



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Épületszerkezeti elemekbe integrálható héjszerkezetű napkollektorok

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Fekete István

Gödöllő
2015

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Környezetipari Rendszerek Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	5
2.1. Modellezés, szimuláció módszerei	5
2.2. Épületelem kollektor matematikai modellezése	7
2.3. Próbatest kísérletek módszere	7
2.4. A mérőrendszer kialakítása	8
2.5. Kollektor hatásfok meghatározás módszere	8
2.6. Adatfeldolgozó rendszer és eljárás	9
3. EREDMÉNYEK	10
3.1. Épületelem kollektor modellezése	10
3.2. Épületelem kollektor szerkezeti optimalása	13
3.3. Cserépelem kollektor hőtani vizsgálata	14
3.4. Kollektor hatásfok görbe meghatározás	17
3.5. Eljárás a kollektor hatásfok görbe pontossági minősítéséhez	22
3.6. Eljárás a kollektorok gazdaságossági számításához	22
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	24
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	27
6. ÖSSZEFOGLALÁS	28
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	29

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A napkollektorok kiválasztásánál, beépítésénél, az esztétika is jelentős tényező, elhelyezésük leggyakrabban házak, épületek tetőszerkezete, ezért olyan kialakítást tervezek, mely az épületek megjelenési formáját nem alakítja át, mégis lehetőség van a napenergia aktív hasznosítására.

Az épületszerkezeti elemekbe integrálható kollektorok eléréséhez a következő feladatok elvégzése szükséges.

1. Matematikai modell kialakítása az anyagok felületére érkező napsugárzási energia elnyelődési és a mélyebb rétegekbe történő hővezetési folyamatának vizsgálatára, az elméleti folyamatok szimulációjának végzése a valóságos kísérleti elemek előzetes kialakításához szükséges adatok pontosításához.

2. Próbatestek kialakítása különböző felületi bevonatokkal és réteg elrendezésekkel, melyek segítségével vizsgálom a valós környezetben lévő elemek napsugárzás elnyelődési, visszaverődési, hőegyensúlyi folyamatait.

3. Kollektor testek kialakítása az elméleti számítások, a szimulációs eredmények és a próbatesteken végzett mérések alapján, melyek egyben épületszerkezeti elemként is funkcionálnak.

4. Vizsgáló berendezés létrehozása, mely alkalmas a napsugárzás elnyelődését befolyásoló tényezők változásait követni. Alkalmas a mérendő kollektortestek különböző tájolások és beesési szögekhez beállított hőtechnikai, ill. összehasonlító méréseinek elvégzésére.

5. Módszer kidolgozása a napkollektorok hatásfok számításának üzemi körülmények közötti módjára. A mérések pontos megtervezésével, megfelelő matematikai módszerek segítségével a szokásos laboratóriumi minősítések kiváltását vizsgálom.

6. Vizsgálom a hőmérséklet mérő műszerek pontosságának hatását a kollektor hatásfok görbe meghatározására, az aránytalanul költséges minősítési eljárások kiszűrése érdekében.

7. Gazdaságossági számítások értékelő elemzése. A közgazdasági, pénzügyi megtérülési eljárások kibővítése műszaki jellemzőkkel, a napkollektorok gazdaságos alkalmazhatóságára a melegvíz ellátás és a fűtésrészegítés területén.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben mutatom be azokat az eszközöket és módszereket, amelyek segítségével az új típusú, épületszerkezeti elemként is hasznosítható, héjszerkezetű, napkollektor kialakítására, fejlesztésére, vizsgálatára sor került.

2.1. Modellezés, szimuláció módszerei

A folyadék munkaközegű, épületszerkezeti elemként is használható kollektortestek termikus viszonyait, a hőátviteli folyamatainak modellezése és szimulációja segítségével elemzem. A feladat a fedés nélküli kollektortest hőtechnikai modellezése. A modell matematikai modelljéhez szükséges a hőtani egyenletek kollektor testekre való alkalmazásának feltételeit vizsgálom és a megfelelőség alapján választom ki a további számításokhoz.

2.1.1. Hősugárzás leíró egyenletei

A *hősugárzás (radiáció)* olyan energiaátadási mód, amikor az energia az egyik testről a másikra elektromágneses hullámok (EMH-ok) formájában kerül át. Planck igazolt feltevése, hogy a részecskék rezgőmozgása, során is érvényes az energia kvantáltsága, azaz a részecskék alkotta, különböző frekvenciákon rezgő egyes oszcillátorok csak a rájuk jellemző frekvenciának megfelelő:

$$E = h \nu, \text{ [J]}, \quad (2.1)$$

energia egységekben vehetik fel, illetve adhatják le az energiát. A (2.1) egyenletben h a Planck-állandó ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), ν az egyes oszcillátorok rezgési frekvenciája [1/s]. Ez alapján, statisztikai úton, a Boltzmann-eloszlást felhasználva a Planck-féle sugárzási törvény:

$$E(\nu) = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \text{ [J]} \quad (2.2)$$

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

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:

$$E = E^r + E^a + E^t, \quad (2.3)$$

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

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 (ϵ) jelenít meg.

2.1.2. Hővezetés leíró egyenletei

A *hővezetés (vagy kondukció)* az energiacsere azon formája, amikor a hőmérsékletkülönbség 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.

Nem állandósult állapotú hővezetés szilárd testekben

A nem állandósult (instacionárius) folyamatok a testek lehülésével vagy felmelegedésével függenek össze. A jelenséget előidézheti 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

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0. \quad (2.4)$$

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

2.1.3. Hőátadás leíró egyenletei

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

$$\dot{Q}_a = \alpha A (T_w - T_f), \quad (2.5)$$

$$\dot{q}_a = \alpha (T_w - T_f), \quad (2.6)$$

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

2.2. Épületelem kollektor matematikai modellezése

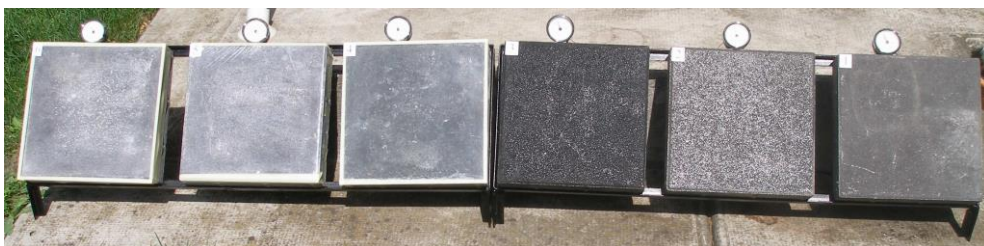
A dolgozatomban a számítások elvégzéséhez a MATLAB speciális programrendszert használok, amelyet numerikus számítások elvégzésére fejlesztettek ki és emellett egy programozási nyelv is. Az épületbe integrált kollektor elemek termikus viselkedését szimulációs módszer segítségével elemeztem. A hővezetés differenciál egyenletét alapul véve, az egyik elem a következőnek adja át az energiát, a térrész energia egyensúlya pedig a be-, és kilépő hőközvetítő anyag térfogatáramától függően alakul ki.

A matematikai szimuláció (Matlab) elvégzéséhez az alábbi egyenletek felírása szükséges: a cserépelem felülete a környezet felé, a cserépelem térfogata, tömege, a cserépelemet érő "hasznos" napsugárzás intenzitása, a víz és a kollektor elem közötti hőegyensúly, a kollektor elem és a környezet közötti hőegyensúly, a kollektor elemekben lévő (munkaközeg (víz) időbeli hőmennyiség változása, összegző egyenlet a kollektor elem hőmérsékletére, összegző egyenlet a munkaközeg hőmérsékletére.

2.3. Próbatétel kísérletek módszere

A dolgozatomhoz szükséges volt vizsgálni az épületszerkezeti elemként is funkcionáló anyagok napsugárzás elnyelő képességét és a felületi hőmérsékletek alakulását, annak időbeli dinamikáját.

A méréseket különböző kialakítású felületekkel végeztem, a tényleges napsugárzási energia elnyelődésének megállapítására. A 2.1. ábrán látható a próbatétel méréshez való előkészítése.



2.1. ábra Felületi hőmérséklet mérés elrendezés

2. Anyag és módszer

A kísérletek mérési eszközei

A felületek hőmérsékletének mérésére infra hőmérőt használtam. Az infra hőmérés elvéből adódóan a tárgyak hőmérséklete ellenőrizhető. Hőmérséklet mérési tartomány $-30, +260$ °C, hőmérséklet felbontás 0.1 °C, pontosság $\pm 2\% \pm 2$ °C. A hőmérsékleteket mértem a felület alatt is, 10 mm mélységben, megállapítására kapilláris csöves hőmérő órákat alkalmaztam, skála beosztása 1 °C fok, így a leolvasás pontossága $\pm 0,5$ °C.

2.4. A mérőrendszer kialakítása

Az elméleti számítások igazolásához szükséges vizsgálatokat saját tervezésű és kivitelezésű kísérleti berendezésen végeztem. Két körös (Szolár és HMV) kiépítés biztosítja a megfelelő szétválasztást és a jobb szabályozhatóságot. A két kör közötti kapcsolatot külső hőcserélő biztosítja. A keringetés három fokozatú szivattyúk segítségével történik. Az összekötéseket rézcsövek segítségével valósítottuk meg.

2.5. Kollektor hatásfok meghatározás módszere

A kollektorban lévő folyadék melegedését szükséges mérni a napsugárzás intenzitásának és a kollektorban áramló folyadék térfogatáramának a függvényében. Ezt követően összefüggés keresünk a napkollektor felületére eső globális sugárzás nagysága és a kollektor termikus hatásfoka között.

A jelenséget leíró vizsgálati paraméter a hatásfok (η), mely a kollektor termikus hatásfok változását írja le. A vizsgálati paraméterre ható faktorok: a napsugárzás intenzitása (I_g), a kollektor körüli levegő hőmérséklete (T_a), a kollektorban áramló hőelvezető folyadék közepes hőfoka (T_m), a kollektorba belépő folyadék hőmérséklete (T_{in}), a kollektorból kilépő folyadék hőmérséklete (T_{out}), és a kollektor közepes hőfok és környezeti hőmérséklet különbsége ($T_m - T_a$).

A kollektoron átáramló közeg mennyiségét melegvízes mérőóra segítségével határozom meg. A mérő pontossága ± 0.1 liter.

A megmért adataim kiértékelésére a faktoriális kísérleti módszert alkalmazom. Ez a módszer általánosan használható, a szakirodalmi kutatásaim szerint azonban napkollektor hatásfok függvény meghatározására nem használták korábban.

2. Anyag és módszer

Az alkalmazással a céljaim a következők:

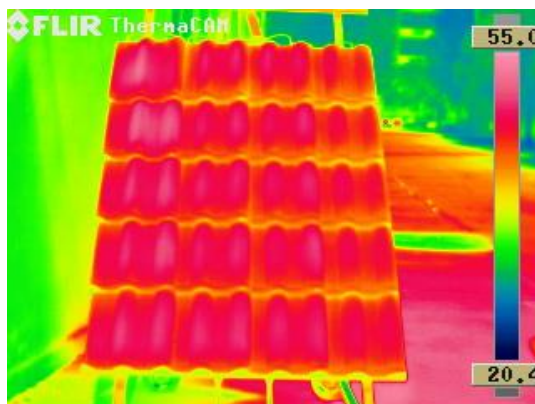
- a fent felsorolt faktoroknak a napkollektor hatásfok megváltozására gyakorolt hatásának vizsgálata, az elhanyagolható faktorok elhagyása,
- (η), mint vizsgált jelenség szélsőértékét meghatározó faktorértékek megállapítása,
- adott értelmezési tartományban a hatásfok megváltozása és a vizsgált faktorok (G , ΔT) függvénykapcsolatának meghatározása.

2.6. Adatfeldolgozó rendszer és eljárás

Mérési adatfeldolgozás során a nagy mennyiségű adat rögzítését, kiértékelését számítógéppel segített módszerekkel kívánjuk elérni, melyek így alkalmasak lesznek későbbi elemzések készítéséhez is. Elkészítettünk egy mérés adatgyűjtő és kiértékelő szoftvert amely segíti a további munka végzését.

Hőmérséklet eloszlás mérése, értékelése

A kollektor felületek hőmérséklet eloszlása nehezen mérhető hagyományos hőmérsékletmérő eszközök segítségével. Ezért a hőmérsékletek észlelésére és a modellezett, számított értékek igazolására infra kamerás felvételeket alkalmaztam. Az infra kamerás felvételek pontossága szoftveresen ± 0.1 °C, a 2.2. ábra mutatja a felvétel jellegét.



2.2. ábra Mért elemek felületi hőmérséklet eloszlása

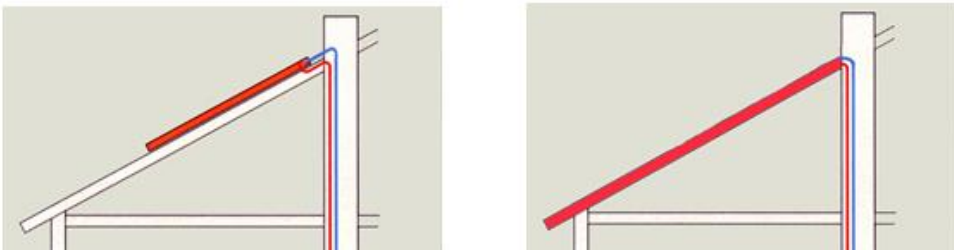
A hőképek értékelése során nem hőmérsékleteket azonosítunk, hanem sugárzás intenzitás szinteket. A korszerű infrakamerákban a beállítás szabadon megválasztható, de vannak az észleléshez ajánlott megszokott beállítások (színskálák) is, színskálára példa a 2.2. ábra jobb oldala.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatom azokat új tudományos eredményeket, módszereket, eljárásokat és ezek alkalmazhatósági korlátaira közlök megállapításokat, melyekkel az új típusú kollektortestek kialakítása történik.

3.1. Épületelem kollektor modellezése

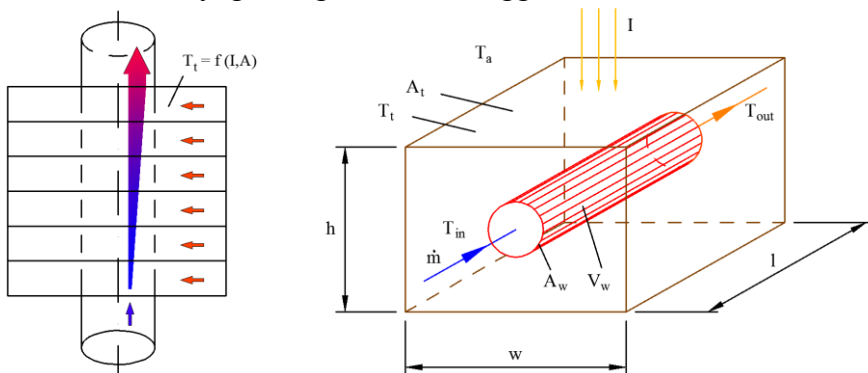
A szakirodalmi áttekintés igazolja, hogy az emberek a napenergia hasznosító kollektorokat nemcsak hasznosságuk alapján, hanem esztétikai szempontok szerint is értékelik. A kutatási munkám erre az alapgondolatra épült fel. A hagyományos kollektorok mellett megvizsgálni ezt a területet, mennyire van létjogosultsága egy olyan megoldásnak, mikor az épületszerkezeti elemek a napenergia befogására is alkalmasak (3.1. ábra).



3.1. ábra A hagyományos és az új kialakítású rendszer

A napsugárzási energia elnyelődési, hővezetési folyamatának matematikai modellje és szimulációja

A hővezetés differenciál egyenletét alapul véve, az egyik elem a következőnek adja át az energiát, a térrész energia egyensúlya pedig a be-, és kilépő hőközvetítő anyag térfogatáramától függően alakul ki (3.2. ábra).



3.2. ábra Az elnyelő elem felosztása, elemi kialakítása, termikus egyensúlya

3. Eredmények

Az épületelem kollektor hőtechnikai modelljének kialakításához, szükséges megadni a környezeti változókon kívül a geometriai kialakítás adatait, a felhasznált anyag fizikai jellemzőit.

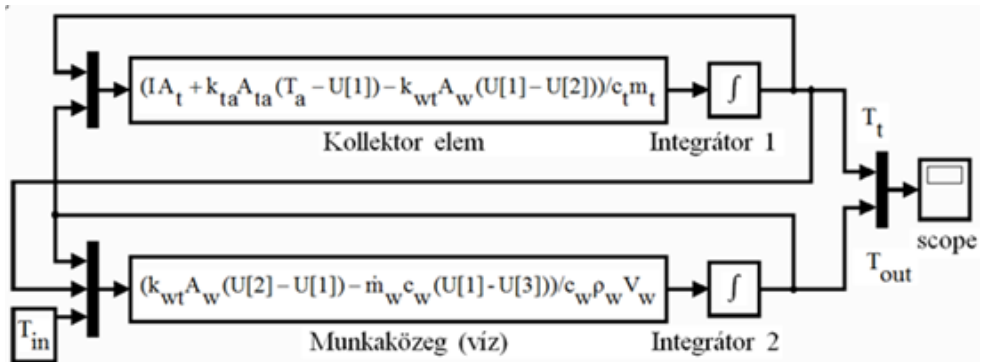
A matematikai szimuláció futtatáshoz szükséges egyenletek:

$$\dot{T}_t = \frac{IA_t + k_{ta}A_{ta}(T_a - T_t) - k_{wt}A_w(T_t - T_{out})}{c_t m_t}, \quad (3.1)$$

$$\dot{T}_{out} = \frac{k_{wt}A_w(T_t - T_{out}) - \dot{m}_w c_w (T_{out} - T_{in})}{c_w \rho_w V_w}. \quad (3.2)$$

A kollektorból kilépő munkaközeg hőmérsékletének megállapítása az elemi részek hőegyensúlyi állapotának egymás utáni összegzése alapján állapítható meg. A 3.1 – 3.2 egyenletek alapján levezetett matematikai szimulációs folyamatábra látható a 3.3. ábrán az alábbi változók bevezetésével:

$$U[1] = \dot{T}_t ; U[2] = \dot{T}_{out} ; U[3] = T_{in}. \quad (3.3)$$



3.3. ábra Épületelem kollektor szimulációs ábrája

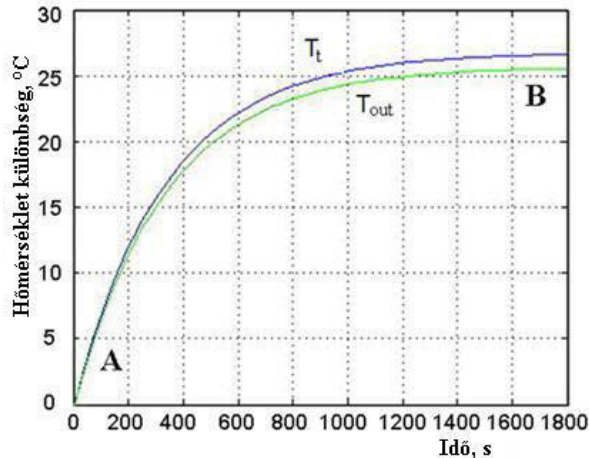
Az 3.1. táblázatban látható a matematikai szimuláció (Matlab) futtatásánál használt változók és értékeik felsorolása.

3.1. táblázat a szimulációhoz használt értékek és jelölések

Változó	Érték	Változó	Érték	Változó	Érték
l	2.5 m	c _t	900 J/kgK	m	0.01 kg/s
d _w	0.005 m	c _w	4196 J/kgK	ρ _w	1000
ρ _t	2000	w	0.02 m	T _a	20 °C
h	0.015 m	I	600 W/m ²	T _{in}	18 °C
k _{te}	20 W/m ² K	k _{wt}	150 W/m ² K		

3. Eredmények

A 3.4. ábra példaként mutatja egy adott értékekkel lefutott matematikai szimuláció eredményét. A fenti paraméterek alapján a felület hőmérséklete (ΔT_t) közel 27 °C felmelegedést mutat a környezet hőmérsékletéhez képest. A kilépő munkaközeg hőmérséklet változása (ΔT_{out}), 25 °C körüli érték, 18 °C belépő hőmérséklet (T_{in}) esetén.



3.4. ábra Számított hőmérséklet különbség értékek a felületre és a kilépő közegre

A változók érzékenységi vizsgálata

A 3.2. táblázatban látható a változók felsorolása és a hozzájuk tartozó érzékenységi terület. Az eredmények a szükséges kísérleti elemek elkészítésének optimalizálásához adnak segítséget.

3.2. táblázat A befolyásoló tényezők (változó tényezők szürkével kiemelve)

Változó	Leírás
beépített csőhossz (l):	a hőátadás optimalizálása, elemek sorba kötési száma
cső átmérő (d_w):	átmérő optimalizálás, $d_w < h$, w ; $d_w < w$ szilárdságilag, $d_{wmax} \sim h/2$, $w/2$
munkaközeg térfogat áram (\dot{m}):	a közeg áramlási sebessége, szivattyú kiválasztás
cső térfogat (V_w):	hőátadásra van hatással
cső felület (A_w):	hőátadásra van hatással
munkaközeg fajhő (c_w):	eltérő munkaközegek vizsgálata
munkaközeg sűrűség (ρ_w):	eltérő munkaközegek vizsgálata

3.2. Épületelem kollektor szerkezeti optimalása


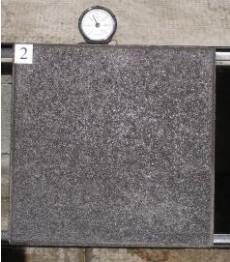



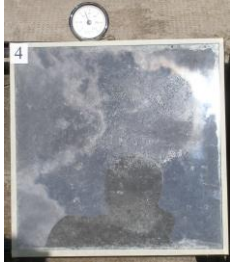
A napsugárzási energia elnyelődés mérései

Méréseket végeztem különböző kialakítású felületekkel, a tényleges napsugárzási energia elnyelődésének megállapítására (3.5. ábra). Amennyiben időegység alatt a felületegységre érkező I_g sugárzási energiából hővé alakult energia megegyezik a felületegységről eltávozó hőenergiával, akkor egyensúly áll be, és az elnyelő anyagban egy T_t állandósult hőmérséklet alakul ki:

$$I_g \alpha = E_{11} + E_{12} \cong f (T_t - T_a), \quad (3.4)$$

ahol, f - arányossági tényező. Az f arányossági tényező függ az elnyelő felület anyagától, kialakításától, minőségétől, a környező tárgyak távolságától, hőmérsékletétől, valamint a légáramlástól. Így pl. $I_g = 600 \text{ W/m}^2$ -es bejövő sugárzásnál, $T_a = 20 \text{ °C}$ környezeti hőmérsékleten a durva, szürke színű beton felület (3.5c ábra) várható hőmérséklete (1 m/s szélsébség esetén: $f = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_{conc} = 0,60$):

$$T_t \cong \frac{I_g \alpha_{conc}}{f} + T_a = \frac{600 \cdot 0,6}{20} + 20 = 38 \text{ °C}.$$

A különböző felület kiképzésű próbatestek		
		
a) Fekete festett felület	b) Lakkozott felület	c) Natúr felület
		
d) Plexi felület (1 mm)	e) Vékony fólia felület	f) Üveg felület (2 mm)

3.5. ábra Különböző felület kialakítású próbatestek

3. Eredmények

Ha a napsugárzást elnyelő abszorber felületet egy átlátszó réteggel lefedjük, a hőveszteség lecsökken, és a test hőmérséklete azonos I_g bejövő sugárzásnál megnövekszik. Így a betonból készült elnyelő felület hőmérséklete, ha egyrétegű üveg mögött van és környezetétől ideálisan el van szigetelve, akkor $E_g = 600 \text{ W/m}^2$ -es bejövő sugárzásnál $T_a = 20 \text{ °C}$ környezeti hőmérsékleten ($\alpha_{\text{conc}} = 0,6$, $\beta = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $a_{\text{gl}} = 0,8$):

$$T_t = \frac{I_g a_{\text{gl}} \alpha_{\text{conc}}}{\beta} + T_a = \frac{600 \cdot 0,8 \cdot 0,6}{5} + 20 \cong 77,6 \text{ °C}$$

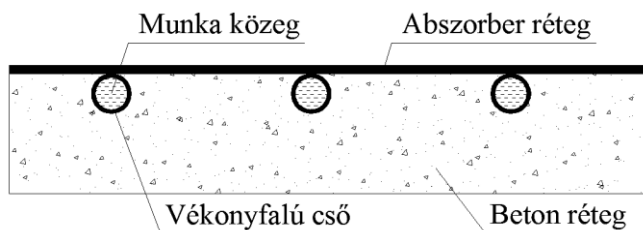
Ha az E_c hasznosított teljesítmény 200 W/m^2 , akkor egyrétegű üvegezés mögött az elnyelő felület hőmérséklete 200 W/m^2 -es hőteljesítmény elvezetése esetén:

$$T_t = \frac{I_g a_{\text{gl}} \alpha_{\text{co}} - E_c}{\beta} + T_a = \frac{600 \cdot 0,8 \cdot 0,6 - 200}{5} + 20 \cong 37,6 \text{ °C}$$

A keletkezett energia áramló folyadék vagy gáz (levegő) közeg segítségével vezethető el, hasznosítható. Az eredmények alapján a fedetlen felületek dinamikusabban viselkedtek, míg a fedett felületek lassabb felmelegedést illetve lehűlést mutattak.

3.3. Cserépelem kollektor hőtani vizsgálata

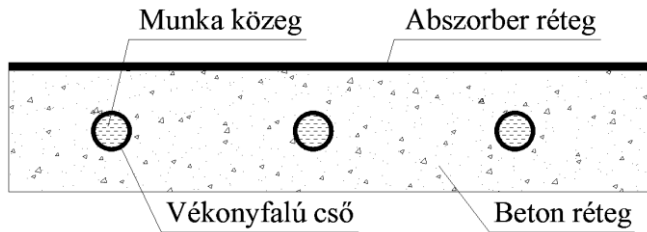
A napkollektorok elhelyezése legtöbbször tetőfelületre történik és mivel a fő célom, ezek esztétikai okokból történő kiváltása, ezért használtam a betoncserép formát. A betoncserép formája, méretei korlátokat adtak a hőcserélő rész kialakításában, elhelyezésében. Az optimális csőtávolságtól el kellett térni az eredeti betoncserép formai sajátosságai miatt. Az első gyártásnál a hőcserélő részt, a jobb hőátadási folyamatok miatt, közel terveztem az abszorber réteghez. Ez a kialakítás azonban szilárdsági okok miatt nem lett megfelelő (3.6. ábra).



3.6. ábra A beton elem réteg kialakítása

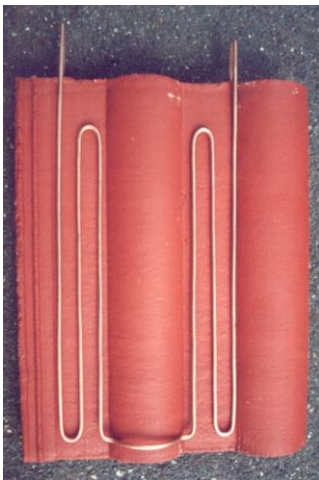
3. Eredmények

Az átalakított, szilárdságilag megfelelő elemek festett felülettel készültek el, a rétegtervi kialakításuk a 3.7. ábrán látható.



3.7. ábra A beton elem réteg kialakítása

A ténylegesen legyártott cserépelemet mutatja a 3.8. ábra, szemléltetésképpen az anyagában elhelyezett hőcserélőt a felületen helyeztem el, a 3.9. ábrán a teljes felület kialakítás látható.



3.8. ábra A legyártott cserépelem



3.9. ábra Az állványzatra helyezett cserépkollektor felület (~2m²)

A mérőrendszer kialakítása

Komplett rendszer terveztem és építettünk a vizsgálatok elvégzéséhez. Kialakított rendszer alkalmas összehasonlító mérések elvégzésére, szükség szerint bővíthető, továbbfejleszthető. A besugárzás szöge évszakonként és napszakonként változó, ezért a kollektor optimális energia felvétele szempontjából fontos, hogy az a napsugárzás irányába álljon. A megvalósított berendezésnél a kollektort tartó állvány hajlásszöge (30°- 45°) és oldalszöge (0° - 360°) között állítható. A 3.10a ábrán a teljes felület kötési kialakítása, a 3.10b részen pedig a közelebbi kötés kialakítások láthatók.

3. Eredmények



a)

b)

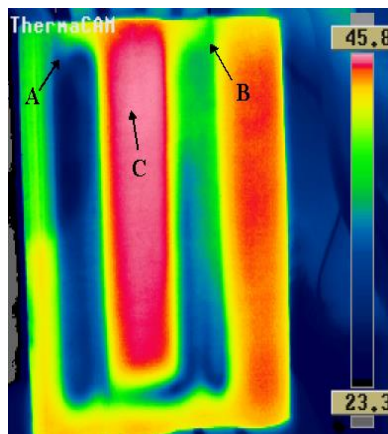
3.10. ábra A cserépkollektor hátoldali felülete

Mérési adatok rögzítése, tárolása

A mérések során keletkezett nagy mennyiségű adat rögzítését, kiértékelését számítógéppel segített módszerekkel végeztem, így az adatok alkalmasak lesznek későbbi elemzések készítéséhez is.

A számított és mért értékek egyezősége

A felületi hőmérséklet eloszlás, egy jellegzetes felvétele látható a 3.11. ábrán. A hőközvetítő közeg az ábrán „A”-val jelölt helyen lép be és a „B”-vel jelölt helyen lép ki. A felvételen a „C”-vel jelölt területen a szerkezeti kialakítás miatt nincs hő elvitel, így a felület hőmérséklete eléri a 45 °C körüli értéket is. Az infra kamerás felvételek pontossága (szoftveresen) ± 0.1 °C pontossági tartományban helyezkedik el.



3.11. ábra A cserép elem hőmérséklet eloszlása

3.4. Kollektor hatásfok görbe meghatározási módszer

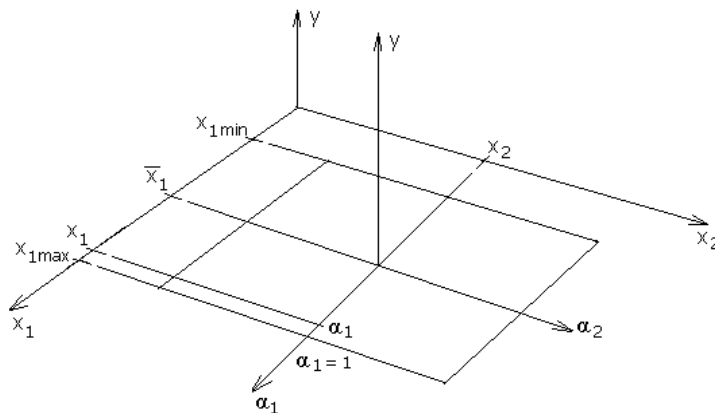
Összefüggést kerestem a napkollektor felületére érkező globális sugárzás megváltozása és a kollektor termikus hatásfoka között. A jelenséget leíró vizsgálati paraméter a hatásfok (η), mely a kollektor termikus hatásfok változását írja le. A vizsgálati paraméterre ható faktorok: a napsugárzás intenzitása (I_g), a kollektor körüli levegő hőmérséklete (T_a), a kollektorban áramló hőelvezető folyadék közepes hőfoka (T_m), a kollektorba belépő folyadék hőmérséklete (T_{in}), a kollektorból kilépő folyadék hőmérséklete (T_{out}), és a kollektor közepes hőfok és környezeti hőmérséklet különbsége ($T_m - T_a$). Ennek a kísérleti tervnek a kapcsán a fentiekben felsorolt vizsgálati paraméterek közül a sugárzás és a hőfokváltozás hatását kísérlettel meghatároztam a hatásfokra. A számítás általánosítása miatt a sugárzást „ G ”-vel, a hőmérséklet különbséget pedig „ ΔT ”-vel jelöltem:

$$\eta = f(G, \Delta T). \quad (3.5)$$

A megmért adataim kiértékelésére a faktoriális kísérletet alkalmaztam.

Faktortér vizsgálat

A faktorok (G és ΔT) értelmezési tartományán belül felvettem egy vizsgálati tartományt ($\Delta T_{imin} - \Delta T_{imax}$), ($G_{imin} - G_{imax}$). Ez azért szükséges, mert a vizsgálati eredmények ezen a tartományon belül érvényesek. A faktortér határoló pontjaiban jelöltem ki a kísérleti beállításokat. Mivel esetemben kétfaktoros kísérletről van szó, ezért a négyszög csúcaiban, az ábrán példaként a szakirodalmi jelöléseket használom (3.12. ábra).



3.12. ábra A faktortér középpontjába helyezett koordináta rendszer

3. Eredmények

A kísérleti eredmények kiértékelésének megtervezése

Azért, hogy a későbbi vizsgálatok egyszerűsödjének a faktortérre vonatkozó koordináta transzformációt hajtottam végre mindkét faktoron. Ami úgy kezdődött, hogy egy alapszintet kellett meghatároznom a faktorokra:

$$\bar{G} = \frac{G_{\min} + G_{\max}}{2} \quad ; \quad \overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_{\min} + \Delta T_{\max}}{2}. \quad (3.6)$$

A transzformált faktor neve α_i , vizsgálati tartománya -1 és 1 közé esett.

A G , ΔT faktorok és az α_i (transzformált faktor) kapcsolata az ábra alapján:

$$\frac{G - \bar{G}}{G_{\max} - \bar{G}} = \alpha_1 \quad ; \quad \frac{\Delta T - \overline{\Delta T}}{\Delta T_{\max} - \overline{\Delta T}} = \alpha_2. \quad (3.7)$$

Mindkét faktorra elvégezve a transzformációt a η vizsgálati paraméter így alakult:

$$\eta = f(\alpha_1, \alpha_2). \quad (3.8)$$

Tehát itt a transzformált faktorok -1 és 1 között változtak és a kísérleti beállításokat is ezeken a helyeken hoztam létre (-), (+).

A modell helyességének vizsgálata

A faktortér középpontjában is végeztem egy méréssorozatot. Ennek eredményei a következők lettek:

n	1	2	3	4	5
η_{0n}					

Ebből megkaptam:

$$\bar{\eta}_0 \quad s_0^2 \text{ értékeit.}$$

A közelítő matematikai modell felállítása:

$$= \eta_0 - k a \quad b_1 k + b_2 N + b_{12} k N.$$

A mérések során megkapott mérési eredményekre a Legendre – elv alapján függvényt illesztettem. A jelenséget a faktorokban lineáris modellel közelítettem:

$$\eta = b_0 + b_1 G + b_2 \Delta T + b_{12} G \Delta T. \quad (3.9)$$

A közelítő függvény hibahatára:

Meghatároztam minden egyes kísérleti beállításhoz tartozó szórásnégyzeteket:

3. Eredmények

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\eta_{ji} - \bar{\eta}_j)^2, \quad (3.10)$$

ahol, n a mérési ismétlések száma ($n = 5$).

A közelítő függvény szórásnégyzete:

$$s_\varepsilon^2 = \frac{\sum_{j=1}^N s_j^2}{N}. \quad (3.11)$$

A hibahatár nagysága a Student próba felhasználásával 5% szignifikanciaszint mellett 95% - os valószínűséggel:

$$\Delta\varepsilon = t \cdot s_\varepsilon, \quad (3.12)$$

ahol, t az F_1 táblázat alapján 2,015 ($f = 5$ szabadsági fokhoz tartozóan).

A szórásnégyzetek megegyezésének vizsgálata

A Fisher próba alapján a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak ha:

$$F_{kis} = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2} \leq F_{tábl}, \quad (3.13)$$

ahol, $F_{tábl}$ értéke 5,1.

Ha F_{kis} értéke kisebb a táblázati értéknél, akkor a Fisher próba alapján a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak. Ha a Fisher próba szerint nincs egyezés, akkor Bartlett próbát kell alkalmazni.

$$\eta = [\bar{a}_0 + \bar{a}_1 \alpha_1 + \bar{a}_2 \alpha_2], \quad (3.14)$$

Ha ez teljesül, akkor az összefüggés a transzformált faktorok függvényében a jelenséget az adott vizsgálati tartományban $\Delta\varepsilon$ hibahatárral, 95 % - os valószínűséggel leírja.

A modell helyességének vizsgálata

Első lépésként azt kellett ellenőriznem, hogy az egyszerűsített közelítő függvény is a hibahatáron belül írja le a jelenséget. Második lépésben azt is ellenőriztem, hogy a közelítő függvényben a négyzetes tagokat figyelembe kell-e venni.

$$\eta_{f0} = (\overline{\Delta T}_0, \overline{G}_0). \quad (3.15)$$

3. Eredmények

Ha az ebben a beállításban mért η_{f_0} átlagos értéke belül van a hibahatáron ($\Delta\varepsilon$), akkor:

$$\eta_{f_0} \pm \Delta\varepsilon, \quad (3.16)$$

ilyenkor a négyzetes tagok jelenlétét feltételezni a közelítő függvényben nem indokolt.

Napkollektor hatásfok vizsgálata

A kísérlet célja: a Vitasol 100, AP-20 típusú, 2 m² felületű, Cu abszorber alapú napkollektor optikai hatásfokának megállapítása, 800 W/m² napsugárzás intenzitáshoz.

Kollektor hatásfok:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta T}{E_g} - k_2 \frac{\Delta T^2}{E_g}, \quad (3.17)$$

$$\Delta T = T_m - T_a, \quad T_m = T_{in} + \frac{T_e - T_{in}}{2},$$

ahol, T_m [K], a folyadék közepes hőmérséklete, T_a [K], külső léghőmérséklet, T_{in} [K], a folyadék belépő hőmérséklete, T_e [K], a folyadék kilépő hőmérséklete, E_g [W/m²], a kollektorra merőlegesen érkező globális sugárzás, k_1 , hőveszteségi tényező (hővezetés), k_2 , hőveszteségi tényező (hősugárzás), η_0 , optikai hatásfok. Az optikai hatásfok összehasonlítási értékei és hőveszteségi tényezői gyári adatok alapján a következők: Vitasol 100 esetén $\eta_0 = 81\%$, $k_1 = 3,78 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_2 = 0,013 \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

Előzetesen tájékozódó méréseket végeztem. Ezek függvényében számítottam a besugárzásból eredő hőmennyiséget és számítottam a kollektor test által hasznosított hőmennyiséget, így egy adott állandósultnak tekinthető időtartam alatt meghatároztam a kollektor hatásfokát.

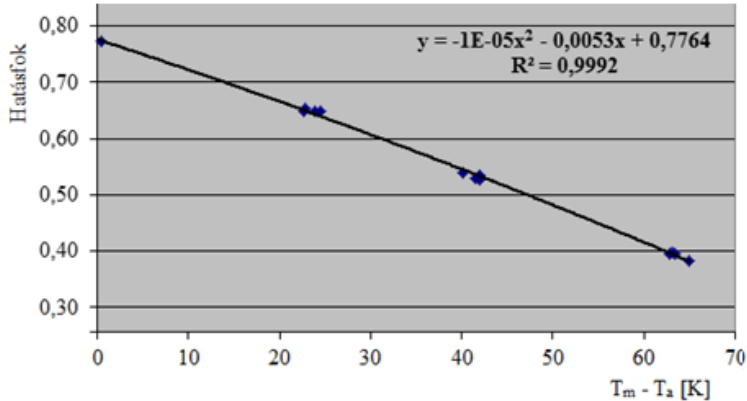
Az optikai hatásfok meghatározása méréssel és számítással

A vizsgálati paraméter (η_0) közvetlenül nem mérhető, számítási módja a mért paraméterekből extrapolálás segítségével határoztam meg. A mért adatok a dolgozat F.1. függelékben találhatóak.

Az adatokból meghatározva a kollektor hatásfokkal kapcsolatos adatai 800 W/m² napsugárzási értékre, optikai hatásfok $\eta_0 = 0,776$, ez az érték a $T_m - T_a = 0$ értékvonalon található, a maximális hatásfok érték a görbén. A hatásfok

3. Eredmények

görbe egyenlete a 3.13. ábrán felírva látható. Ebben a másodfokú egyenletben lévő kitevők alapján az elsőfokú hőveszteségre (hővezetés) jellemző érték $k_1 = 4,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, a másodfokú hőveszteségre (hősugárzás) jellemző érték $k_2 = 0,008 \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

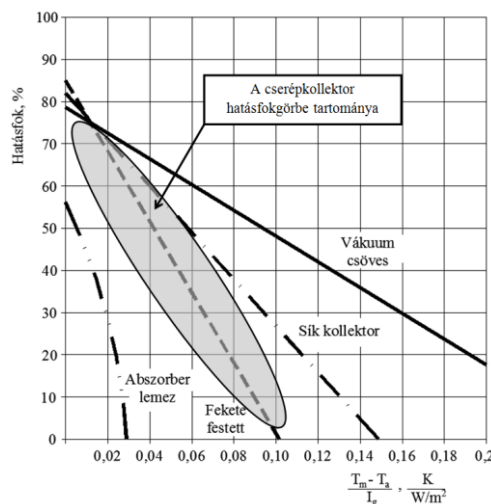


3.13. ábra Kollektor hatásfok görbe ($I_g = 800 \text{ W/m}^2$)

A gyári adatokkal ($\eta_0 = 81\%$, $k_1 = 3,78 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_2 = 0,013 \text{ W/m}^2\text{K}^2$) összevetve a megfelelő értékeket, azt állapítottam meg, hogy a tényleges üzemi körülmények közötti értékek néhány százalékos eltérést mutatnak a rosszabb jellemzők irányába.

Épületelem kollektor (cserépkollektor) hatásfoka

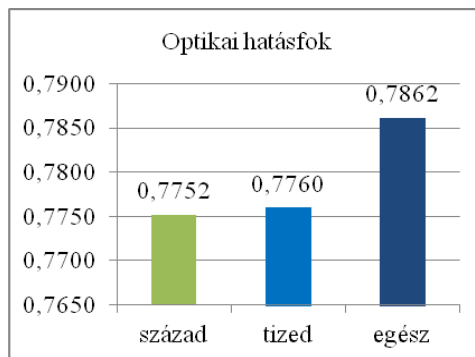
Az előzetes mérési eredmények alapján a cserépkollektor hatásfok várható görbéje az ábrán jelölt területre esik (3.14. ábra).



3.14. ábra A cserépkollektor hatásfok görbe tartomány

3.5. Eljárás a kollektor hatásfok görbe pontossági minősítéséhez

Vizsgáltam a hőmérsékletmérés pontosságának hatását a kollektorok hatásfokának a pontosságára. Az adott hőmérsékleteket $\pm 0,1$ °C-os, $\pm 0,01$ °C-os és ± 1 °C-os leolvasási pontossággal felírva a 3.15. ábrában foglaltam össze grafikusán a főbb jellemzőket. Az alpmérések $\pm 0,1$ °C pontosságúak. Az optikai hatásfokra vonatkozóan a $\pm 0,01$ °C pontosság minimális eltérést adott. Az ± 1 °C fok mérési pontosság mellett az eltérés az optikai hatásfoknál 0,01, százalékosan 1% (3.15 ábra).



3.15. ábra Kollektor hatásfok görbék pontossági összehasonlítása

Az eredmények alapján megállapítható, a mérőműszerek pontossága mellett fontos a matematikailag és mérés technikailag helyesen felépített mérések végzése.

3.6. Eljárás a kollektorok gazdaságossági számításához

A jelen dolgozatban a gazdaságosság megítéléséhez alkalmazható számítási módszerekkel foglalkozom és adott példa kapcsán, egy korábbi, 10 éves beruházást értékelek. A 10 év alatti valós energiahordozó árváltozási adatok alapján vizsgálom a megtérülési időtartamot a berendezés élettartamára vonatkozóan.

Napkollektor beépítése HMV készítéshez és fűtés rásegítésre

Az alábbiakban 2003-ban megvalósult napkollektoros beruházás adatai alapján, megvizsgáltam a gazdasági megtérülést több számítási módszer segítségével.

Megtérülési idő mutató támogatás nélkül:

$$M = B_k / N_y = 1\,050\,000 / 59\,000 = 17,7 \text{ év.}$$

3. Eredmények

Jövőérték (FV) = megtakarítás (59 000) x 25 év = 1 475 000.- Ft

Nettó jelenérték mutató:

NPV = PV(R)(=831 543) – PV(C)(=0) – PV(I)(=1 050 000) = - 218 457.- Ft

Hozam-költség mutató:

$BCR_1 = PV(R) / (PV(I) + PV(C)) < 0$ (~ 0,792) (PV(C) = 0.- Ft)

Megtérülési idő mutató 30%-os támogatással:

$$M = B_k / N_y = 735\,000 / 59\,000 = 12,4 \text{ év.}$$

Jövőérték (FV) = megtakarítás (59 000) x 25 év = 1 475 000.- Ft

Nettó jelenérték mutató:

NPV = PV(R)(=831 543) – PV(C)(=0) – PV(I)(=735 000) = 96 543.- Ft

Hozam-költség mutató:

$$BCR_2 = PV(R) / (PV(I) + PV(C)) = 1,13 \quad (PV(C) = 0.- Ft).$$

A 2003-ban rendelkezésre álló adatok alapján elvégzett számítások pénzügyileg nem támogatták a beruházás gazdaságosságát.

A beruházás gazdasági és üzemeltetési tapasztalatainak értékelése:

A két legfontosabb változás a villamos energia és a földgáz árának változása volt. A földgáz árának átlagos emelkedése 10 év alatt (2004-2013) 2,3-szeres, a villamos energia árának átlagos emelkedése 1,5-szeres mértékűre adódott. A tényleges megtakarítás ~ 107 320.- Ft/év-re csökken, így a megtérülés támogatás nélkül 9,8 év, támogatással (30%) 6,8 év.

Gazdasági összegzés, javaslatok

Az előzetes pénzügyi elemzések a példa napkollektoros rendszer kedvezőtlen, hosszú idejű megtérülését jelezték, a tényleges energia árak emelkedése azonban jelentősen lerövidítették ezt. A napkollektoros rendszerek ára csökken a kollektor gyártás fejlődésével.

A fejlesztések, gyártási eljárások hatékonysága folyamatosan fejlődik, így ezek árának csökkenése is megfigyelhető. A termelési költségek mellett, a telepítési költségeket is figyelembe kell venni. A kutatás és az ipar egyre nagyobb figyelmet szentel a rendszerintegrációra, ezáltal várható, hogy a rendszerek telepítési költsége is csökkenni fog az elkövetkező években.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A kutatómunkám során a vizsgált új napkollektor típusra és annak optimális felépítésére vonatkozóan elért új tudományos eredmények a következők:

1. Az épületelem kollektor modellezése

Kidolgoztam egy fizikai alapú matematikai modellt, amely közvetlenül felhasználható az épületelem kollektor termikus folyamatainak modellezésére. A modellt az épületelem kollektor rétegeinek hő- és anyagtranszport-folyamatait leíró differenciálegyenletek összekapcsolásával állítottam elő, amelynek segítségével a cserépelem hőmérsékletére (T_t) és kilépő folyadék munkaközeg hőmérsékletére (T_{out}) a következő egyenleteket vezettem be:

$$\dot{T}_t = \frac{I A_t + k_{ta} A_{ta} (T_a - T_t) - k_{wt} A_w (T_t - T_{out})}{c_t m_t}, \quad (4.1)$$

$$\dot{T}_{out} = \frac{k_{wt} A_w (T_t - T_{out}) - \dot{m}_w c_w (T_{out} - T_{in})}{c_w \rho_w V_w}. \quad (4.2)$$

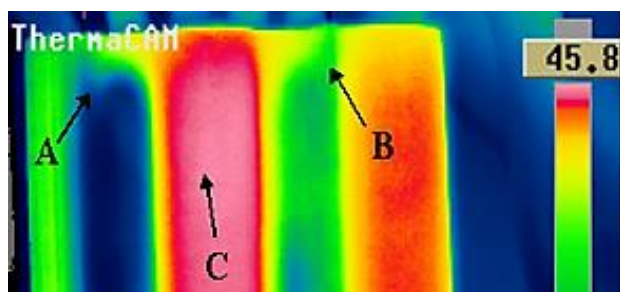
A modellt egy megépített cserépkollektoros rendszer mérésével validáltam. Megállapítottam, hogy a modellel az elemek felületi hőmérsékletére vonatkozóan mintegy 0,5 °C-os becslési pontosság érhető el.

2. Az épületelem kollektor szerkezeti kialakítása

A modellel végzett szimulációk eredményei és az épületszerkezeti anyagok napsugárzási energia elnyelődés mérései alapján javaslatot tettem a cserépelem optimális formájára, méreteire, a hőcserélő rész kialakítására és annak térbeli elhelyezkedésére. Meghatároztam továbbá a csőtávolságokat az eredeti betoncserép formai és szilárdságtani sajátosságainak megfelelően. Mérések segítségével igazoltam, hogy az optimalizált cserépelemekből kialakítható egy átlagos napkollektornak megfelelően működő épületelem kollektor.

3. Kollektor modell hőfokeloszlása, mérési adatok validálása

Bizonyítottam, hogy az épületelem kollektorok hőmérsékletmező vizsgálatára és a modellezés értékeinek validálására az infrakamerás érzékelős módszer alkalmazható.



4.1. ábra A cserépelem jellegzetes hőmérsékleti területei

A felvételek elemzése alapján megállapítottam, hogy a cserépelemek hőmérsékletének mérési pontossága 0,1 °C-nál kisebb hibával rendelkezik a kiemelt (A - munkaközeg belépés, B – munkaközeg kilépés, C – cserépelem maximális hőmérséklet) pontokban is. A kidolgozott módszer segítségével meghatároztam az épületelem kollektor hőmérséklet eloszlás egyenetlenségeit, amelyek számbavétele segíti az elemek optimális szerkezeti kialakítását.

4. Kollektor hatásfok görbe meghatározása

Faktortér analízisre alapozva új módszert dolgoztam ki napkollektorok hatásfokának meghatározására az üzem közbeni mérési adatok statisztikai elemzése alapján. Ennek során $X = (T_m - T_a)/G$ összevont változó függvényében megállapítottam a környezeti hőmérséklet, a kollektor közepes hőmérséklet és a globál sugárzás hatását napkollektor hatásfok értékére. A kidolgozott módszerrel az egyszeres üvegezésű, szelektív bevonattal ellátott síkkollektorok hatásfok függvényére (η) a következő összefüggést adtam meg azonosítva az optikai hatásfokot és a veszteségekre jellemző együtthatókat:

$$\eta = -7,7693 X^2 - 4,2225 X + 0,7764.$$

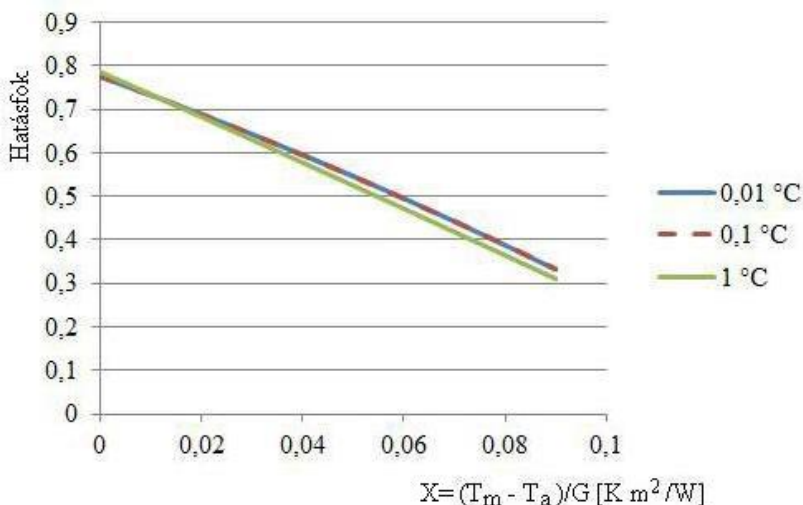
A bevezetett kollektor hatásfok görbe $D^2(X) = 0,9992$ szórásnégyzet érték mellett illeszkedik a mérési adatokhoz.

5. Eljárás a kollektor hatásfok görbe pontossági minősítéséhez

Új számítási eljárást dolgoztam ki a hatásfok görbe megadására nagy pontosságú mérőműszerek alkalmazása nélkül. A különböző mérési pontosságú eszközökkel mért értékek alapján bizonyítottam, hogy a normál pontosságú ($\pm 0,1$ °C) bemenő adatokhoz képest az egy nagyságrenddel

4. Új tudományos eredmények

nagyobb ($\pm 0,01$ °C) illetve az egy nagyságrenddel kisebb (± 1 °C) pontosság esetén sorrendben max. 0,014%-os illetve max. 2,5%-os eltérés mutatkozik a kollektor hatásfok függvények értékei között. A kisebb értékű eltérés a vízszintes tengely kezdő értékeinél, a nagyobb eltérés a nagyobb veszteségű működési tartományban mutatkozik.



4.2. ábra Mérési pontosság hatása a kollektor hatásfok görbére

6. Eljárás a kollektorok gazdaságossági számításához

Új eljárást dolgoztam ki a napkollektorok alkalmazásának gazdaságossági jellemzőire, megtérülési idejének számítására. Hosszú időszakra vonatkozó üzemeltetési adatok alapján gazdasági számításokkal igazoltam a napkollektorok megtérülési idejére a jelenleg alkalmazott közgazdasági alapú becslési módszerek pontatlanságát, alkalmazási korlátaikat.

Az új, kidolgozott számítási eljárás figyelembe veszi a napkollektoros rendszerek árának csökkenési tendencia mutatóját, amely igazolható az európai napenergiás rendszerek piacának bővülésével. A beruházások eredményességének megítélését tovább javítja az externális költségekkel és a környezet terheléssel arányos tényezők bevezetése.

Az új számítási módszer eredményei azt mutatják, hogy a napkollektoros rendszerek 20-25 éves műszaki élettartamán belül, a hagyományosan 15-18 évre becsült megtérülési időtartammal ellentétben, a tényleges adatok alapján, ugyanazon rendszer esetében, gazdaságilag 8-10 év körüli időszakban megtérülhetnek a beruházások.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Napjaink nagy gondja a gazdasági növekedés fenntartásával járó emelkedő környezetszennyezés. A megújuló energiák, közte a napenergia, mindenki számára elérhető, decentralizált kiaknázása ezt jelentősen tudná csökkenteni.

Napjaink hatékonyságot előtérbe helyező, de költséges fejlesztési elképzelései mellett szükséges a kisebb hatékonysággal dolgozó de olcsóbban rendelkezésre álló lehetőségek kihasználása. Az olyan egyszerűen és könnyen összeszerelhető berendezések kialakítása, melyek alkalmasak adott időszakban a napsugárzási energia gazdaságos befogására, az eredmények első következtetése az, hogy épületszerkezeti elemként kialakíthatók kollektor elemek.

A vizsgálatok és a modellezés kapcsán felmerült a kérdés, a jelenleg használt kollektor hatásfok képlete megfelelő-e a számításokhoz. Az számítások során a kollektorban lévő közeg hőmérséklete változó, a sugárzás intenzitásának változása befolyásolja a kollektor hatásfokát. A hatásfok számítására szokásosan használt képletben a kollektor közepes hőmérséklet nem tükrözi a valóságos hatásfokot teljes mértékben. A kollektorok belső hőmérséklet eloszlása és az összekapcsolt kollektorok hatásfokra gyakorolt hatásának megállapítása fontos lenne a pontosabb szabályozás és a nagyobb energia felhasználhatóság érdekében.

Eredményeim alapján javaslom az épületelemként kialakítható kollektorokat azokban az esetekben, mikor nem építik be a hagyományos kollektorokat esztétikai okokra való hivatkozás miatt. Javaslom továbbá ezeket az elemeket a városi-hősziget hatás csökkentésére, mikor az épületek felmelegedése rontja az emberi komfortérzetet.

Javasolható ilyen elemek alkalmazása építészetileg védett kialakítású épületek felújításánál, a napenergia aktív hasznosításának növelése, az egyre szigorodó épületenergetikai előírások teljesítése érdekében.

Végezetül javaslom az új eljárások és megoldások felhasználását a napkollektorok hatékonyságának megállapításánál, utólagos hatásfok ellenőrzés elvégzésénél, továbbá a gazdaságossági mutatók helyes megállapításánál, előrejelzésénél.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A megújuló energiaformák befogására és hasznosítására irányuló kutató-fejlesztő tevékenység az utóbbi két évtizedben gyakorlati értékű technológiák kialakításához és ezeket alkalmazó berendezések, rendszerek kereskedelmi forgalomban való megjelenéséhez vezetett.

Bemutattam az aktív napenergia hasznosítás egy újnak mondható, nem szokásos, eddig még nem alkalmazott lehetőségét. A kollektortestek többféle hőtechnikai rétegezésének optimalására kialakítottam a matematikai modellt és szimulációs vizsgálatokat végeztem. A beeső napsugárzás energetikai jellemzőinek vizsgálatára különböző felületű próbatesteken végeztem méréseket. A rendszer alkalmas összehasonlító mérések elvégzésére, szükség szerint bővíthető, továbbfejleszhető. A számítások alapján elkészített kollektortesteket mértem.

Megvizsgáltam a napkollektoros rendszerek hatásfok számításának a módját. A mérések pontos megtervezésével, megfelelő matematikai módszerek segítségével bizonyítható, hogy nemcsak a nagy pontosságú műszerekkel lehet műszakilag megfelelő eredményeket, minősítéseket elérni. A szokásos hatásfok képletek pontossága sem megfelelő egyes esetekben, ill. nem világít rá határozottan egyes rosszul kialakított elemek, rendszerek hibáira.

Gazdasági számításokkal megvizsgáltam egy adott paraméterű napkollektoros rendszer beruházási, gazdasági megtérülési lehetőségét. Jelenlegi gazdasági mutatók nem kedveznek egy gyorsan megtérülő, szokásos technológiát alkalmazó beruházáshoz. Fontos figyelembe venni a rendszerek árcsökkenésének irányába ható műszaki mutatókat is, továbbá a környezet védelme, a jövőért érzett felelősség adhat egyfajta döntési támogatást.

Összefoglalóan megállapítva, a kollektortestek formai és anyagszerkezeti kialakításának változtatásával tudom megközelíteni a hőtechnikailag elérhető maximális hatásfokot. A kollektortestek többféle hőtechnikai rétegezésének kialakítása, azok modellezése, szimulációja, illetve mérése után, a műszakilag jó minőségben gyártható, szerelhető, olcsó, jó hatásfokú kollektortestek kialakíthatók, megfelelő üzemidejű, gazdaságos rendszerek segíthetik a napenergia még nagyobb mértékű felhasználását.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ
KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **Fekete, I.**, Farkas, I.: Thermal analysis of shell-structured solar collectors, *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, Vol. 60, No. 2, 2012, pp. 43-48. ISSN 1582-5175
2. **Fekete, I.**, Farkas, I.: Factorial experiment method for determining the efficiency of solar collectors, Szent István University Faculty of Mechanical Engineering, *Mechanical Engineering Letters*, Gödöllő, Hungary, 2012, Vol. 8, pp. 38-52. HU ISSN 2060-3789
3. **Fekete, I.**, Farkas, I.: Numerical and experimental study of building integrated solar collectors, 2015, (publishing is in progress)

Lektorált cikk magyar nyelven

4. **Fekete I.**, Farkas I.: Az építészeti alkalmazásokba integrálható héjszerkezetű kollektortestek, *Magyar Energetika*, XVIII. évf., 6. szám, 2011. november, 32-35. o. ISSN 1216-8599
5. **Fekete I.**, Farkas I.: Épületszerkezeti elemek szerepe a napenergia aktív hasznosításában, *Mezőgazdasági Technika*, LIII. évf., 2012. szeptember, 2-4. o. HU ISSN 0026 1890
6. **Fekete I.**, Farkas I.: Napkollektor gazdaságossága családi ház esetén, *Energiagazdálkodás*, 56. évf., 2-3. szám, 2015. június, 29-35. o. ISSN 0021-0757