mangold, D.: Status of seasonal thermal energy storage in Germany. TERRASTOCK 2000 Conference, conference's paper, Stuttgart, 2000.
- [115] Lovász, A., Bajnóczy, G.: Domestic hot water pre-heater utilizing solar energy. Periodica Politechnica Ser. Chem. Eng., Vol. 50, No. 1, pp.: 45-53, 2006
- [116] Lund, J., et al.: Geothermal (ground-source) heat pumps. A world overview. GHC Bulletin, 2004.
- [117] Luzzi, A., et al.: *Techno-economic analysis of a 10 MW<sub>e</sub> solar thermal power plant using ammonia-based thermochemical energy storage*. Solar Energy, Vol. 66, No. 2, pp.: 91-101, 1999.
- [118] Major, Gy., et al.: A napsugárzás Magyarországon. *Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványa, 10. szám, Budapest, 1976.*
- [119] Marsch, P.: Hőszigetelés és kondenzáció. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.*
- [120] Marshall, L. S., McLeskey Jr., J. T.: Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. Solar Energy, Vol. 86, pp.: 289-300, 2012.
- [121] Mihejev, M. A.: A hőátadás gyakorlati számításának alapjai. *Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 1987.*
- [122] Montes, M. J., Abánades, A., Martínez-Val, J. M., Valdés, M.: *Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors*. Solar Energy, 83 (2009), pp.:2165-2176.

- [123] MSZ EN ISO 7345:1997 Hőszigetelés. Fizikai mennyiségek és fogalom-meghatározások.
- [124] Náray-Szabó, I.: Kémia. 3. átdolgozott kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [125] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium: Magyarország megújuló energia hasznosítási terve 2010 – 2020. A 2020-ig terjedő megújuló energiahordozó felhasználás alakulásáról. [www.nfm.gov/magyarorszagmegujuloenergia](http://www.nfm.gov/magyarorszagmegujuloenergia)
- [126] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium: Nemzeti Energiastratégia 2030. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, 2012.
- [127] Nikecell termékismertető. Nikecell Kft., Balatonfüzfő.
- [128] Nordell, B.: Large-scale Thermal Energy Storage. Winter Cities' 2000, Energy and Environment, Luleå, Sweden, 2000.
- [129] Nordell, B.: Underground Thermal Energy Storage (UTES). Innostock 2012 The 12<sup>th</sup> International Conference on Energy Storage, Conference's paper, 2012.
- [130] Országos Meteorológiai Szolgálat honlapja, Éghajlati adatsorok, [www.met.hu](http://www.met.hu)
- [131] Örvös, M.: Termikus eljárások és berendezések. I. rész. Kézirat. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2001.*
- [132] Palotás, L., et al.: Mérnöki kézikönyv, I. kötet., *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.*
- [133] Pattantyús, Á. G.: Gépész- és villamosmérnökök kézikönyve 2. Alaptudományok-Anyagismeret. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961.*
- [134] Patvaros, J.: Az alapvető bányászati technológiai rendszerek néhány racionalizálási lehetősége. *Nehézipari Műszaki Egyetem Közleményei, I. sorozat, Bányászat, 34 (1-4), pp.: 155-174, Miskolc, 1986.*
- [135] Pásztory, Z.: *Hőszigetelés fejlesztési lehetőségek könnyűszerkezetes faházak számára. Doktori (PhD) értekezés.* Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 2007.
- [136] Perry, J. H.: Vegyészmérnökök kézikönyve I-II. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.*
- [137] Phillips, K. J. H.: Guide to the Sun. *Cambridge University Press, Cambridge, 1995.*

- [138] Pilkington Solar International GmbH: Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants. NREL Technical Monitor. NREL, USA, 2000.
- [139] Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A.: *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011), pp.: 3341-3359.
- [140] Pleva, L.: Hőenergia-gazdálkodás. Egyetemi jegyzet. *Veszprémi Egyetem, Géptan Tanszék, 1991*.
- [141] Pleva, L., Zsíros, L.: Műszaki hőtan. Szemináriumi segédlet és példatár. *Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1994*.
- [142] Polheim, H.: Evolutionäre Algorithmen, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [143] Powell, K. M., Edgar, T. F.: *Modelling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage*. Chemical Engineering Science, 71 (2012), pp.: 138-145.
- [144] Puren termékismertető. Puren GmbH., Überlingen, Németország.
- [145] Quinnell, J. A., Davidson, J. H.: Long-term solar thermal energy storage using aqueous calcium chloride. EmPowering the World with Renewable Energy Conference, Denver, Colorado, 2012.
- [146] Ragheb, M.: Thermal Energy Storage. 2010.
- [147] Ragheb, M.: Thermal Energy Storage with Solar Power Generation. 2011.
- [148] Ravikumar, M., Srinivasan, PSS.: Phase Change Materials as a Thermal Energy Storage Material for Cooling of Building. Journal of Theoretical and Applied Information Technology 2005-2008, pp.: 503-511, 2009.
- [149] Ražnjevič, K.: Hőtechnikai táblázatok. *Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1964*.
- [150] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologische Evolution. *Fromman-Holzboog, Stuttgart, 1973*.
- [151] Regin, A. F., Solanki, S. C., Saini, J. S.: An analysis of packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation. Renewable Energy 34 (2009), pp.: 1765-1773.

- [152] Reddigari, M. R., et al.: Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials – Constant Heat Source. *Thermal Science*, Vol. 16, No. 4, pp.: 1097-1104, 2012
- [153] Richter, P., Ábrahám, E., Morin, G.: Optimisation of Concentrating Solar Thermal Power Plants with Neural Networks., Dobnikar, A., Lotrič, U., Šter, B. (editors): ICANNGA 2011, Part I, LNCS 6593, pp.: 190-199, 2011.
- [154] Rockwool prospektus. Műszaki szigetelés. Rockwool Hungary Kft., Budapest.
- [155] Rosen, M. A.: *Appropriate Thermodynamic Performance Measures for Closed Systems for Thermal Energy Storage*. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 114, pp.: 100-105, 1992.
- [156] Rovira, A., Montes, M. J., Valdes, M., Martínez-Val, J. M.: *Energy management in solar thermal power plants with double thermal storage system and subdivided solar field*. *Applied Energy*, 88 (2011), pp.: 4055-4066.
- [157] Sandnes, B.: Exergy Efficient Production, Storage and Distribution of Solar Energy. Thesis submitted for the Degree of Doctor Scientiarum. *Department of Physics Faculty of Mathematics and Natural Sciences University of Oslo*, 2003
- [158] Sangi, R., Amidpour, M., Hosseinizadeh, B.: Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 85 (2011), pp.: 829-838.
- [159] Sanner, B., Kabus, F., Seibt, P., Bartels, J.: Underground Thermal Energy Storage for German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, Conference's paper, pp.: 1-8
- [160] Sánta, I.: Hő- és áramlástan II. (Hőtan II.), BME egyetemi jegyzet, Budapest, 2011.
- [161] Schlichting, H., Gersten, K.: *Boundary Layer Theory*. 8th Revised and Enlarged Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Corrected Printing 2003.
- [162] Schmidt, T., Mangold, D.: New steps in seasonal thermal energy storage in Germany. Paper of Solites – Steinbeis Research Institute for Solar and Sustainable Thermal Energy Systems, 2008.
- [163] Schwarzbözl, P., et al.: *Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives*. *Solar Energy*, 80 (2006), pp.: 1231-1240
- [164] Schwefel, Hans-Paul: *Evolution and Optimum Seeking*. Wiley, 1995.

- [165] Semadeni, M.: Energy storage as an essential part of sustainable energy systems. A review on applied energy storage technologies. CEPE Working Paper No. 24, 2003.
- [166] Sharma, S. D., Sagara, K.: Latent heat storage materials and systems: A review. *International Journal of Green Energy*, 2, pp.: 1-56, 2005.
- [167] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), pp.: 318-345.
- [168] Shukla, A., Buddhi, D., Sawhney, R. L.: *Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), pp.: 2119-2125.
- [169] Sibbit, B., et al.: Measured and simulated performance of a high solar fraction district heating system with seasonal storage. 2011.  
[http://www.dlsc.ca/reports/ISES\\_SWC\\_2011\\_final.pdf](http://www.dlsc.ca/reports/ISES_SWC_2011_final.pdf)
- [170] Sibbit, B., et al.: The Performance of a High Solar Fraction Seasonal Storage District Heating System – Five Years of Operation. *Energy Procedia*, pp.: 10, 2012
- [170] Siegel, N. P.: Thermal energy storage for solar power production. *WIREs Energy Environ*, 1, pp.: 119-131, 2012.
- [171] Simon, T.: *Az exergiaszemlélet jelentősége a mérnöki gyakorlatban. 1 és 2. rész*. *Magyar Épületgépészet*, LVII. évf., 2008/3. és 5. szám.
- [172] Simonyi, K.: A fizika kultúrtörténete. Ötödik, javított kiadás. *Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011*.
- [173] Suresh, M. V. J. J., Reddy, K. S., Kolar, A. K.: *4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants*. *Energy for Sustainable Development*, 14 (2010), pp.: 267-279.
- [174] Szidarovszky Ferenc: Bevezetés a numerikus módszerekbe. *Közgazdasági és Jogi könyvkiadó, Budapest, 1974*.
- [175] Szolcsányi, P.: *Transzportfolyamatok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1972*.
- [176] Szűcs I., Palotás Á. B., Hegman N.: *A sugárzási tényező inhomogenitásának hatása a felületi hőmérséklet eloszlásra tűzálló falazatok termoviziós vizsgálatánál*. *Anyag és kohómérnöki tudományok, Kutatási jelentés, Miskolc, 2000*.

- [177] Tamás, F.: Szilikátipari kézikönyv. *Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982.*
- [178] Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W-D.: Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough. 2003 International Solar Energy Conference, Hawaii, US, ASME, pp.: 1-8, 2003.
- [179] Tamme, R.: Optimised Industrial Process Heat and Power Generation with Thermal Energy Storage. Final Report. International Energy Agency Energy Conservation through Energy Storage (IEA ECES), 2010.
- [180] Timár, I.: Optimierung von Sandwichplatten mit der Nichtlinearen SUMT-Methode. *Konstruktion* 33, H. 10., pp.: 403-407.
- [181] Timár I.: Optimierung ebener Fachwerke mit mehreren Zielfunktionen. *Forschung im Ingenieurwesen* 68 (2004) 121-125. Springer-Verlag 2004.
- [182] Tóth, P., Bulla, M., Nagy, G.: Energetika. Egyetemi jegyzet. *Pannon Egyetem, Veszprém.*
- [183] Tóth, P., Bulla, M.: Energia és Környezet. Jegyzet. *Széchenyi István Egyetem, Győr, 1999.*
- [184] Turba, J., Németh, J.: Vegyipari készülékek és gépek tervezése. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.*
- [185] Tyagi, V. V., Panwar, N. L., Rahim, N. A., Kothari, R.: Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), pp.: 2289-2303.
- [186] University of Delaware honlapja,  
[www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html](http://www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html)
- [187] van Helden, W., Bakker, M., Hauer, A.: Materials for compact thermal energy storage: a new IEA SHC/ECES Joint Task. International Energy Agency (IEA), Task 42, 2012.
- [188] VDI Heat Atlas. Second Edition. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.*
- [189] Veress, S.: Kémia-Építőanyagok II. *Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.*
- [190] Völgyes, I.: Fűtéstechnikai adatok. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.*
- [191] Wetzel, A.: Evaluation of the Effectiveness of Genetic Algorithms in Combinatorial Optimization. PhD Thesis, University of Pittsburgh, *Pittsburgh PA, Unpublished manuscript, technical report, 1983.*

- [192] Wit, J. de: *Heat Storages for CHP Optimisation*. PowerGen Europe 2007 Conference paper (ID-94), Madrid, 2007.
- [193] Wolpert, D. H., Macready, W. G.: No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), p.: 67-82, 1997.
- [194] Wong, H. Y.: Hőátadási zsebkönyv. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983*.
- [195] World Bank: Cost reduction study for solar thermal power plants. Final report. Prepared by Enermodal Engineering Limited and Marbek Resource Consultants Ltd., Washington, D. C., 1999.
- [196] Wu, B., Reddy, R. G., Rogers, R. D.: Novel ionic liquid thermal storage for solar thermal electric power systems. Proceedings of Solar Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, 2001, Washington, DC.
- [197] Xu, E., Wang, Z., Wei, G., Zhuang, J.: Dynamic simulation of thermal energy storage system of Badaling 1 MW solar power tower plant. *Renewable Energy*, 39 (2012), pp.: 455-462.
- [198] Yang, Z., Garimella, S. V.: *Thermal analysis of solar thermal energy storage in molten-salt thermocline*. *Solar Energy*, 84 (2010), pp.: 974-985.
- [199] Ying, Y., Hu, E. J.: Thermodynamic advantages of using solar energy in the regenerative Rankine power plant. *Applied Thermal Engineering*, 19 (1999), pp.: 1173-1180.
- [200] Zaki, G. M., Al-Turki, A. M.: *Optimization of Multilayer Thermal Insulation for Pipelines*. *Heat Transfer Engineering*, 21, pp.: 63-70, 2000.

## TÉZISEK

1. Számítással kimutattam, hogy a hazai fókuszált napenergia potenciál fajlagos területigénye kb. két nagyságrenddel kedvezőbb, mint az energianövény termesztésből származó energia fajlagos területigénye.
2. Megállapítottam, hogy atmoszférikus körülmények mellett a szilárd fázisú hőtárolással, az elérhető magasabb hőmérséklet szint miatt, azonos térfogatra számítva kb. 1 nagyságrenddel nagyobb hőtárolásra van lehetőség, mintha vizet alkalmaznánk hőtároló anyagként.
3. Megállapítottam, hogy az azonos alakú hőtárolók fajlagos hőveszteségét csökkenteni lehet a hőtárolók méretének növelésével.
  - 3.1. Matematikailag kimutattam a Newton-féle hőátadási egyenlet felhasználásával a hűlés (melegedés) sebességének függését a fajlagos felülettől.
4. Megfogalmaztam és rendszereztem az érzékelhető hőtárolás tervezésének műszaki szempontjait.
5. A hőtárolók fajlagos hőveszteségének csökkentésére vonatkozó új tervezési módszert dolgoztam ki, ahol a hőszigetelő anyag vastagsága mellett a tároló mérete is változóként szerepel.
  - 5.1. Jellemeztem a hőtárolót, meghatároztam az alap-, az üzemviteli és a használati jellemzőit.
  - 5.2. Módszert (számítási algoritmust) dolgoztam ki a hőtároló használati jellemzőinek kiszámítására az alap- és az üzemviteli jellemzők ismeretében.
  - 5.3. Felírtam a hőtárolók gazdasági szempontból történő kiválasztásához szükséges célfüggvényt és megfogalmaztam a korlátozó feltételek típusait.
  - 5.4. Genetikus algoritmust felhasználó módszert dolgoztam ki a hőtároló optimális méretének, valamint a mérettől függő fajlagos felületet is figyelembe vevő optimális szigetelőréteg vastagságának meghatározására.
6. Új technológiaként javasoltam a fókuszált napenergia hasznosításban a kis fajlagos hőveszteség miatt alkalmazandó nagyméretű és emellett magas hőmérsékletű ( $>100\text{ °C}$ ) szilárd fázisú természetes vagy mesterséges kialakítású hőtároló alkalmazását.

## THESES

- 1 I have concluded that the energy we get from energy corps, requires approximately two orders of magnitude larger area than we can use by concentrating solar radiation.
- 2 I have established by calculation it is possible to store approximately one order of magnitude larger amount of thermal energy in solid material than in water at atmospheric pressure. That is why higher temperature level can be achieved in solid material than in water.
- 3 I have established the relative heat losses of the same shape thermal energy storages can be reduced by enlargement of their size.
  - 3.1 I have mathematically demonstrated the dependence of the rate of cooling (heating) on the specific (relative) surface of body using the Newton's law of cooling.
- 4 I have determined and classified what technical characters and parameters have to be considered at the proper planning and realization of thermal energy storage and I have determined the relationships of these characters and parameters.
- 5 I have developed a new planning method for reducing of relative heat losses of thermal energy storages wherein not only the thickness of thermal insulation material but also the size of storage is a variable.
  - 5.1 I have characterised the heat storages and I have defined their basic, operating and using characters. The basic characters play the roles of the individual's characters in the genetic algorithm.
  - 5.2 I have created a method and computer software, which can calculate the using characters of heat storages from the basic and operating characters.
  - 5.3 I have created the formula of objective function, which is suitable for the selection of the size of heat storages and their insulation thickness from economical aspect in the exploitation of solar energy.
  - 5.4 I have created a method and computer software which uses the genetic algorithm for the optimization of the scaling of heat storage and the heat insulation thickness. The method considers the size-dependent specific surface in the calculation.
- 6 I have proposed a new storage technology in the exploitation of solar energy. The natural or artificially formed solid material storage should be prepared in large size because of its relative heat loss should be low and this storage can be operated on the high temperature level ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) because of the temperature range ( $\Delta T$ ) can be wide as well.

## A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI

A kutatási témában megjelent publikációk listája:

12. Árpád, I., Timár, I.: Elérhető hőtárolási lehetőségek a napenergia hasznosításban.  
Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2013 *Konferencia Kiadvány*,  
*pp.: 24-27, 2013, ISSN 2068-1267.*
11. Árpád, I.: A direkt sugárzásból származó magyarországi napenergia potenciál  
összehasonlító vizsgálata. *Energiagazdálkodás*, (megjelenés alatt), a cikk beküldésének  
ideje: 2013. január, *ISSN 0021-0757.*
10. Árpád, I., Timár, I.: Characterization of Sensible Heat Storage.  
*Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*  
(*ISSN1584-2673*), X.3., *pp.: 247-252, 2012.*
9. Árpád, I., Timár, I.: A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A  
hőtároló méretének és hőszigetelésének optimalálása.  
Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, Környezettudományi Doktori Iskolák  
Konferenciája 2012., *Konferencia kiadvány*, *pp.: 56-63, ISBN 978-963-284-242-4.*
8. Árpád, I., Timár, I.: A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A  
hőtároló méretének és hőszigetelésének optimalálása.  
Pannon Egyetem, XXIV. Nemzetközi Karbantartási Konferencia 2012., *Konferencia*  
*kiadvány*, *pp.: 161-168, ISBN 978-615-5044-56-4.*
7. Árpád, I., Timár, I.: A hőtároló és a hőszigetelésének optimális méretezése.  
Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2012 *Konferencia Kiadvány*,  
*pp.: 38-41, 2012. ISSN 2068-126.7*
6. Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a hazai napenergia hasznosításban.  
Pannon Egyetem, *Ünnepi Konferencia Kiadvány Dr. Timár Imre 60. születésnapjára*,  
*2012., pp.: 31-40, ISBN 978-963-87408-9-2.*
5. 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), ISSN*  
*0133-0276.*

4. Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a hazai napenergia-hasznosításban.  
*Energiagazdálkodás, 52.évf. 6. szám, pp.: 7-10, 2011. ISSN 0021-0757.*
3. Árpád, I.: Investigation of the Sensible Heat Storage and the Heat Insulation in the Exploitation of Solar Energy.  
*Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering (ISSN 1584-2673), IX.3. pp.: 41-45, 2011.*
2. Árpád, I.: A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a napenergia-hasznosításban. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT 2011 *Konferencia Kiadvány, pp.: 31-35, 2011. ISSN2068-1267.*
1. Timár, I., Árpád, I.: Csővezetékek hőszigetelésének optimalálása.  
*Energiagazdálkodás, XXVII. évf. 10. szám, pp.: 449-455, 1986. ISSN0021-0757.*

Egyéb témában megjelent publikációk listája:

1. Árpád, I., Argyelán, J., Pintér, T., Patek, G.: Theoretic Investigation of the Protective Oxide Layer's Formation in the Water-Steam-Cycle of Modern Nuclear Power Plant.  
*Power Plant Chemistry, (leadva 2012. szeptemberében, kiadás folyamatban).*

## A SZERZŐ ELŐADÁSAI

A kutatási témában tartott előadások listája:

12. **XXI. Nemzetközi Gépész Találkozó – OGÉT 2013. Konferencia**, Arad, Románia  
2013. április 25-28.  
Szervező: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)  
Előadás tartása a „Technológia és anyag tudomány” szekcióban magyar nyelven.  
**Az előadás címe:** *Elérhető hőtárolási lehetőségek a napenergia hasznosításban.*
11. **Környezettudományi Doktori Iskolák Konferenciája**. Eötvös Lóránd  
Tudományegyetem, Budapest, 2012. augusztus 30-31.  
Szervező: ELTE Környezettudományi Doktori Iskola  
**Az előadás címe:** *A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A hőtároló méretének és hőszigetelésének optimalása.*
10. **XXIV. Nemzetközi Karbantartási Konferencia**. Pannon Egyetem, Veszprém, 2012.  
június 4-5.  
Szervező: Pannon Egyetem Gazdaságtudományi Kar  
**Az előadás címe:** *A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei. A hőtárolóméretének és hőszigetelésének optimalása.*
9. **XX. Nemzetközi Gépész Találkozó – OGÉT 2012. Konferencia**, Kolozsvár, Románia  
2012. április 19-22.  
Szervező: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)  
Előadás tartása a „Technológia és anyag tudomány” szekcióban magyar nyelven.  
**Az előadás címe:** *A hőtároló és hőszigetelésének optimális méretezése.*
8. **MTA Természettudományi Kutatóközpont**, Budapest, 2012. március 29.  
Szervező: MTA Műszaki Kémiai Bizottságának Anyagtudományi és Szilikátkémiai  
Munkabizottsága  
**Az előadás címe:** *A fókuszált napenergia tárolási és hasznosítási lehetőségei.*
7. **MTA**, Budapest, 2012. március 14.  
Szervező: MTA Műszaki Kémiai Bizottságának Vegyipari Gépészeti Munkabizottsága  
**Az előadás címe:** *Hőtároló és hőszigetelésének optimális méretezése.*

6. **Pannon Egyetem Nemzetközi Ünnepi Konferencia Timár Imre 60. születésnapjára.**  
Pannon Egyetem, Veszprém, 2012. február 10.  
Szervező: Pannon Egyetem Mérnöki Kar és a PEGMI  
**Az előadás címe:** *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a hazai fókuszált napenergia-hasznosításban.*
5. **„PhD hallgatók anyagtudományi napja XI.” konferencia.** Pannon Egyetem,  
Veszprém. 2011. november 28.  
Szervező: Az MTA Műszaki Kémiai Tudományos Bizottság Anyagtudományi- és Szilikátkémiai Munkabizottsága  
**Az előadás címe:** *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a fókuszált napenergia hasznosításában.*
4. **MTA VEAB,** Veszprém, 2011. október 21.  
Szervező: MTA VEAB Műszaki Szakbizottság Környezetvédelmi Technológiák Munkabizottsága  
**Az előadás címe:** *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a fókuszált napenergia hasznosításban.*
3. **II. Mobilitás és Környezet Konferencia.** Pannon Egyetem, Veszprém.  
2011. augusztus 29 – szeptember 01.  
Előadás tartása a „Bio- és megújuló energiaforrások” szekcióban magyar nyelven.  
**Az előadás címe:** *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a napenergia-hasznosításban.*
2. TÁMOP 4.2.2 projekt: A régió és a Dunaújvárosi Főiskola válaszai az anyag tudomány és anyagtechnológia új kihívásaira.  
**„Felfedezőúton a nagy teljesítőképességű acélok anyagtechnológiájában”**  
elnevezésű konferencia. Dunaújváros, 2011. június 7 – június 9.  
Szervező: Dunaújvárosi Főiskola,  
**Az előadás címe:** *Hőszigetelés, hőtárolás optimalása.*
1. **XIX. Nemzetközi Gépész Találkozó – OGÉT 2011.** Konferencia, Csíksomlyó,  
Románia, 2011. április 28 – május 01.  
Szervező: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT)  
Előadás tartása a „Technológia és anyagtudomány” szekcióban magyar nyelven.  
**Az előadás címe:** *A hőtárolás és a hőszigetelés vizsgálata a napenergia-hasznosításban*

Egyéb témában tartott előadások listája:

2. **„PhD hallgatók anyagtudományi napja XII.” konferencia.** Pannon Egyetem, Veszprém. 2012. november 12.

Szervező: Az MTA Műszaki Kémiai Tudományos Bizottság Anyagtudományi- és Szilikátkémiai Munkabizottsága

**Az előadás címe:** *Új korróziós jelenség a modern hőerőművekben. A kialakulás elméleti vizsgálata.*

1. **40. Műszaki Kémiai Napok 2012. MTA VEAB Vegyipari Műveleti Munkabizottság Ülése.** Pannon Egyetem, Veszprém, 2012. április 24-26.

Szervező: Pannon Egyetem Mérnöki Kar és az MTAVEAB VMMB

**Az előadás címe:** *Új korróziós veszélyek a modern hőerőművek víz-gőz körfolyamatában.*

## KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Egy doktori disszertációt csak úgy lehet jól és örömmel, lelkesedéssel elkészíteni, ha léteznek olyan személyek is, akik támogatják, segítik a jelölt munkáját. A támogatásnak persze sokféle formája létezik. Vannak, akikkel hasznos konzultációt lehet folytatni a tudományról, szaktanácsot adnak, utat mutatnak a rengetegben, bevezetnek a tudományos életbe, megmutatják, hogyan kell cikket írni, eljönnek az előadásokra, odafigyelnek a szakmai dolgokra; vannak, akik lelkiileg támogatják az embert; mások a nyugodt magánéleti háttérrel biztosítják a munka elvégzéséhez és vannak olyanok is, akik egyszerre többféle támogatást is nyújtanak. Azonban mindegyik támogatás egyformán fontos és nélkülözhetetlen.

Mégis legelőször Dr. Timár Imre professzor úrnak szeretnék köszönetet mondani. Hálás vagyok a sorsnak, hogy a tanítványa lehettem és lehetek ma is. Szakmai és emberi hozzáállása példaként áll előttem.

Köszönetet szeretnék mondani a Pannon Egyetem Gépészmérnöki Intézet összes munkatársának. Stumpfhauser Józsefnének (Zsuzsának), Dr. Verdes Sándor tanár úrnak, Dr. Horváth Pál tanár úrnak, Zsíros László tanár úrnak, Dr. Bálint András tanár úrnak, Lisztes István, Borbély Tibor és Dr. Kulcsár Tamás tanár uraknak, és az itt fel nem sorolt tanszéki munkatársaknak is, mindenkinek, kivétel nélkül, mert befogadtak és a munkámban, ahol csak lehetett, jó szívvel, kérés nélkül is segítettek, támogattak.

Ugyanezt a pozitív emberi magatartást tapasztaltam a Pannon Egyetem más tanszékein dolgozó oktatóktól is. Úgy éreztem, valós érdeklődéssel figyelik munkámat, és ha kellett támogattak, szántak rám időt. Még ma is érezni a néhai, kicsi, manufakturális képzést nyújtó Veszprémi Vegyipari Egyetem családi hangulatát.

Továbbá ezúton is szeretnék köszönetet mondani Molnár Erzsébetnek, aki biztosította és biztosítja számomra a nyugodt, stabil, magánéleti háttérrel, a nyugodt otthont.

Az itt megemlített személyek nemcsak hittek bennem, hanem azt ki is mutatták. Hittek ők is abban, hogy a kitűzött célt elérhetem és ebben éveken keresztül támogattak, segítettek.

Nagyon szépen köszönöm.

Budapest, 2013. február

Árpád István

# FÜGGELÉK

## Családi ház hőtárolása – számítási lépések

1. A gyakorlati tapasztalat és az irodalom alapján meghatároztam egy képzeletbeli lakóház fűtésére és a használati melegvíz előállítására fordított havi energiaigényeit. A havi energiaigények adják a havi energiafogyasztást.

A havi energiafogyasztási értékeket összesítve megkaptam az éves energiaigényt.

2. A havi magyarországi napsütéses órák száma és az átlagteljesítmény alapján meghatároztam az  $1\text{m}^2$  napsugárzásra merőleges felületről havonta begyűjthető fókuszált napenergia mennyiségét.
3. Az 1-es pontban meghatározott energiaigényből kiszámítható, hogy hány  $\text{m}^2$  napsugárzásra merőleges felületről gyűjthető be egész év alatt a lakóház éves energiaigénye.

A havi napsütéses órák száma alapján az előbbieken meghatározott, az éves energiaigény begyűjtésére képes napsütésre merőleges felület méretének ismeretében meghatároztam a havonta begyűjthető napenergia mennyiségét. Ezek a havi energia begyűjtési adatok.

4. A két adatsort összevetve meghatározható a lakóház energiaellátásához szükséges minimális tároló kapacitás.

A tároló kapacitásából a hőtároló anyag térfogati hőkapacitásának ismeretében pedig kiszámítottam a lakóházhoz szükséges tároló térfogatát.

5. Minden hónapban van egy begyűjtött energia érték és egy fogyasztási energiaérték. A kettő különbsége megadja, hogy mennyi energiát kell (előjeltől függően) a tárolóba tenni illetve onnan kinyerni. Így megkaptam, hogy egy adott hónapban mennyi energiátartalma van a tárolónak a tároló minimálisan megengedett hőmérséklete ( $T_{\min}$ ) felett.

A tároló adott hónapra vonatkozó energiátartalmából, a térfogati hőkapacitásból és a tároló térfogatából kiszámítható a tároló minimálisan megengedett hőmérsékletét ( $T_{\min}$ ) növelő hőmérséklet emelkedés mértéke. Ezt hozzáadva a  $T_{\min}$  értékhez, megkapjuk a tároló adott hónapra érvényes közepes hőmérsékleti értékét.<sup>9</sup>

6. A havi környezeti átlaghőmérsékletet és a tároló havi közepes hőmérsékleti értékét ismerve, valamint a hőszigetelőanyag rétegvastagságának ismeretében kiszámítható a tároló és a környezete közötti fajlagos hőáram nagysága.

---

<sup>9</sup> A fajlagos térfogati hőkapacitást, a sűrűséget a dolgozatban leírtak szerint állandónak tekintettem, ugyanígy a tárolót belül, a belső oldali hőátvitelt tekintve is, hőellenállás nélkülinek tekintettem.

Ennek kiszámításához meg kell határozni a tárolót borító hőszigetelőanyag külső falhőmérsékletét. Ezt numerikus úton, léptetéses módszerrel lehet meghatározni. Feltételeztem egy a környezeti hőmérsékletnél egy önkényesen megválasztott lépésközzel nagyobb külső falhőmérsékletet. Ezzel a feltételezett külső falhőmérséklettel kiszámítottam a hőszigetelő rétegen keresztüli vezetési hőáramot és a feltételezett külső falhőmérséklet és a környezet közötti átadási hőáramot is. A helyes külső falhőmérséklet esetén a két hőáram (a hőszigetelő rétegen keresztüli, valamint a külső fal és a környezet közötti hőáram) megegyezik. A külső falhőmérséklet léptetését a két hőáram egyező értékének eléréséig végeztem.

A hőszigetelő rétegen keresztüli hőáram kiszámításánál figyelembe kell venni, hogy a hőszigetelőanyag hővezetési tényezője függ a hőmérséklettől, azaz különböző hőmérsékleti szinteken a hővezetési tényező értéke különböző. Ennek közelítő számítását, figyelembe vételét, oly módon végeztem, hogy hőmérsékleti tartományokat képeztem (100°C alatti, 101-200°C közötti, 201-300°C közötti és 301-400° közötti), majd ezekhez a tartományokhoz rendeltem egy átlag (közepes) hővezetési tényezőt. Termikusan így felépítve az adott vastagságú azonos anyagból készült hőszigetelő réteget, minden hónapban különböző, termikus értelemben véve többrétegű hőszigetelést kaptam és a kapott többrétegű hőszigeteléssel számoltam.

7. A havi hőáramok ismeretében már kiszámítható az adott térfogatú és felületű tároló havi átlagos hővesztesége.

A havi hőveszteségeket összesítve pedig megkapjuk az éves hőveszteséget (amit természetesen szintén fedezni kell majd az energia begyűjtésénél).

8. Az éves hőveszteséget vonatkoztatva a lakóház energiaigényéhez –a 3.3.3 fejezetben erre vonatkoztattam-, vagy az évi teljes begyűjtött energiataralomhoz, kapunk egy fajlagos energiahasznosítási mutatót, hatásfokot.
9. A különböző méretű tárolók fajlagos hőveszteségei a méret növelésével csökkentek. Ezt mutatja a 3.3.3-2 és 3.3.3-3 táblázat.