

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Fotovillamos és fotovillamos-termikus rendszerek  
energetikai modellezése

Doktori értekezés

Háber István

Gödöllő  
2016

**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

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	8
1.1. A témakör jelentősége	8
1.2. Célkitűzések	9
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	11
2.1. A napelem működése, típusai	11
2.2. Fotovillamos modulok paraméterei	15
2.3. A fotovillamos modulok vizsgálati körülményei	16
2.4. A napelemek veszteségei	17
2.5. A modulok hőmérsékletfüggése	18
2.6. A kvantumhatásfok, a napelem cella melegedése	23
2.7. Fotovillamos méretező programok	27
2.8. A napelem modulok hűtése	30
2.9. A fotovillamos-fototermikus (PV/T) típusú rendszerek	31
2.10. A szakirodalmi feldolgozás áttekintő értékelése	35
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	36
3.1. Környezeti jellemzők vizsgálata	36
3.1.1. Szélsebesség	36
3.1.2. Környezeti hőmérséklet	37
3.1.3. Napsugárzás	40
3.1.4. A diffúz és direkt sugárzási komponensek szétválasztása	43
3.1.5. Napsugárzási értékek döntött felületre	44
3.2. A hőátadási tényezők meghatározása	45
3.2.1. A hőátadási tényezők meghatározása szimulációval	45
3.2.2. A validálás alapjául szolgáló referenciaépület ismertetése	46
3.2.3. Szélcsatorna vizsgálatok	47
3.2.4. A hőátviteli tényezők számítási módszerének validálása	49
3.2.5. Az ideális elhelyezés vizsgálata a hőátadási tényezők által	54
3.3. Napelem modulok hőáramhálózatos modellezése	55
3.4. A mérés-adatgyűjtő rendszer a hőáramhálózatos modell validálásához	57
3.4.1. A fotovillamos rendszer ismertetése	58
3.4.2. Az adatgyűjtő rendszer ismertetése	59
3.4.3. Az alkalmazott adatgyűjtő algoritmusok	61
3.5. A PV/T modulok működési hőmérsékletének számítása	63
3.5.1. Az MHP anyag hővezetésének meghatározása	64
3.5.2. A PV/T modulok hőáramhálózatos modellje	65
3.5.3. A PV/T modulok mérése	67
4. EREDMÉNYEK	71
4.1. A napelem modulok hőátadási tényezője	71
4.2. Fotovillamos modul hőáram-hálózat alapú modellje	79
4.3. Hőáramhálózat alapú PV/T vizsgálati modell	85
4.4. A komplex fotovillamos modellező rendszer	88
4.5. Új tudományos eredmények	91
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	93
6. ÖSSZEFOGLALÁS	94
7. SUMMARY	95

8. MELLÉKLETEK	96
M1: Irodalomjegyzék	96
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	101
M3. A HÁH modellen alapuló program blokkdiagrammja	103
M4. A PV/T mérés kapcsolási rajza	104
M5. A napsugárzás modell felhasználása az épületenergetikában – a szoláris nyereségek számítása	105
M6. Szélirány naplózásának programozástechnikai sajátosságai	108
M7. Melléklet: Peltier elem hőmérsékletének beállítása	111
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	112



## JELÖLÉSJEGYZÉK

- $A_c$ : cella méret ( $m^2$ ),  
 $A_m$ : fotovillamos modul méret ( $m^2$ ),  
 $A_k$ : hasznos kollektor felület ( $m^2$ ),  
 $A_{PV}$ : hasznos fotovillamos modul felület ( $m^2$ ),  
 $\underline{C}$ : hőkapacitás mátrix (J/K),  
 $c$ : fajhő (kJ/kgK),  
 $C_b$ : termikus vezetőképesség (W/mK),  
 $c_p$ : dimenziómentes nyomásérték (-),  
 $F$ : kollektor csőhatásfok (-),  
 $FF$ : kitöltési tényező (-),  
 $F_R$ : hőelvonási faktor (-),  
 $F'$ : kollektor hatásfok-állandó (Hottel, Whillier, 1958),  
 $E$ : energia (J),  
 $E_x$ : exergia (J),  
 $\underline{G}$ : hőátviteli mátrix (mK/W),  
 $G_o$ : légkörön kívüli sugárzási együttható ( $1353 \text{ W/m}^2$ ),  
 $Gr$ : Grashof szám,  
 $h$ : Planck állandó,  
 $h_{wm}$ : hőátadási tényező a kollektornál ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  
HÁH-PV: A fotovillamos modulok hőáramhálózat alapú hőtranszport modellje,  
HÁH-PVT: A fotovillamos-termikus modulok hőáramhálózat alapú hőtranszport modellje,  
 $I$ : napsugárzási teljesítmény (W),  
 $I(\tau)$ : napsugárzás teljesítmény függvény óras pontossággal (W),  
 $I_b$ : direkt (beam) sugárzási teljesítmény (W),  
 $I_c$ : ASHRAE „clear sky” együttható,  
 $I_d$ : diffúz sugárzási teljesítmény (W),  
 $I_{MPP}$ : munkaponti áram (A),  
 $I_{Pyrano}$ : a napsugárzás teljesítménye a kollektorok síkjában mérve (W),  
 $I_{sc}$ : rövidzárási áram (A),  
 $k$ : kollektor cső hővezetés (W/mK),  
NOCT: névleges működési cella hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $Nu$ : Nusselt-szám,  
 $p$ : statikus nyomás (Pa) (szélcsatornában az épületburkon mérve),  
 $p_{\infty}$ : a szélcsatorna főáramában mért statikus nyomás (Pa),  
 $P_{max}$ ,  $P_m$ : maximális levehető teljesítmény (W),  
 $Pr$ : Prandtl szám,  
 $R$ : reflexió (-)  
 $R_b$ : direkt sugárzási együttható (-),

$Re$ : Reynolds-szám,  
 $Q_v$ : a fotovillamos modul által teljesítménye (W),  
 $Q_h$ : a termikus kollektor pillanatnyi hőteljesítménye (W),  
 $T$ : transzmittancia (-),  
 $\underline{T}$ : hőmérséklet oszlopvektor ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $t_a(\tau_h)$ : környezeti hőmérséklet függvény órás pontossággal ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $t_{be}$ : a kollektor hűtőközeg bemenő hőmérséklete ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{back}$ : a visszatérő hőmérséklet a hőcserélő után mérve ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_c$ : napelem cella hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{env}$ : a külső környezeti hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_f$ : felületi hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{modul}$ : modulhőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{levegő}$ ,  $T_a$ : léghőmérséklet, környezeti hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{pcm}$ : a PCM kollektor hőmérséklete ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{pvt}$ : a PV/T kollektor hőmérséklete ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_w$ : közeghőmérséklet, környezeti hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $U_{pv}$  és  $I_{pv}$  a referencia napelem feszültsége és árama, amit az MPPT vezérlő állít be,  
 $U_{pvt}$  és  $I_{pvt}$  a PV/T napelem részének feszültsége és az átfolyó áram,  
 $U_{batt}$  és  $I_{batt}$  az akkumulátor aktuális feszültsége és a fogyasztók felé kimenő áram.  
 $u_{in}$ : szélcsatornában mért szélsébség (m/s),  
 $U_L$ : a napkollektor teljes hőveszteségi foka (W/K),  
 $U_{MPP}$ : munkaponti feszültség (V),  
 $U_{oc}$ : üresjárási feszültség (V),  
 $U_{pv}$  és  $I_{pv}$  a referencia napelem feszültsége és árama, amit az MPPT vezérlő állít be,  
 $U_{pvt}$  és  $I_{pvt}$  a PV/T napelem részének feszültsége és az átfolyó áram,  
 $U_{batt}$  és  $I_{batt}$  az akkumulátor aktuális feszültsége és a fogyasztók felé kimenő áram,  
 $v$ : szélsébség (m/s),  
 $V$ : a szivattyú által megforgatott hűtőközeg térfogata (liter),  
 $\nu$ : frekvencia (Hz),  
 $W$ : spektrális energiaszint,  
 $w(\tau_h)$ : szélsébség függvény órás pontossággal (m/s),  
 $\alpha$ : felületi hőátadási tényező ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{min}(\nu)$ : fotovillamos modul felületén a legalacsonyabb hőátadási tényező ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{max}(\nu)$ : fotovillamos modul felületén a legmagasabb hőátadási tényező ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{át-ferde-É}}(\nu)$ : felületi hőát. tényező ferde tetőre szerelt modul esetén északi szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{át-ferde-D}}(\nu)$ : felületi hőátadási tényező ferde tetőre szerelt modul esetén déli szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{át-lapos-É}}(\nu)$ : felületi hőátadási tényező lapos tetőre szerelt modul esetén északi szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{át-lapos-D}}(\nu)$ : felületi hőátadási tényező lapos tetőre szerelt modul esetén déli szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{át-szabad-É}}(\nu)$ : felületi hőátadási tényező szabadon álló modul esetén északi szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),

$\alpha_{\text{átl-szabad-D}}(v)$ : felületi hőátadási tényező szabadon álló modul esetén déli szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{átl-homlokzat-É}}(v)$ : felületi hőát. tényező homlokzatra szerelt modul esetén északi szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{átl-homlokzat-D}}(v)$ : felületi hőátadási tényező homlokzatra szerelt modul esetén déli szélben ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{átl-oldalszél}}(v)$ : felületi hőátadási tényező oldalszél esetében minden szerelési módra vonatkozóan ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{déli}}(v)$ : felületi hőátadási tényező függvénye változó déli szélesség mellett ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_{\text{északi}}(v)$ : felületi hőátadási tényező függvénye változó északi szélesség mellett ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  
 $\alpha_h$ : PV modul hőmérsékletfüggési együttható ( $\%/^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\beta$ : modulok dőlése (fok),  
 $\beta_{pv}$ : PV modul hőmérsékletfüggési együttható ( $\%/^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\delta$ : deklináció (fok),  
 $\underline{\phi}$ : hőáram vektor (W),  
 $\lambda$ : hővezetési tényező ( $\text{W}/\text{mK}$ ),  
 $\eta$ : hatásfok (-),  
 $\eta_v$ : villamos hatásfok (-),  
 $\eta_{\delta}$ : összh hatásfok (-),  
 $\eta_t$ : termikus hatásfok (-),  
 $\eta_{STC}$ : STC körülmények közt meghatározott hatásfok (-),  
 $\eta_{ref}$ : referencia hatásfok adott hőmérsékleten (-),  
 $\omega$ : körfrekvencia (Hz),  
 $\varphi$ : földrajzi szélességi fok (fok),  
 $\rho$ : sűrűség ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $\sigma$ : Stefan-Boltzmann állandó ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ),  
 $\mu$ : PV modul hőmérsékletfüggési együttható ( $\%/^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\tau_a$ : az üvegezés transzmittancia és abszorpciós jellemzői.

## 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a választott témakör aktualitását kívánom bemutatni, és a dolgozat célkitűzéseit foglalom össze.

### 1.1. A témakör jelentősége

A napenergia tiszta, természetes és biztonságos energiaforrás, vagyis teljes mértékben környezetbarát. Az Európai Unió energiapolitikai követelményei nagymértékben befolyásolják a megújuló energiaforrások elterjedését. 2020-ra az EU-n belül 20%-ra kell növelni a megújuló energiákból termelt energia arányát, ezen belül a villamos energia részaránya magasabb kell, hogy legyen a hőenergiához képest. 2014-ben Magyarországon 6,9%-os a megújuló energiaforrások felhasználása (ezen felül 37% kőolaj, 14% nukleáris, 24% földgáz, 16% szilárd tüzelőanyagok) az Európai Bizottság jelentése szerint (European Commission, 2015), de az utóbbi évek növekedését sajnálatos módon 2 nagy hazai hőerőműünk biomasszára való átállásával érték el. 2006-os adatok szerint Magyarországon a fotovillamos energia-termelés 140 KWh/év, ez 2014-re 22 MW-ra nőtt, ami jó eredmény, de az EU28-ak listájában így is a utolsó negyedbe kényszerülünk. Szlovákia ezzel szemben a 9. helyezett, 524 MWp beépített kapacitással, Románia 7. 1,15 GWp teljesítménnyel. A magyar kormányzat a Nemzeti Cselekvési Terv alapján 2020-ig 63 MWh/év fotovillamos energiatermeléssel számolt annak ellenére, hogy jelenleg sem tekinti stratégiaileg kiemelt irányynak a villamos energia célú közvetlen napenergia hasznosítást, bár 2011-től 2014-ig több, a beépítést ösztönző támogatás jelent meg, rendre alacsony költséglimittel. A 2006-os „Magyarország Energiapolitika Tézisei” című, a Magyar Villamos Művek és a Gazdasági és Közlekedési Minisztérium által jegyzett jelentés is úgy említi a fotovillamos energiatermelést, hogy „rövid és középtávon általában még támogatásokkal sem tehető gazdaságossá, bizonyos jelentősége csak lokális autonóm rendszerek esetében merülhet fel”. Magyarország fotovillamos potenciálja 486 GWh/év, ami óriási, ha azt nézzük, hogy a jelenlegi éves villamos energia felhasználás 44 GWh.

A fotovillamos rendszerek kiépítése tekintetében a leglátványosabb fejlődést Németországban érték el, ahol már 2000-ben 114 MWp csúcsteljesítményű fotovillamos (PV) kapacitás működött (melyből 14,8 MWp autonóm rendszer volt). 2006-ban a világon a legtöbb PV-s rendszert már Németországban helyezték üzembe, ahol a teljes beépített kapacitás ekkorra már 750 MWp-re nőtt, 2011-ben ez az érték Németországban 17,3 GWp, ami 5 év alatt 120%-os növekedést jelent. 2014-re Németország beépített fotovillamos kapacitása 35,7 GWh és az Európai Bizottsághoz leadott cselekvési tervük alapján 2020-ra elérik az 51 GWp-et.

A PV modulok gyártása a 2000. évi 17,6 MWp/év értékről 2006-ra kb. 500 MWp/évre nőtt, míg 2011-ben ez 6 GWp körüli volt (5 év alatt 1200%-os növekedés!). 2013-ban 40 GW napelemes kapacitás lett beépítve a világon, így a szint elérte a 138 GW-ot világszerte (www.solarwirtschaft.de, 2014), ugyanakkor a PV modulok ára az utóbbi években jelentősen csökkent, jelenleg 0,7 Euro/Wp körüli érték.

Az Európai Uniós tervek kiemelten fontosnak tartják a közvetlen napenergia hasznosítását, a jelenlegi prioritások pedig egyre inkább a fotovillamos (PV) alkalmazások irányába tolódnak el a korábban inkább jellemzőbb fototermikus hasznosításhoz képest. Ennek megfelelően a PV-rendszerű hasznosítások szerepének jelentős növelése prognosztizálható. A tagállamoknak a Nemzeti Megújuló Cselekvési Tervben kellett rögzíteniük, hogy 2020-ig milyen vállalásokat tesznek e téren. (Magyarország összesen 63 MWp fotovillamos teljesítményt vállalt.)

Az intenzíven növekvő hazai energiaárak – beleértve a folyamatos gázáremelkedést – és az ellátásbeli bizonytalanságok előbb-utóbb ráébresztik a lakosságot az energiaforrások takarékos felhasználására és a zöldenergiák jelentőségére. Ezért is fontos, hogy létrejöjjön egy magyar tudásbázis, melyre támaszkodhatunk a későbbi beruházások során, de nem kevésbé fontos az sem, hogy ezáltal megerősödhet a hazai zöldenergia-lobby, és hatékonyabban léphet fel a

nagytermelők mellett. Az európai piacokat egyértelműen meghatározza a politikai hozzáállás. Ha megnézzük az EPIA 2014-es jelentését, a telepítési helyek diverzifikáltsága megmutatja, hogy adott országban milyen a politikai hozzáállás. Románia az utóbbi években nagy fejlődésnek indult ilyen téren, viszont követhető, hogy a napelemes felhasználás teljesen a befektetési oldalra tolódott el, így a beépített teljesítmény 98%-a szabadon álló (földre telepített), ami 1,05 GW-ot jelent. Hálózatirányítási szempontból egészségesebb, ha a lakossági oldal is megjelenik beruházóként ahogy Szlovéniában, Ausztriában vagy akár Magyarországon is látható, viszont elmaradva az előbb említett államok több mint 0,5 GWp beépített kapacitásához mérten.

A fotovillamos eszközök fejlődése évről évre töretlen, és bár a jelenlegi hatásfok rekord 44,0% a többrétegű (multi-junction) (3. ábra) cellák esetében, de ezek gyártása rendkívül drága, így a piacon kapható technológia ~10 éves lemaradásban van, mert a piacon kaphatók hatásfoka a 18%-ot közelíti a monokristályos napelemek esetén. Újabb, olcsóbb technológiák – mint a HIT (amorf és kristályos réteggel is rendelkező napelem cellák; Heterojunction Technology, ~21% körüli hatásfokkal kaphatóak jelenleg a piacon) cellák – elterjedése várható, de ezek esetében is nagyban befolyásoló tényező a hőmérsékletfüggés. Ezért fontos, hogy az újonnan felszerelésre kerülő modulok esetén, ha csak pár százalékos különbség is van, de legjobb tudásunknak megfelelően legyenek elhelyezve és méretezve, ezt hivatott segíteni ez a kutatás.

## 1.2. Célkitűzések

A doktori disszertációmban fel kívánom tárnai a szilícium alapú fotovillamos modulok hatásfokának függését a környezeti tényezőktől, különös tekintettel a légáramlás hatására a hűtés szempontjából. A légáramlás fogalmába beletartozik a szél és a modulok környezetében kialakuló hőmérséklet-különbség hatására létrejövő konvekció. Ehhez le kell írni a fotovillamos modulok felépítés-specifikus hőtranszport folyamatait és ezek kapcsolatát a modulok hatásfokát befolyásoló tényezőkkel.

A hőtranszport folyamatokat leíró modell a környezeti változókat veszi át bemenetként, amelyek matematikai függvényként állnak rendelkezésre és így a teljes és így a komplex fotovillamos modellező rendszer egyetlen bemenő paramétere egy időintervallum, amely intervallumra vonatkozóan megkapjuk a konkrét fotovillamos rendszer hatásfokát, vagyis közvetve a pontos energiatermelési adatokat.

A fotovillamos modellező rendszer számára tehát lehetséges bemenet a környezeti jellemzők matematikai függvényként való átadása, de ehhez a már rendelkezésre álló modellt a helyi adottságokhoz kell illeszteni. Így a munka első fázisa, megvizsgálni a környezeti jellemzőket amelyek befolyásolják a napelemek hatásfokát és ezekre egy-egy a régióra érvényes matematikai modellt állítani fel, amely felhasználható fotovillamos energiatermelési számításokhoz és hatásfok vizsgálathoz.

Az identifikált modell élőben való („on fly”) validálására egy meteorológiai állomás épült, kiegészítve az egyes fotovillamos modulok celláinak hőmérsékletét mérő szenzorokkal. Bemenő paraméternek tehát megadható individuálisan a szélesebbesség, besugárzás és környezeti hőmérséklet, de ezeket akár a meteorológiai állomás is szolgáltathatja.

A modell alapján készült grafikus felhasználói felülettel rendelkező program felhasználható fotovillamos rendszerek tervezésénél, a várható legpontosabb villamos-energia termelési adatok meghatározásához, a megadott meteorológiai modellek segítségével.

A kutatás során megvizsgálom az aktívan hűtött napelem modulok működését is a hőcsöves (heat-pipe) rendszerű PV/T modulok kapcsán, összehasonlítom a mért energiatermelési adatokat, és alkalmazásra kerül az ilyen rendszerre megalkotott termelési modell is, amelynek alapja szintén egy hőáramhálózatos modell a megfelelő szerkezeti változtatásokkal és az aktív hűtés figyelembevételével.

A kutatás fő célkitűzése a fotovillamos rendszerek veszteségeinek csökkentése a kidolgozandó számítási módszerek segítségével.

A fenti célok, pontokba szedve és részletezve, az alábbiak:

- Meghatározni a napelemek hőveszteségeit, amelyhez megfelelő módszer a numerikus áramlástanai számítás (CFD), amivel meghatározásra kerülhet a hőátadási tényező szél által befolyásolt változása. Az eredményeket modellkísérlettel szélcsatornában ellenőrizni kell.
- A napelemek általános felépítése alapján felállítani egy hőáram-hálózatos modellt (továbbiakban HÁH-PV modell), amivel a cellahőmérsékletet lehet számolni, és amelyet a napelem pontos hatásfokának meghatározására lehet alkalmazni. A modell hitelesítéséhez egyedi mérőrendszer kialakítása szükséges.
- Megvizsgálni, hogy hűtött PV modulok esetében, hogyan alakul a cellahőmérséklet és ez által a hatásfok. Ennek megfelelően, az előző ponthoz hasonlóan egy mikro hőcsöves (MHP – Micro Heat Pipe) rendszerű PV/T modul lesz megvizsgálva. A PV/T modulokra felírt hőáram-hálózatos modell (továbbiakban HÁH-PVT modell) validálására egy újabb mérőrendszert kell összeállítani.
- A HÁH-PV és a HÁH-PVT modellek alkalmazásával elkészíthető egy komplex fotovillamos modellező rendszer, amely a környezeti tényezők figyelembe-vételével számítja a modulok energiaveszteségeit és –nyereségeit, beleértve a szélsősebesség alapján számítható felületi hőtranszportot a változó hőátadási tényező alapján. A módszer felhasználható fotovillamos rendszerek energiatermelésének meghatározásához, amit a PV és MHP PV/T típusú modulok energiatermelésének összehasonlításával kívánok bemutatni.

A vizsgálatokat és eredményeket rendszerezve tehát célom egy komplex fotovillamos modellező rendszer elkészítése, amely alkalmas fotovillamos és PV/T rendszerek előzetes méretezésére. A célkitűzés így módon az, hogy az eddigieknél pontosabb, a cellahőmérséklet számítására alkalmas modellt hozzak létre. Erre az elkészült modellel kísérletet teszek több PV rendszer mérési adataival való összehasonlításban.

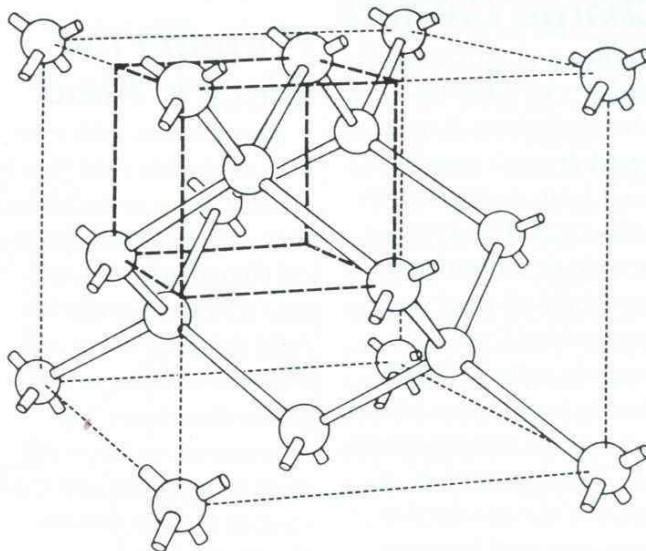
## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben feldolgozom a fotovillamos modulok melegedésére vonatkozó ismereteket, a hőmérséketfüggést, a vizsgálati szabványokat és a modelleket amelyek ez alapján a hatásfokot számolják. Kitérek a fotovillamos modulok passzív hűtési lehetőségeire, illetve a termikus nyereség számítására PV/T modulok esetében.

### 2.1. A napelem működése, típusai

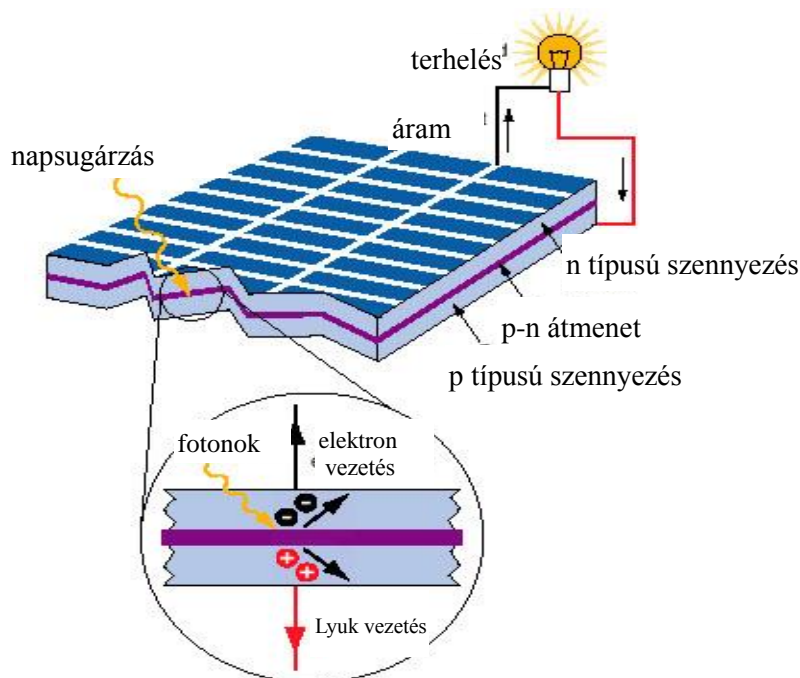
A napelem olyan eszköz, amely a Nap sugárzási energiáját közvetlenül alakítja át villamosenergiává. A napelem alapanyagául szolgáló félvezetőben a napsugárzás fotonjai abszorbeálódnak és villamos töltéshordozó lyuk-elektron párt generálhatnak, ha energiájuk nagyobb mint a félvezető anyag tiltott sáv szélessége. A fotovillamos elem olyan kialakítású, hogy a megfelelő vastagságú félvezető anyagban lyuk-elektron párt szétválasztó réteggel, többnyire félvezető p-n átmenettel, és az áram elvezetésére szolgáló, a rétegekhez kapcsolódó kontaktussal rendelkezik.

A Si atom vegyértékelektronjainak száma 4. A Si kristály atomjai egymáshoz kapcsolódnak, 2-2 elektront megosztva (1. ábra). A Si alapanyagú, n-típusú félvezető kevés foszfor-szennyezőanyag hozzáadásával készül. A foszfor atomnak 5 vegyérték-elektronja van, tehát ha elfoglalja egy Si atom helyét, akkor 1 elektron felesleges lesz (negatív-típus). A p-típusú anyag bór-szennyezéssel készül. A bórnak 3 vegyérték-elektronja van, így ha egy Si atom helyére kerül, egy elektron helye üres marad, azaz ott „lyuk” jön létre (2. ábra), ezért ezt pozitív-típusú (elektron-hiányos) anyagnak nevezzük (Sandia National Laboratories, 2014).



1. ábra. A szilícium kristályszerkezete

A napsugárzás hatására kiszakadó elektronokkal munkát végeztetünk, így azok energiaszintje csökken (SZIE-FFT, 2015). A fotoelektromos jelenség részletesebb leírására 2.6 pontban kerül sor.



2. ábra. A napelemek működése

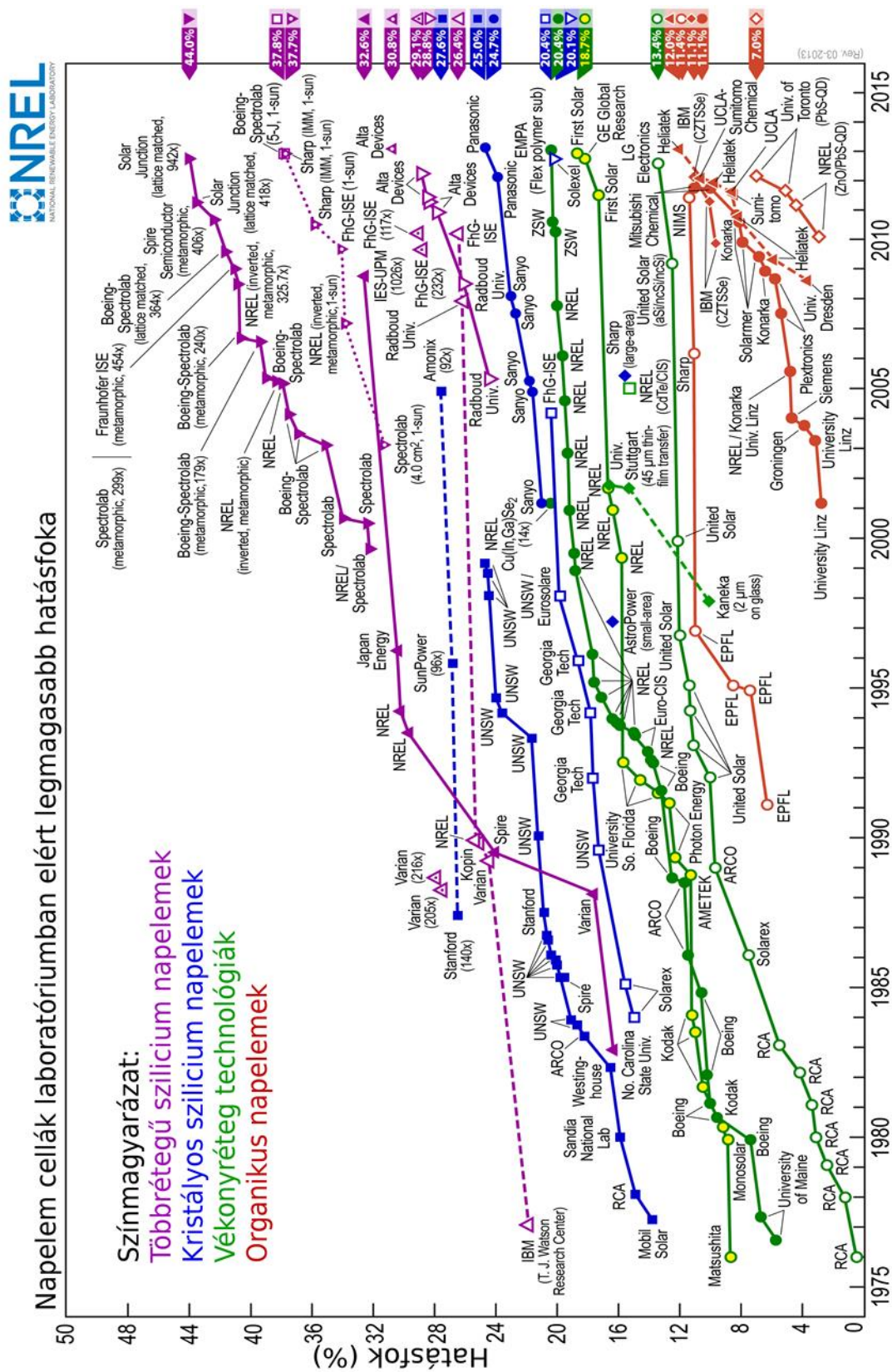
A kereskedelmi forgalomban kapható cellák döntő mértékben Si alapanyagúak, mert előnyt élveznek a más alapanyagú cellákkal szemben, mivel a szilícium olcsó és bőségesen áll rendelkezésre, ráadásul nincsenek környezetvédelmi korlátai, ami pl. a kadmium alapú cellákkal kapcsolatban felvetődik.

A 3. ábrán látható az amerikai National Renewable Energy Laboratory (NREL) összeállítása a különböző technológiák fejlődéséről és fejlettségéről. Ez alapján 4 alapvető technológiát különböztetünk meg: a kristályos szilícium napelemek -, a többrétegű szilícium napelemek -, a vékonyréteg napelemek - és az organikus napelemek típusait. Ár/érték arányban a gyártási költségek és a kiforrott technológia miatt a szilícium kristályos napelemek a legelterjedtebbek, piaci elterjedtségük is 78% (EPIA, 2014). Olyan helyeken ahol fontos a magas hatásfok (azaz az egységnyi területről begyűjthető energia aránya), például üresközöknél, ott a többrétegű szilícium napelemek dominálnak. Ezek hatásfoka laboratóriumi körülmények között már a 44%-ot is elérheti.

A napelemek hatásfokát jól definiált szabványos körülmények között, a napelem által szolgáltatott maximális teljesítmény ( $P_{max}$ ) és a felületet sugárzás teljesítményének hányadosával definiálják.

A napelem (PV) modulok földi alkalmazásában a kristályos és vékonyréteg napelemek a legelterjedtebbek. 2013-ban, a beépített modulok aránya a kristályos napelemek javára 78%, míg a vékonyréteg modulok a maradék 21-22%-ot képviselik a 40 GW összes gyártási kapacitásból. A kristályos szilícium modulok a legelterjedtebbek, illetve ezek képviselik a legjobb ár/érték arányt így a disszertációmban is ezzel foglalkozom (EPIA, 2014).



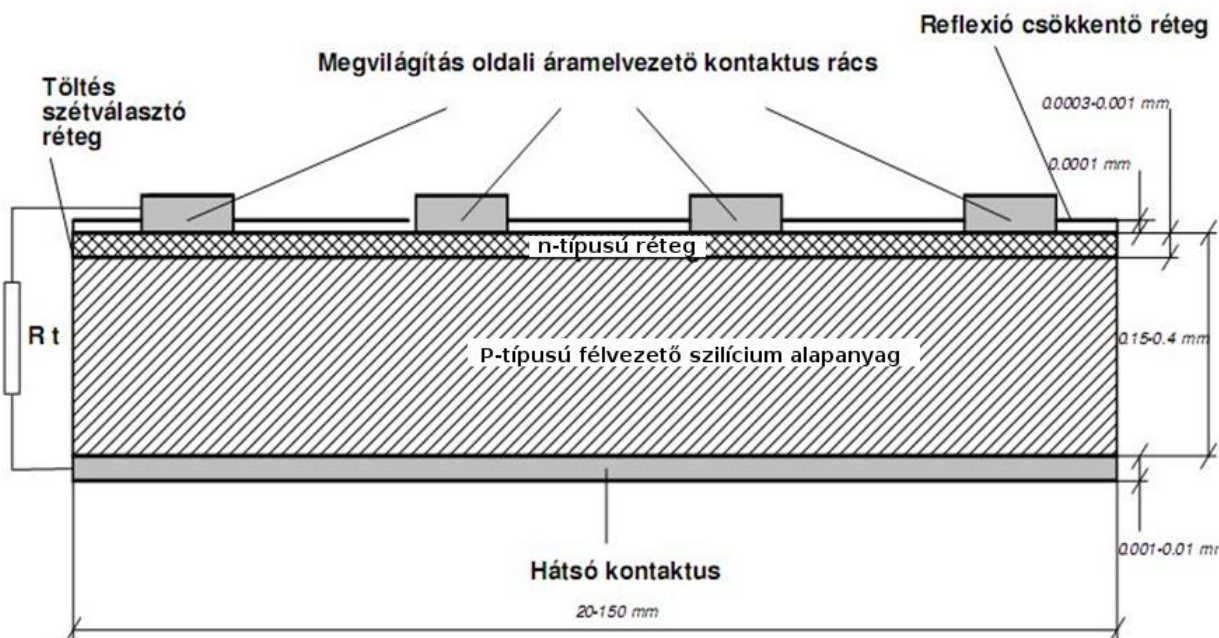


3. ábra. Különböző típusú fotovillamos cellák laboratóriumban elért legmagasabb hatásfokai (NREL, 2014)

A kristályos szilícium modulok felépítése a következő:

A kristályos szilícium *cellákat* úgynevezett wafer-ekből (kristályosított Si tömb) állítják elő 140 µm és 240 µm közötti vastagságban. A gyártás lépései a vágás, a rétegszennyezés, a textúra tisztítása, a vezetősávok nyomtatása, majd az antireflexiós réteggel való bevonás. Az alapréteg

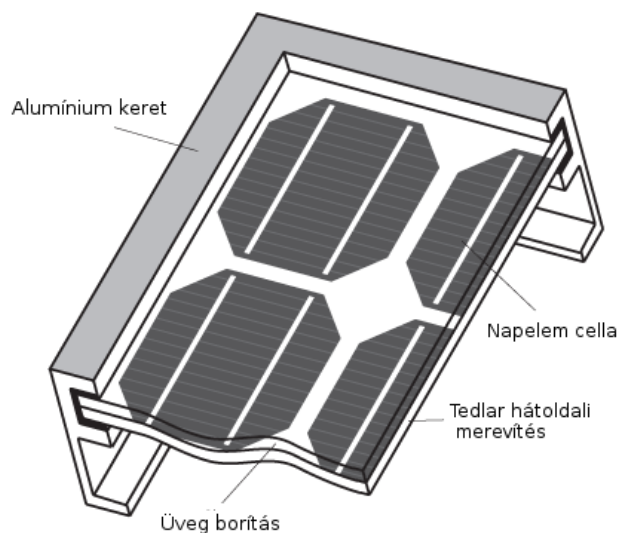
egy 150-400 nm vastag ún. mély-diffúziós réteg, ami bórral szennyezett (4. ábra) a kristályrácsban. A passzíváló (legfelső-) réteg 80 nm vastag és szilícium-nitrid anyagú, a tetején (tisztítás után) megjelenő kristályszerkezettel, ami mikroszkóp alatt piramisokként látszik, amelyek viszonylag rendezetlenül 2-15  $\mu\text{m}$  magasak. Ezeknek a fény elnyelésében fontos szerepük van. A tetején 15-25  $\mu\text{m}$  vastag ezüst gyűjtőrác található a hátsó kontaktus pedig egy alumínium lemez 25-50  $\mu\text{m}$  vastagságban. Ezen rétegek vastagsága elhanyagolható a szilícium rétegvastagságához viszonyítva, ezért a cellákat egységes Si anyagúként szokás kezelni a mechanikai és termikus vizsgálatok során. Részletesebb leírást a felépítésről a következő irodalomban találunk: (Kazmerski, 1997).



4. ábra. A napelem modulok elvi felépítése

A *gyűjtővezeték* (interconnections) rézszálakból áll, amik teljesen forranyaggal (újabbán ez ezüst a környezetvédelmi szabályok szigorodása miatt) vannak fedve. Ezek 130  $\mu\text{m}$  mélyek és 2 mm szélesek, ebből a forranyag 20  $\mu\text{m}$ . A cella fajtájától függően 2-3 db ilyen gyűjtősáv van a cellák elülső oldalára forrasztva. Alternatívaként kutatják a vezető ragasztóanyagok használatának lehetőségét is, amik elviekben még csökkenthetik a vezetősávok hőmérsékletét és ezáltal a termikus feszültséget (Bennet, et al., 2007; de Jong, 2010; Eikelboom, et al., 2011).

A *beágyazó réteg* (encapsulant layer) a cellákat lezárja és rögzíti. A beágyazó anyagnak nagy optikai átlátszósággal kell rendelkeznie, jól kell hogy kössön a különböző anyagokhoz (üveg, Si, tedlar) és fel kell vennie a különböző anyagok hőtágulásából adódó feszültségeket, továbbá jó villamos szigetelőnek kell lennie (Jorgensen, et al., 2010). A leggyakrabban használt beágyazó anyag az EVA (etilén-vinil-acetát), ami a kristályos modulok 99%-ban megtalálható (Czanderna, Pern, 1996; Kempe, 2010). Használják, illetve kísérleteznek további anyagokkal is mint a PVB (polyvinyl butyral) és a szilikon-gumi keverékek. Nagyon ígéretes a polysiloxane gél beágyazóként, mivel a kutatásoknak megfelelően (Poulek, et al. 2012) ezen anyag használatával szinte megszűnnek a delaminálódási problémák. A polysiloxane magas hőmérséklet tartományban használható (-60 - +250  $^{\circ}\text{C}$ ), jobb az optikai áteresztőképessége és magasabb hővezetése (0,18 W/mK) mint az EVA-nak, így akár 50 év garantált élettartam érhető el használatával.



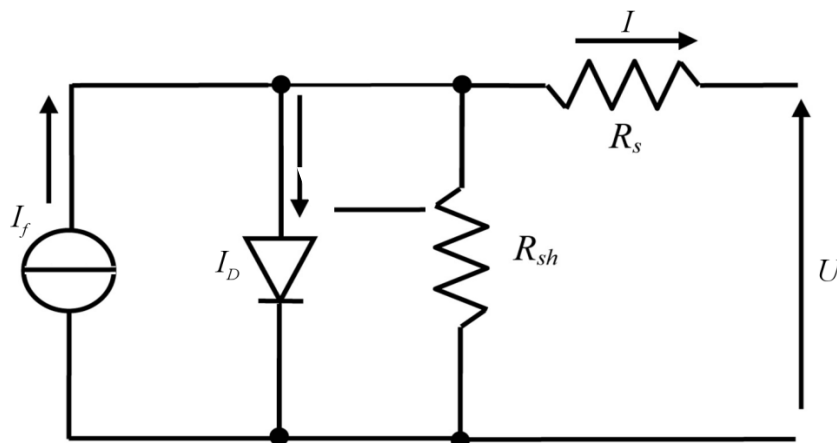
5. ábra. A PV modul felépítése

A moduloknál használt *üveg* hőkezelt és nagyon alacsony vastartalmú, tipikus vastagsága 3,2 mm vagy 4 mm. Az üveg adja a moduloknak a mechanikai merevséget és az előoldali ellenállóképességet, továbbá fontos a nagy optikai áteresztőképesség (amit a csökkentett vastartalommal érnek el). Az üveg védi a teljes elektronikát a környezettől és az is feladata, hogy kiszűrje a napsugárzás ultraibolya sugarait, mivel az nagymértékben károsítaná az alatta levő polimer beágyazó anyagokat és ez korai minőségromláshoz vezet. Rövid hullámhosszokra alkalmas elnyelőképességét az üveg ceriummal való szennyezésével érik el. Sok gyártó az üveg felületi textúrájának javításával (Blieske, et al., 2003) vagy valamilyen antireflexiós anyaggal való bevonásával (Neander et al., 2006) próbálja elérni az alacsonyabb visszaverődést.

*Hátoldoldali merevítésként* leggyakrabban használt anyag a tedlar (Kempe, 2008).

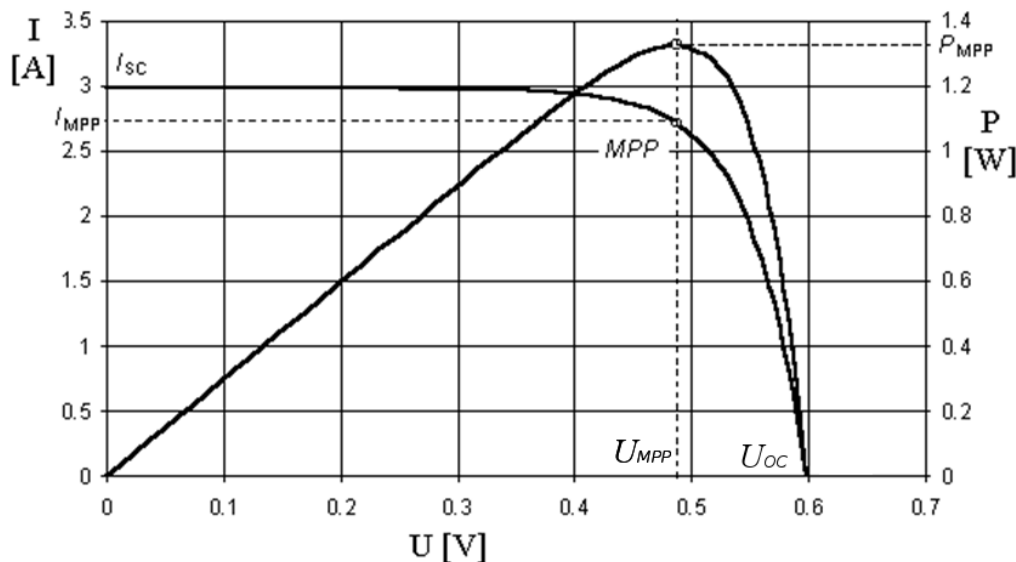
## 2.2. Fotovillamos modulok paraméterei

A napelemek elvi működése a diódákéhoz hasonlítható, amelyben a két réteg határán kialakuló p-n átmenetnél, a létrejövő energialepcsőt a töltéshordozók a rákapcsolt fotovillamos feszültség hatására képesek átlépni. A napelemben a fény energiája készíti az elektronokat az energialepcső leküzdésére. A napelemek karakterisztikáját egy helyettesítő kapcsolással határozhatjuk meg, amelyben a fotovillamos cella p-n átmenete egy diódát alkot, amire egy elméleti villamos áramgenerátort kapcsolunk (6. ábra). Így az  $I$  kimenő áram a villamos  $I_f$  áram és az  $I_D$  dióda áram különbségeként adódik:  $I = I_f - I_D$ .



6. ábra. A napelem helyettesítő kapcsolása (Nemcsics, 2001)

Ezek ismeretében felrajzolható a napelem I-U jelleggörbéje (7. ábra):



7. ábra. A napelem cella I-U és P-U jelleggörbéje (Quaschnig, 2004)

Az 6. ábráról a napelem cellák alapvető jellemzői leolvashatók:

- $U_{oc}$ : üresjárási feszültség (*open circuit voltage*). A fény által generált áram teljes egészében a diódán keresztül folyik. A szilícium napelem cellák szokásos üresjárási feszültsége 0,55-0,65 V.
- $I_{sc}$ : rövidzárási áram (*short circuit current*). A napelemek p-n végeinek összekötésével rövidzárát alakítunk ki. Az ebben az esetben fellépő legnagyobb áram a rövidzárási áram.
- MPP: Maximális leadott teljesítmény (*maximal power point*), ( $P_{max} = U_{MPP} * I_{MPP}$ ). Úgy határozhatjuk meg, hogy a görbe alatti maximális területű, I-U oldalú téglalapot keressük. A maximális teljesítmény pont beállítását végző elektronikai egység az MPPT (Maximal Power Point Tracking – maximum teljesítmény pont követés).
- A napelemek és a napelem modulok névleges teljesítményét Wp-ben (Watt peak - csúcsteljesítmény) adják meg.

Ezen mért adatok alapján határozható meg a kitöltési tényező (FF – fill factor). Ez a maximális levehető teljesítmény osztva az üresjárási feszültség ( $U_{oc}$ ) és a rövidzárási áram ( $I_{sc}$ ) szorzatával:

$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} I_{sc}} = \frac{\eta A_c E}{U_{oc} I_{sc}}. \quad (2.1)$$

A kitöltési tényezőre közvetlen befolyással a sönt ellenállás és a cella soros ellenállása van. A sönt ellenállás növelése ( $R_{sh}$ ) és a soros ellenállás csökkentése ( $R_s$ ) magasabb kitöltési tényezőhöz vezet, azaz közelebb visz az elméletben elérhető legmagasabb teljesítmény levételéhez.

### 2.3. A fotovillamos modulok vizsgálati körülményei

A napelemek teljesítményének jellemzőit szabványosított körülmények között határozzák meg, amelyek országonként eltérőek lehetnek, ezért a legelterjedtebb nemzetközi szabványok vizsgálati körülményeit ismertetem.

- IEEE 1262-1995 Recommended practice for qualification of photovoltaic (PV) modules (STC szabvány)
- IEC/EN 61215 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval (NOCT szabvány)



Az STC (Standard Test Conditions) az IEEE 1262-1995 szabvány szerint napelemek vizsgálatakor, tanúsításkor a következő körülményeket veszik figyelembe:

- A napsugárzás felületegységre eső teljesítménye:  $P_{be}=1000 \text{ W/m}^2$
- A levegőben megtett út hatása a napsugárzás beesési szögének függvényében: AM 1,5 (Air Mass, optikai légréteg; úrben AM0, merőleges beesés pl egyenlítőnél AM1, 60 foknál AM2,  $AM=1/\cos\alpha$ )
- A napelem hőmérséklete:  $T = 25^\circ\text{C}$

A 1. táblázatban egy tipikus napelem-modul specifikációi láthatók (ETSolar, 2015), ahol feltüntetik az STC szerinti mért értékeket – amit általában minden gyártó megtesz, de ezen modulok esetében az NOCT is megadásra került.

1. táblázat: Az ETSolar napelemgyár moduljainak tulajdonságai

A napelem modulok villamos jellemzői			
Model típus	ET-M660265BB	ET-M660260BB	ET-M660255BB
Max. teljesítmény	265 W	260 W	255 W
Modul hatásfok	16,29%	16,98%	15,67%
Munkaponti feszültség ( $V_{mp}$ )	31,7 V	31,14 V	30,91 V
Munkaponti áram ( $I_{mp}$ )	8,36 A	8,35 A	8,25 A
Uresjárési feszültség ( $V_{oc}$ )	38,63 V	37,86 V	37,82 V
Rövidzárási áram ( $I_{sc}$ )	8,97 A	8,96 A	8,88 A
Teljesítmény garancia	0-tól 5 W		
Maximális rendsz. feszültség	DC 1000 V		
NOCT	44,4 °C		

Az IEC/EN 61215 szabványnak megfelelő tesztkörülményeket az olaszországi Isprában dolgozták ki, ezért ezt a mérésorozatot Ispra tesztnek is nevezik. Az Ispra teszteken nem csak modulok villamos paramétereit vizsgálják, hanem mechanikai tesztek is végeznek, úgy mint hajlításra, terhelésre, jégbecsapódásra, termikus terhelésre és fagyasztásra vonatkozó tulajdonságait is. Meghatározásra kerül STC körülmények közt a hatásfok, a hőmérsékletfüggési tényező és a NOCT is (TÜV, 2003).

#### 2.4. A napelemek veszteségei

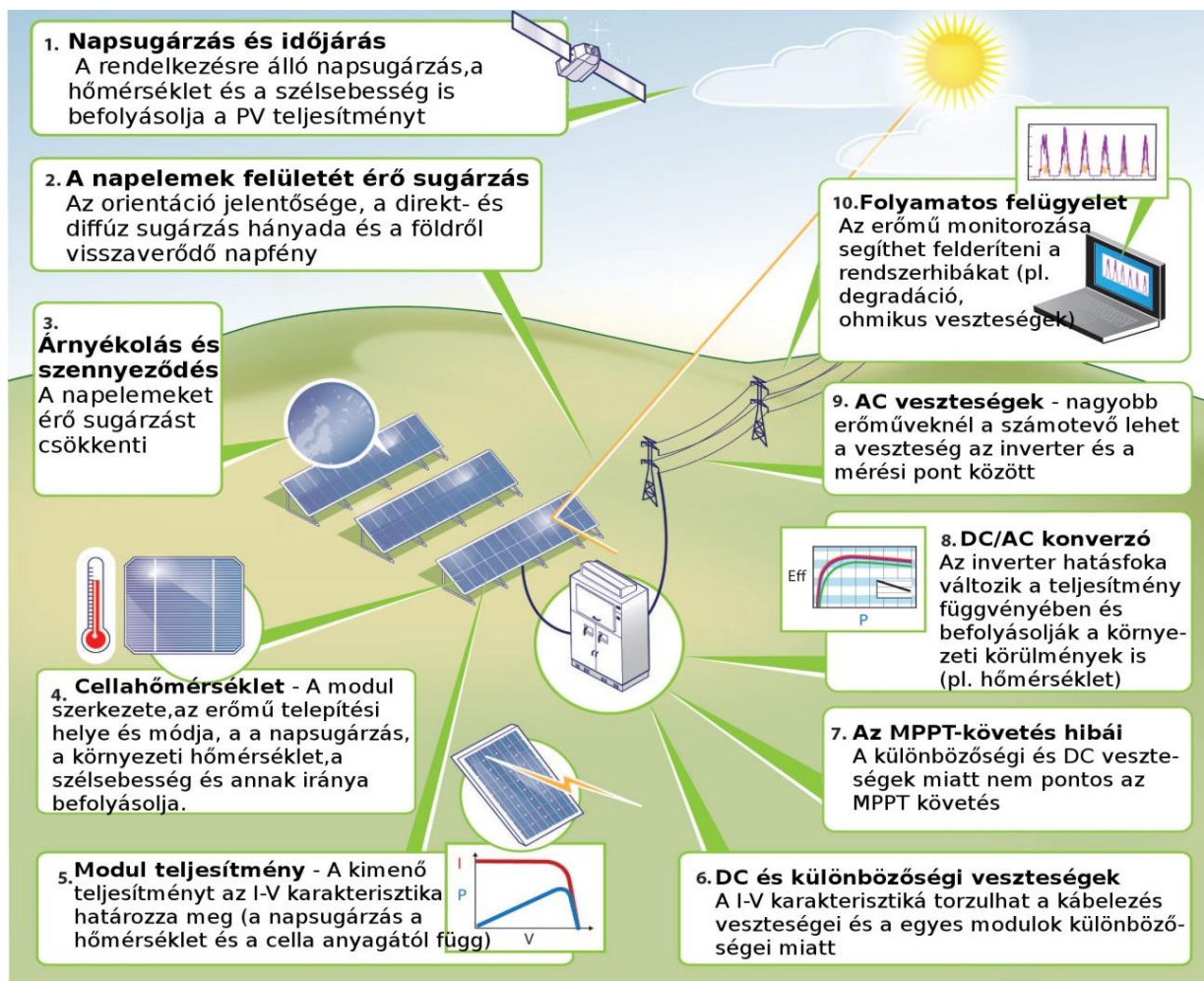
Egy hálózatra kapcsolt fotovillamos rendszer veszteségeit alapvetően két részre bonthatjuk: modul- és rendszerveszteségek. A modul veszteségei (Norton, 2011)

- a reflexió,
- a melegedés általi veszteség (termikus veszteségek),
- a belső veszteségek, mint
  - a rekombináció,
  - belső ohmikus veszteségek,
- és egyéb a nem megfelelő telepítésből adódó veszteségek, mint
  - az árnyékolódási veszteség (és a szennyeződés)
  - a tájolási veszteségek (ha nem napkövető rendszer).

A teljes rendszerek további veszteségei

- a munkaponti követés (MPPT) tökéletlensége,
- a huzalozás ohmikus veszteségei,
- az inverter veszteségei
- és a stringen belüli különbözőségi veszteségei (pl. nem azonos munkapontok a moduloknál, illetve a munkapont eltolódása az ohmikus veszteségek miatt).

Ezekon kívül számolni kell még a fotovillamos modulok öregedéséből (degradáció) adódó veszteségekkel, ahogy a 8. ábrán is látható (Sandia National Laboratories, 2014).



8. ábra A fotovillamos rendszerek teljesítményét befolyásoló tényezők

Ilceto és Vigotti (1998) egy 3 MWp fotovillamos erőmű veszteségeit vizsgálva megállapították, hogy az erőmű veszteségei a következőképpen alakulnak (2. táblázat):

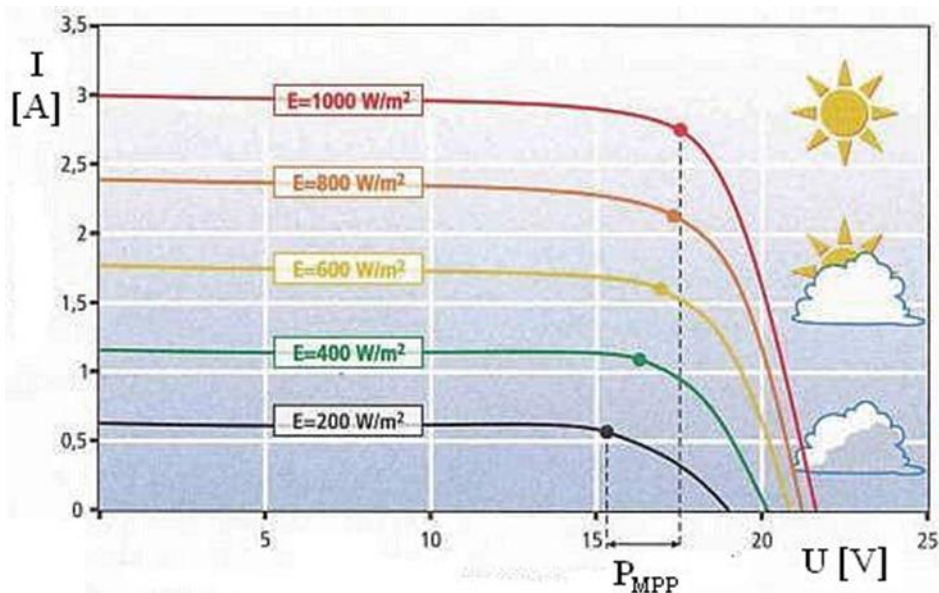
2. táblázat: Az olaszországi Selle naperőmű veszteségei

Reflexió	Melegedés	Inverter és MPPT	Árnyékolás	Ohmikus	Különbözőségi
3,1%	7,6%	4%	0,3%	1,2%	5,7%

A mérési eredmények itt azt mutatják, hogy a melegedési veszteségek igen nagy hányadot képviselnek.

### 2.5. A modulok hőmérsékletfüggése

A napelem-modulok teljesítményét alapvetően két tényező befolyásolja: a modulra eső sugárzás intenzitása és a cellák hőmérséklete. Az első tényezőt a naptól érkező sugárzás mennyisége befolyásolja, ami az átlagos Föld-Nap távolság mellett a Föld légkörén kívül a sugárzásra merőleges felületen  $1353 \text{ W/m}^2$ , de ennek egy része a légkörben elnyelődik, vagy visszaverődik. A veszteség mértékét a páratartalom és a felhősödés nagyban befolyásolja, míg tiszta időben  $1000 \text{ W/m}^2$  körüli a légkörön át a földre érkező sugárzás, addig felhős időben  $200 \text{ W/m}^2$  (9. ábra), (Mayfield, 2012).

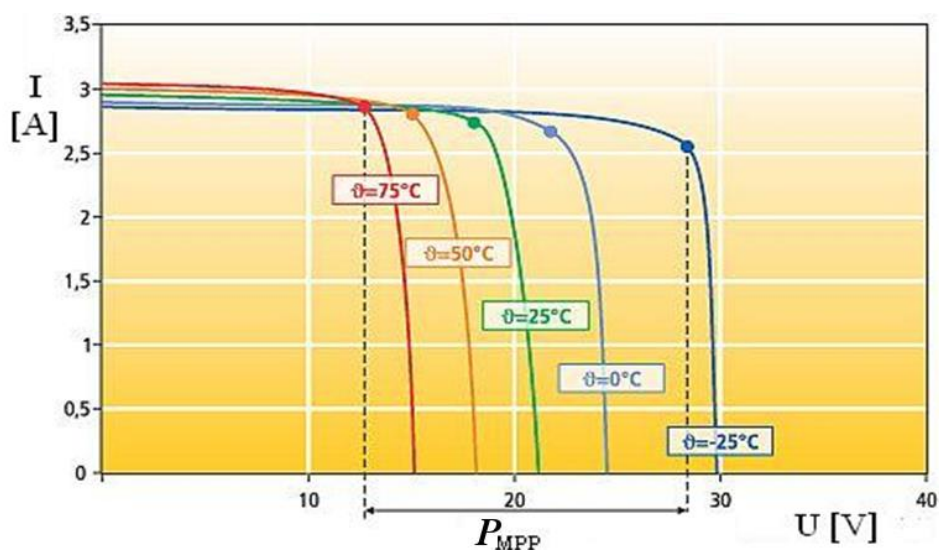


9. ábra A modulok karakterisztikájának változása a napsugárzás függvényében

Bár a beesési energia növelésére van lehetőség gyűjtőlensékekkel és prizmákkal, de így csak a maximális teljesítmény növelhető, a hatásfok nem (ráadásul drága megoldás, mert nagy tisztaságú üveg kell és bonyolult a gyártás is).

A másik tényező a napelemek hőmérséklete. A Si napelemek teljesítménye egyenesen arányosan csökken a hőmérséklet növekedésével, átlagosan 0,2%-kal Celsius fokonként (10. ábra). A kereskedelmi forgalomban kapható napelem-cellákat 25 °C-on tesztelik (STC), de a gyakorlatban a cellák hőmérséklete elérheti akár a 80-90 °C-ot is. A napelemek felszínét érő fény nagyvonalakban a következőképpen hasznosul/alakul át:

A napelem felszínéről átlagosan 3-5% fény visszaverődik, 12-18% villamos energiává alakul, a többi pedig hőenergiává. Tehát egy átlagos napelem a napsugárzási teljesítmény 75-80%-át hőenergiaként veszi fel, ami növeli a cellahőmérsékletet.



10. ábra A modulok karakterisztikájának változása a hőmérséklet függvényében

Ahhoz, hogy pontosan meghatározzuk a napelem teljesítményét, tudnunk kell az aktuális működési hőmérsékletet. Ezt tapasztalati úton az NOCT szabvány (Nominal Operating Cell Temperature – névleges működési cella hőmérséklet) segítségével tehetjük meg, amelynek értékét a gyártók a napelem modulok műszaki adatlapján teszik közzé (Ross, 1980). Az NOCT szám meghatározása, a gyár által, a következő feltételek mellett történik:



- a fotovillamos cella vagy modul szabadon áll, a szél körüláramolhatja,
- a napsugárzás intenzitása:  $P_{be} = 800 \text{ W/m}^2$ ,
- a levegő hőmérséklete:  $T_{levegő} = 20 \text{ °C}$ ,
- szélesség:  $v_{szél} = 1 \text{ ms}^{-1}$ .

Az NOCT ismeretében, a modul aktuális működési hőmérsékletét a következő egyenlet segítségével számíthatjuk:

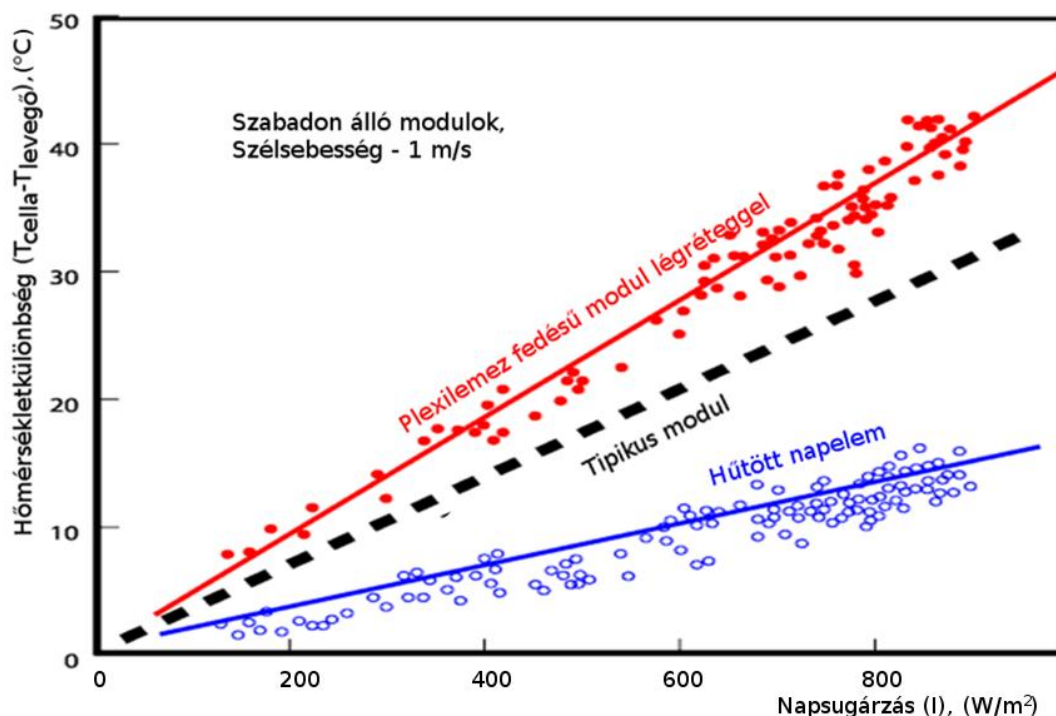
$$T_{modul} = T_{levegő} + \frac{NOCT-20}{800} I, \quad (2.2)$$

ahol  $I$  az aktuális mért globálisugárzás  $\text{W/m}^2$ -ben, a  $T_{levegő}$  pedig a mért léghőmérséklet.

A (2.2) összefüggés tapasztalati és egyszerűsített, figyelembe veszi a konvekciót és a hővezetést, de feltételezi például, hogy az anyag hővezetési együtthatója nem változik erőteljesen a hőmérséklettel.

Példa:  $30 \text{ °C}$ -os levegő hőmérsékletnél, ha  $NOCT = 47 \text{ °C}$  és a besugárzás  $1200 \text{ W/m}^2$  (lásd: 76. ábra) akkor a modulhőmérséklet  $70,5 \text{ °C}$ .

A 11. ábrán két PV-modul hőmérséklete látható a besugárzás, a levegő- és a cellahőmérséklet különbségének függvényében (Ross, Smokler, 1986). A meredekebb egyenessel jelzett modul helytelenül lett kialakítva, mert a cellák és a védőplexi közt légréteg van. A legalacsonyabb hőmérsékleti karakterisztikával rendelkező modul a hátoldalon hűtőbordákat tartalmaz. A jobbik modul NOTC hőmérséklete  $33 \text{ °C}$ , a rosszabbé  $58 \text{ °C}$ , a tipikus Si kristályos moduloké pedig  $48 \text{ °C}$  körül van. A tipikus modul az 5. ábra szerinti, egyrétegű üvegezéssel, Tedlar hátoldallal.



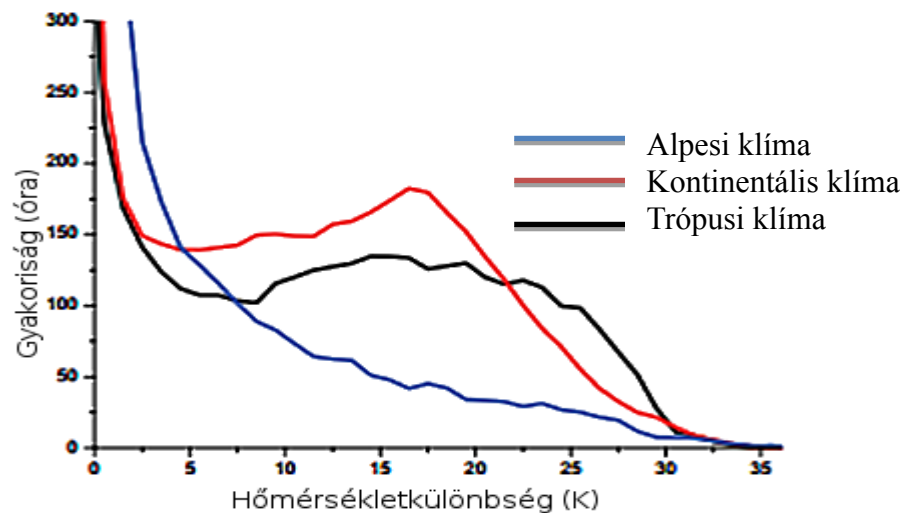
11. ábra Különböző kialakítású napelem-modulok hőmérsékletfüggése

A saját mérések eredményeit a 4.1 fejezet tartalmazza, amelyek rámutatnak, hogy a cellahőmérsékletek valóban jóval magasabb értéket érhetnek el, mint a hatásfok meghatározásakor alkalmazott STC mérési körülmények közt. Hasonló értékek figyelhetők meg mások méréseinél is (Seres, 2007).

Ezek alapján nagyon fontos lenne, ha a mérési adatokra alapozva lehetne látni éves szinten, hogy mekkora a modulok  $20 \text{ °C}$ -tól való eltérése. Az ilyen irányú adatgyűjtést nehezíti, hogy csak működési időszakokra kell rögzíteni ezen adatokat. Zinber, M. (2010) feldolgozott hasonló



adatsort, de nem a 20 °C-tól való eltérést, hanem a környezeti hőmérsékletet vette viszonyítási alapnak, három különböző klíma esetén (12. ábra).



12. ábra. A környezeti- és a napelemek hőmérséklete közti különbség gyakorisága

A továbbiakba tárgyaljuk a napelemek hatásfokának hőmérséklettől való függését, a modulhőmérséklet lehetséges számításának módját és a melegedés kvantumfizikából származtatható okát. Érdeemes megvizsgálni, hogy milyen konkrét értékek adódnak a gyakorlatban, hogy a tervezés és a telepítési helyszín/mód fontosságát hangsúlyozzam.

Egy napelem cella energia-konverziós hatásfoka ( $\eta$ ), annak a teljesítménynek a százalékos értéke melyet a cella begyűjt és átalakít (az abszorbeált fényt villamos energiává), ha a fotovillamos cella villamos hálózatra van csatlakoztatva. Ez az érték számítható a maximális munkaponti teljesítmény ( $P_m = I_{mp} U_{mp}$ ), és a besugárzási teljesítmény hányadosaként ( $W/m^2$ ), standard tesztkörülmenyek (STC) között és a napelem-cella vagy a modul nettó méretének ismeretében ( $A_{PV}$ ,  $m^2$ ).

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{I A_{PV}}. \quad (2.3)$$

Például ilyen körülmények között egy 12%-os hatásfokú cella, 10x10 cm ( $0.01 m^2$ ) felülettel várhatóan 1,2 Watt teljesítményt szolgáltat.

Ezen paraméterek közvetlen mérésének nehézségei miatt, egyéb értékeket mérünk: a termikus hatásfokot, a kvantum hatásfokot,  $U_{OC}$  arányokat (open circuit voltage –üresjárási feszültség), és a kitöltési tényezőt (fill factor –  $FF = (U_{mp} I_{mp}) / (U_{oc} I_{sc})$ ). A reflexiók veszteségek a külső kvantum hatásfokot befolyásolják (external quantum efficiency), míg a rekombinációs veszteségek a kvantum hatásfokot,  $U_{OC}$  arányt, és kitöltési tényezőt. Az ellenállás veszteségeket főképp a kitöltési tényezőhöz sorolják, de kismértékben a kvantum hatásfokot,  $U_{OC}$  arányt is befolyásolja. A valós hatásfok lehetséges meghatározása az NOCT (vagy egyéb modul hőmérséklet-számítás) alapján a következő módon lehetséges (Breteque, 2008):

$$\eta_{pv}(I, T_m) = \eta_{STC} (1 + \alpha_h (T_m - 25) + f(I)), \quad (2.4)$$

ahol  $\alpha_h$  a PV modul hőmérsékletfüggési együtthatója (tipikus érték  $\alpha_h = -0,5\%/^{\circ}C$ , kristályos szilícium modulokra; amorf/vékonyréteg modulok esetében ez az érték általában alacsonyabb). Az  $f(I)$  a globális sugárzás függvénye.

Az NOCT hibája, hogy nem működés közben, azaz terhelés nélkül, vizsgálja a modulokat, hanem csak az üresjárási feszültséget és a rövidzárási áramot mérve, így valós körülmények közt ez sokszor nem pontos (Breteque, 2008). Fuentes (1985) az INOCT (Installed Nominal Operating Cell Temperature) szabvány bevezetésével, ami szintén empirikus kutatás eredménye, az átlagos modulhőmérséklet alapján számol:

$$T_m = T_k + \left(1 - \frac{\eta_{STC}}{\tau \alpha_h}\right) \frac{I}{800} (NOCT - 20), \quad (2.5)$$

ahol  $\tau$  az abszorpciós tényező,  $\alpha_h$  a hőmérsékletfüggési együttható. Valójában sokféle hatásfok megadási-mód lehetséges, de ezek többsége empirikus és/vagy valamilyen mért együttható tartalmaz, így minden esetben a hatásfok meghatározáshoz bonyolult mérési folyamatra van szükség (3. táblázat), (Skoplaki, Palyvos, 2009).

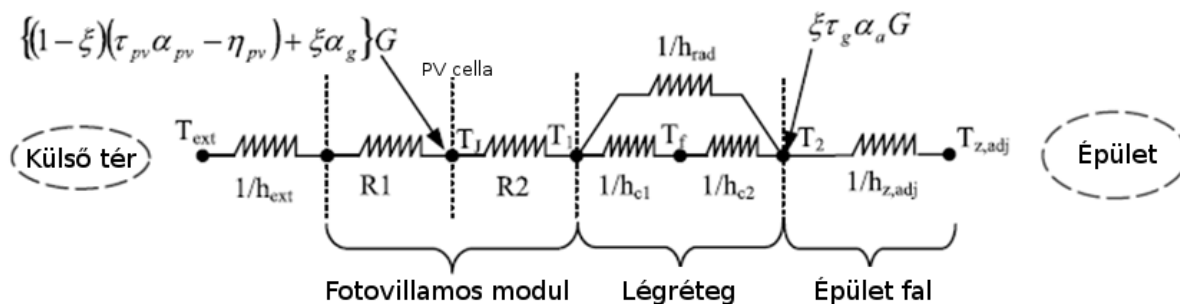
3. táblázat: Különböző hatásfok-számítási módszerek

Hatásfok-hőmérséklet összefüggés	Megjegyzés	Szerző(k)
$\eta_v = \eta_{ref} [1 - \beta_{PV} (T_{PV} - T_{ref})]$	$T_{ref}=25^\circ\text{C}$ , $\eta_{ref}=0,15$ , $\beta_{ref}=0,0041^\circ\text{C}^{-1}$ , c-Si, $T_i$ [°C]	Evans, Floschuetz – 1977
$\eta_{PV} = \eta_{ref} - \mu (T_c - T_{ref})$	$\mu$ a hőmérsékletfüggési együttható	Bazilian, Pasad – 2002
$\eta_{PV} = \eta_a - c (T - T_a)$	$T$ az átlagos modulhőmérséklet, $\eta_a$ a $T_a$ hőmérsékleten mért hatásfok, $c$ a hőmérsékleti együttható	Bergene, Lovik – 1995
$\eta_T = \eta_{25} + b (T_c - 25)$	$b=b(\text{Gr})$ , $b$ a hőmérsékleti együttható	Durisch et al. – 1996
$\eta(\text{Gr}, T_c) = \eta(\text{Gr}, 25^\circ\text{C}) [1 + c_3 (T_c - 25)]$	$c_3=-0,5$ (hőmérsékleti együttható – c-Si)	Mohring et al. – 2004
$\eta_T = \eta_0 - K (T^{\frac{1}{4}} - T_0^{\frac{1}{4}})$	$T_0=273\text{K}$ , $K=22,4$	Ravindra, Srivastava – 1980
$\eta_c = \eta_n \times k_\gamma \times k_\theta \times k_\alpha \times k_\lambda$ , ahol $k_\gamma = 1 - \gamma (T_c - 25) / 100$	$k_\gamma$ =hőmérsékleti együttható, $k_i$ , $i=\theta, \alpha, \lambda$ optikai-, abszorpciós- és spektrális korrekciós tényezők	Aste et al. – 2008
$\eta_i = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I_i]$	$\eta_i$ =az aktuális óra hatásfoka, $I_i$ =napsugárzás, $\beta_{ref}=0,0045^\circ\text{C}^{-1}$ , $\gamma \sim 0,12$ , $T_{ref}=25^\circ\text{C}$	Evans, Christofari et al. – 2006
$\eta = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} \text{Gr}]$	$\eta$ =modulhatásfok, $\beta_{ref}=0,0044^\circ\text{C}^{-1}$ , $\eta_{Tref} = 0,125$ , $T_{ref}=25^\circ\text{C}$	Notton et al. – 2005
$= \eta_{ref} \left[ 1 - 0,9\beta \frac{\text{Gr}}{\text{Gr}_{NOCT}} (T_{e,NOCT} - T_{a,NOCT}) - \beta (T_a - T_{ref}) \right]$		Hove – 2000
$\eta_{nom} = -0,05 T_{surface} + 13,75$ $\eta_{meas} = -0,053 T_{back} + 12,62$	ahol, $T_{surface} = -1,06 T_{back} + 22,6$ a márt és a névleges hatásfok alapján számítva	Yamaguchi et al. – 2003
$\eta = a_0 + a_1 \frac{T_{c(x,t)} - T_\infty}{T_\infty} + a_2 \frac{G_T - G_{ref}}{G_{ref}}$		Zhu et al. – 2004
$\eta = \eta_{NOCT} [1 - MPTC (T_{NOCT} - T_c)]$	MPTC: maximum power temperature coefficient	Perlman et al. – 2005
$\eta = a + b \frac{T_{in} - T_a}{G_T}$	PV/T kollektorokhoz. ahol, $a=0,123$ , $b=-0,646$	Chow et al. – 2006
$\eta = 0,94 - 0,0043 \left[ T_a + \frac{G_T}{22,4 + 8,7 W_v} - 25 \right] \pm 2,6\%$	A szélesebbesség, a környezeti hőmérséklet és a napsugárzás esetén is napi átlagértékkel számol.	CLEFS CEA – 2004

Az Evans-Florschuetz együtthatók ( $\beta_{ref}$ ) a különböző típusok függvényében határozhatók meg mérésel (Evans, Florschuetz, 1977), ahogy azt számos típusra megtették kül. szerzők (Skoplaki, Palyvos, 2009).

Olyan hőmérséklet számítási módszert is kidolgoztak, ami mérés nélkül, kizárólag a modulok anyagtulajdonságai alapján számolná a hőmérsékletet. Zondag és társai (2002) PV/T kollektorokra dolgoztak ki olyan véges elemes modellt, ami meglehetősen bonyolult, széleskörű számításra nem alkalmas, viszont rendkívül pontosan írja le a termodinamikai folyamatokat.

Guivarch és Peuportier készített egy egyszerűbb hőáram hálózatos modellt (Guivarch, Peuportier, 2006), ami közel olyan pontos eredményt ad mint a Zondag és társai féle modell, de ez mindössze 2 csomóponttal számol (a modulra vonatkozóan), és így bonyolult megadni a szerkezet hőtani tulajdonságait, továbbá a Ricaud-féle „egydiódás modell”-el (Ricaud, 1997) számolja a beeső napsugárzást, ami nem veszi figyelembe a direkt és diffúz sugárzási komponenseket (13. ábra). A légréteg konvektív hőellenállása viszont nem adható meg pontosan, illetve túl kicsi a szerkezet „felbontása”, ami így nem ad pontos eredményt a cellahőmérsékletre vonatkozóan. Maga a modell jó közelítés, mivel ahogy (Buzás et al., 1998) tanulmányában olvasható: „A hőáramhálózatos modellnek az előnye, hogy egy általános formula, így azonos modellt lehet alkalmazni a különböző struktúrákhoz, mindezzel elérve a kívánt pontosságot.”



13. ábra. A Guivarch-féle hőáramhálózatos modell

A hőmérséklet és így az aktuális működési hatásfok ismeretében megadható a kimenő teljesítmény. Ha viszont új rendszert szeretnénk tervezni és meg szeretnénk határozni a megtérülési időt és a pontos termelési adatokat, szükségünk lesz meteorológiai adatokra. Az általános PV méretező programok többnyire alkalmaznak valamilyen meteorológiai adatbázist.

## 2.6. A kvantumhatásfok, a napelem cella melegedése

A fotovillamos cellák kvantum-energia átalakítóként működnek és emiatt vonatkozik rájuk a „termodinamikai-hatásfok korlát” vagy termodinamikai paradoxon fogalma. Azok a fotonok, melyek energiája kisebb mint az abszorber-anyagának tiltott sáv szélessége (band gap,  $E_g$ ), nem képesek lyuk-elektron párokat létrehozni, azaz nem generálnak töltéshordozót, így ezek energiája, ha abszorbeálódott, hő formájában disszipálódik. Ugyanez a helyzet azokkal a fotonokkal, amelyek energiája nagyobb, mint a tiltott sáv szélesség, mert ezek ugyan képesek töltéshordozót generálni, de a maradék kinetikus energiájuk szintén hővé alakul ahogy az elektronok egyensúlyi sebességre lassulnak, mégha kétszer akkora is volt az energiaszintje, mint a „band gap” (Nemcsics, 2001).

Azok a fotovillamos cellák melyek változó tiltott sáv szélességű anyaggal rendelkeznek (például a több rétegűek), sokkal hatékonyabban alakítják át a szolár spektrumot, mivel az egyes spektrumok energiaszintje változó, mert ahogy ismert:

$$W = nh\nu, \quad (2.6)$$

és foton esetében

$$W = mc^2 = \frac{h}{2\pi\omega}, \quad (2.7)$$

ahol  $h$  a Planck állandó,  $\nu$  a frekvencia,  $\omega$  a körfrekvencia,  $n$  a kvantumszámok 1, 2, 3,...

(Csurgay, Simonyi, 1997). Ahogy egy foton abszorbeálódik, a fotovillamos cella anyagában létrehozhat egy szabad töltéshordozót, lyuk-elektron párt. A töltéshordozók egyike (a kisebbségi hordozó) elérheti a p-n átmenetet és részt vesz a cella villamos áramának növelésében. Egyéb esetben a töltéshordozó elveszíti az átadott kinetikus energiáját és újra kötésbe kerül egy atomban ahol lyuk található (ilyenek a pozitív töltésű atomok, ionok). Így módon a töltéshordozó rekombinálódik és nem vesz részt az villamos áram generálásban.

A kvantum hatásfok (quantum efficiency – QE) arra az értékre utal, hogy a fotonok hány százaléka vett részt az áramgenerálásban, tehát érte el a p-n átmenetet amikor a cella rövidre zárva működik. A külső kvantum hatásfok (external quantum efficiency – EQE) a beeső fotonok azon hányada, amely villamos árammá alakul, míg a belső kvantum hatásfok (internal quantum efficiency – IQE) az abszorbeált fotonok azon hányada, amely villamos árammá alakul. Matematikailag tehát a belső kvantum hatásfok az EQE reflexióval ( $R$ ) és transzmittanciával ( $T$ ) csökkentett értéke (2.8). A relatíve nagy tömegű és vastag Si cellák esetében  $T$  hozzávetőlegesen nulla, illetve praktikus okokból elhanyagolható (Jensen et al., 2000):

$$IQE = \frac{EQE}{(1-R-T)}. \quad (2.8)$$

Tehát a kvantum hatásfok nem keverhető össze a hagyományos értelemben vett hatásfokkal, minthogy az nem közöl információt a fotovillamos cella által átalakított energiáról. Ráadásul a kvantum hatásfok spektrális mérésekkel kerül meghatározásra, tehát ez az energia és hullámhossz függvényeként kerül felírásra. Miután a félvezetők az egyes hullámhosszú fényekre érzékenyebbek mint a másokra, ezért a kvantum hatásfok mérésével hasznos információkhoz juthatunk a fotovillamos cellák felületének és a belső elnyelődésnek a minőségére.

Az IQE mindig nagyobb értékű, mint az EQE. Az alacsony IQE szint azt jelentheti, hogy a cella aktív rétege nem jól hasznosítja a fotonokat, az alacsony EQE érték pedig a túl sok visszaverődött fotonra enged következtetni (Yang et al., 2008).

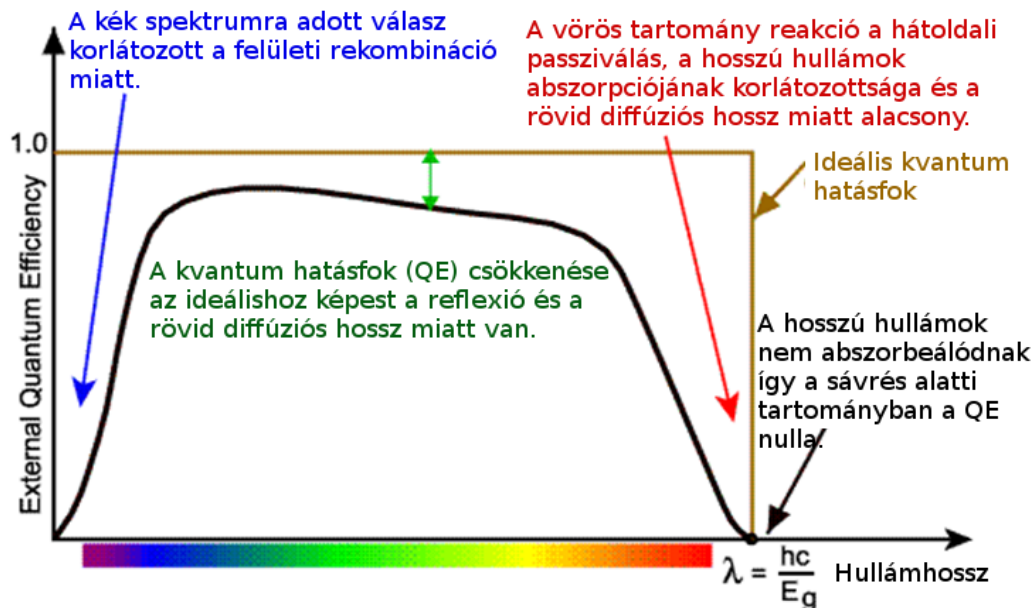
Ahhoz hogy az IQE-t meg tudjuk határozni, először a külső kvantum hatásfokot kell mérni, majd a transzmissziót és a reflexiót és ezekből következtethetünk a belső kvantum hatásfokra.

Minden fotovillamos cella hatásfoka a cellán belül is változik, minden hullámhosszra az egyes régiók másképp reagálnak. Egy rossz hatásfokú régióknak aránytalanul magas hatása van az egész cella működésére a hatásfok-csökkenés szempontjából, ezért ajánlott ezek vizsgálata és a hibás területek csökkentése amennyire lehetséges (megállapítható hőkamerával – red dot failure).

A napfény a fényspektrum széles terjedelmét hordozza, így ajánlott, hogy egy cella minél szélesebb terjedelemben hasznosítsa azt. Az alacsony hatásfokot sokszor az egyes hullámhosszokra való gyenge reakció okozza, amit korszerű technológiával csökkenteni lehet, néha pedig a nem megfelelően kialakított anti-reflexiók bevonat a hibás ebben.

Ideális esetben a kvantum hatásfok függvénye négyszög alakú (14. ábra), ahol a QE értékének állandónak kellene lennie az egész szolár spektrumra vonatkozóan (National Science Foundation, 2015). A spektrum alsó határa általában 300 nm, felső határát pedig az  $E_g$  tiltott sáv határozza meg. Általában a QE-t a rekombinációs veszteségek csökkentik a legjobban, mert az abszorbeált fény által generált töltéshordozó nem jut el a p-n átmenetig. Ha módosítjuk az elülső oldalt, az hatással lehet a felület-közeli töltéshordozók kialakulására, például a nagy energiájú kék fény a felület közelében abszorbeálódik, ezért a felületi rekombináció a kvantum hatásfok kék spektrumára van hatással. Ugyanígy az alacsonyabb energiájú zöld spektrum a cella

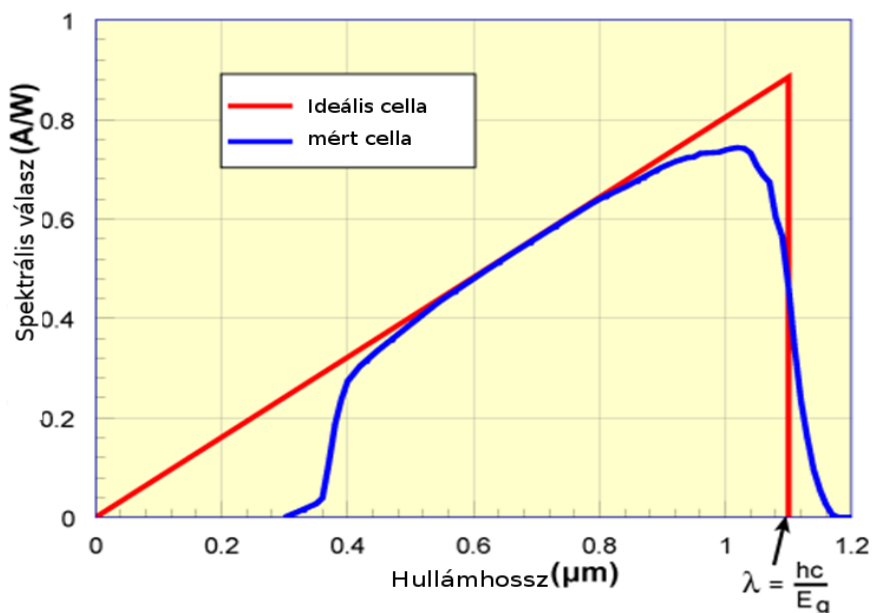
belsejében abszorbeálódik, így ez a belső rekombinációs veszteségekre van hatással. Technikailag, a kvantum hatásfok meghatározható az egyes fényspektrumok függvényében, integrálva a cella vastagságával és normalizálva a beeső fotonok számával (Goetzberger et al., 1997).



14. ábra. Az ideális és valós kvantum hatásfok

A napelemeknél a homlokl felület és a hátoldal a legnagyobb rekombinációs veszteségi felület. A homlokoldalt ezért általában  $\text{SiO}_2$ -dal passziválják, míg a hátoldalon létrehoznak egy erős  $\text{P}^+$  adalékolást. Az így kialakuló potenciálgát a kisebbségi töltéshordozókat a p-rétegben tartja, ezzel jelentősen csökkentve a rekombinációt (Nemcsics, 2001).

A napelemek spektrális érzékenysége a spektrális válasz (spectral response – SR) koncepciójában azonos a kvantum hatásfokkal. A QE megadja a cella kimenetén jelentkező elektronok számát (áram formájában) összehasonlítva a cellára ráeső fotonok számával, míg a spektrálválasz a fotovillamos cella által generált áram és a cellát ért energia aránya, 15. ábra (Arizona State University, 2015).



15. ábra. Szilícium alapú fotovillamos cella spektrális válasza üveg tokozásnál

Rövidhullámoknál 400 nm alatt az üveg tokozás abszorbeálja a legtöbb fényt ezért a cella válasza elég alacsony. Közepes hullámhossz tartományban az adott cella az ideálist közelíti, de hosszú tartományokban nullához közelít, amit a tiltott sáv szélesség korlátoz ( $E_g = 1.12$  eV). Kis hullámhosszú fénysugaraknál a foton energiája magas, így ez az a tartomány melynek energiája főleg hőként disszipálódik és ez jelentős teljesítménycsökkenéshez vezet a teljes spektrum esetében is, ezért szokás kvarcüveget alkalmazni tokozásként mivel ez jótékony hatásként fogható fel. Amennyiben hűtött modulról van szó, akkor más anyagot szokás választani.

A spektrálválasz meghatározása  $SR(\lambda)$ :

$$SR(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{E(\lambda)}, \quad (2.9)$$

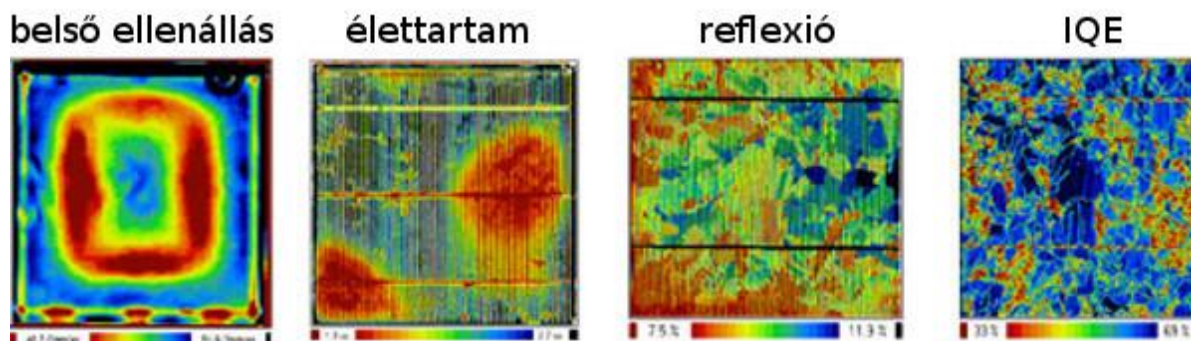
ahol  $I_{sc}(\lambda)$  a cella rövidzárási árama,  $E(\lambda)$  a besugárzott energia és  $\lambda$  a fény hullámhossza ami a cellát eléri.

A kvantumhatásfokot a spektrális érzékenység alapján a következő módon számítjuk:

$$QE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} SR(\lambda). \quad (2.10)$$

A kvantum hatásfok meghatározása méréssel is lehetséges. Manapság több módszer is elterjedt, de ha csoportosítani szeretnénk őket, akkor a *rövidre zárt* (pl. LBIC, CELLO) és az *érintés nélküli* (contactless) főbb irányvonalakat lehetne megemlíteni. Az utóbbi előnye, hogy már a gyártáson vizsgálhatók az egyes cellák a kontaktusok felhelyezése nélkül, míg az előző esetében komolyabb berendezésre és hosszadalmas mérésre van szükség, de ennek pontossága egyelőre meghaladja az érintés nélküli technológiáét.

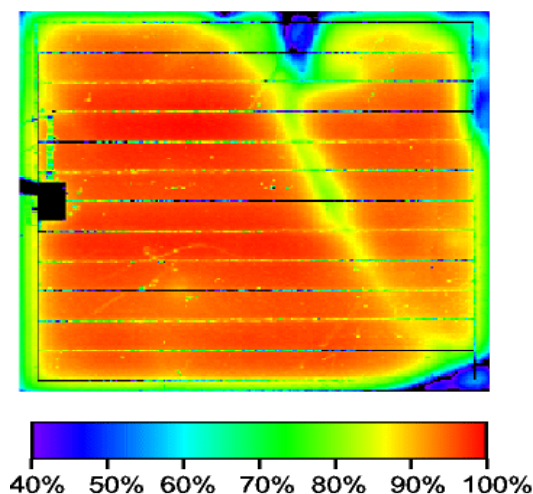
Egy fotovillamos cella globális paramétereit (pl. az I-V karakterisztikát) a cella helyi értékei határozzák meg. Ez alatt a cella lehető legkisebb felbontását kell érteni, amit még mérni tudunk. A lokális fotoáram mérése már pár éve lehetséges az LBIC (Light Beam Induced Current) technológia segítségével, ahol egy változtatható hullámhosszú lézersugár segítségével tapogatják le a felületet az STC paraméterek mellett. Az alap megvilágításra azért van szükség, mert a rekombinációs veszteségek túl nagyok lennének a nem megvilágított területre tévedő elektronok miatt. Amíg a lézer letapogatja a felületet, méri a kimenő áram változását minden egyes pontban, így térképezve fel a felület és a belső rétegek veszteségeit (16. ábra). A hullámhossz 400 nm-től 1000 nm-ig változtatható, lefedve ezzel szinte az egész szolár spektrumot, amely a valóságban is hatással lehet a cellákra (Carstensen, 2003).



16. ábra. A lehetséges mérések az LBIC technikával (Semilab, 2014)

A lézersugár átmérője 100  $\mu\text{m}$ , így ez több millió pontot jelent egy cella esetében, de az eredmény nagyfelbontású, vizuálisan tökéletes képet nyújt. Ezen technológiával mérhető a reflexió is, mivel a lézer esetében pontosan tudható a beeső fotonok száma, és így az IQE karakterisztika pontosan felvehető (Bordin et al., 2000), (17. ábra).



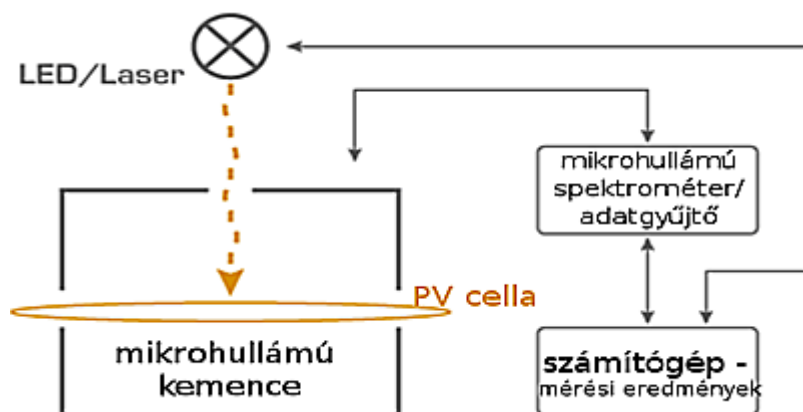


17. ábra. A belső kvantum hatásfok (IQE) színskálája LBIC technikával mérve

Az érintés nélküli technológiákban az a közös, hogy valamilyen módon gerjesztik a vizsgált felületet és egy spektroszkóppal vizsgálják a változásokat. Több válfaja is elterjedt, kezdve a fehér fényrel megvilágított napelemtől a lézeren át a legújabb mikrohullámú technikákig.

Ezek a technológiák az ipari termelésben terjedtek el, mivel a korszerű képelemzési módszerekkel párosítva automatizáltan végezhetőek ezek a vizsgálatok. Az MDP (microwave detected photoconductivity) főleg élen jár ezen a területen, mivel a vizsgálatok pontossága megközelíti az LBIC technológiákét, bár alkalmazhatósága nem olyan széleskörű, mivel ezzel a módszerrel (ahogy a többi érintés nélküli technikával is) főleg a hibás tartományok, a vezetési keresztmetszet mérhető fel, viszont az meglehetősen nagy gyorsasággal (17. ábra).

10 GHz-es mikrohullámmal dolgozik a rendszer, melynek energiája 1 és 100 MW között változhat (FreibergInstruments, 2014). A lézerral gerjesztett pontokat mikrohullámú spektrometria segítségével gyorsan lehet mérni/beolvasni.



18. ábra. Az MDP rendszer felépítése

## 2.7. Fotovillamos méretező programok

Azokat a programokat/modelleket ismertetem, amelyek a kereskedelemben kapható méretező-programok (pl. PVSOL, TRNSYS, Homer, RETScreen, NSOL, stb.) háttérét biztosítják (pl. PVGIS, Meteonorm, SWERA, MeteoSyn, Wasa SSE, Solmet TMY2/3, stb.), mivel a rendszerek (akár háztartási méretű, akár nagyteromű) tervezésénél többnyire ezek elterjedtek.

Számos, a fotovillamos rendszerek tervezéséhez és méretezéséhez használható program létezik, ezek általában számolják a rendszerteljesítményt a napelem modul, inverter és a tervezési sajátosságok alapján adatbázisból, viszont mindnek szükséges valamilyen – a földrajzi

adottságoktól függő, bemenő paramétereket biztosítani. Ezen bemenő paraméterek a napsugárzás – a hőmérséklet és némely esetben a széladatok. A meteonorm adatbázis például tartalmazza a széladatokat, de korántsem biztos, hogy azzal számol egy adott program. Összességében viszont elmondható, hogy ezek az adatbázisok interpolált adatokat tartalmaznak, ezért nem pontosak. Ennél nyilvánvalóan jobb módszer a helyi mérési adatokon alapuló modell használata (Háber et al., 2013). Az ismertett szoftverek alkalmasak a fotovillamos modulok energatermelésének becslésére a hőmérséklet változásával befolyásolt hatásfok számításával (19. ábra). A hatásfok változásának számítása eltérő.

A következő táblázatban (4. táblázat) felsorolásra kerültek a kristályos szilícium PV rendszerek méretezésére használt legfontosabb szoftverek a felhasznált szimulációs modell ismertetésével (Klise, Stein, 2009):

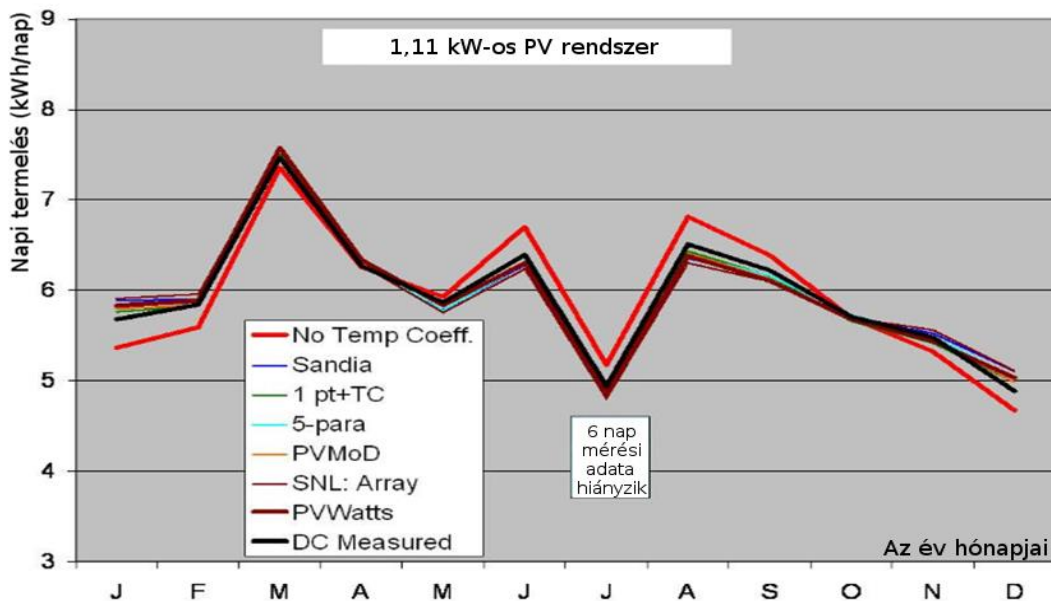
4. táblázat: Különböző PV méretező szoftverek és alapvető tulajdonságaik

Program neve	Sugárzás modell típusa	Teljesítmény számítás	Meteoro-lógiai adatbázis	Publikálta	Megjegyzések
<b>PVSS</b>	nincs alkalmazva	„Egydiódás” kapcsolás alapú, egyszerű hőmérséklet számítás	egyedi	Goldstein L.H. 1977 és Kirkpatrick 1970	Az egyik legelső modell 1976-ból.
<b>SOLCEL</b>	nincs alkalmazva	„Egydiódás” kapcsolás alapú, egyszerű hőmérséklet számítás.	SOLMET	Linn J.K. 1977	Fortran alapú program
<b>Evans and Facinelli</b>	Dőlésszög alapú korrekciós tényező	„Power temperature coefficient model”	SOLMET	Evans D.L., Facinelli W.A. 1978	
<b>PVForm</b>	Perez et al.	Módosított „power temperature coefficient model” Különböző egyenletek nagy és kis napsugárzáshoz. Fuentes féle termikus modell.	TMY	Menicucci, D. F., 1985	A SOLCEL továbbfejlesztése. PVForm can still be licensed from SNL.
<b>PVDesignPro</b>	HDKR, Perez et al.	Sandia PV Array Performance Model.	TMY 2/3, METEONORM, custom locations.	Mau Solar Energy Software Corporation	1980 körül fejlesztették, 2004-es az utolsó változat.
<b>Solar Advisor Model (SAM)</b>	Isotropic Sky, Hay and Davies, Reindl, Perez et al.	Sandia PV Array Performance Model, 5-Paramater Array Performance Model, simple-efficiency model, PVWatts.	TMY2, EPW (TMY3), METEONORM.	Mehos M., Mooney D. 2005	NREL fejleszti, jelenleg is megvásárolható
<b>5-Parameter Array Performance Model</b>	nincs	Fél-tapasztalati jellegű 5 paraméteres egydióda modell	nincs	Duffie & Beckman 1991	Wisconsin Egyetem fejleszti, a SAM modellben is felhasználták, TRNSYS-be is be van építve
<b>PVWatts</b>	PVForm alapú (Perez et al.)	PVForm alapú	TMY 2 for US. For international sites, SWERA, CWEC, IWEC.	Marion B., Anderberg M., 2001	NREL fejleszti SAM-ban is használják. A legtöbb program amelyik nem saját fejlesztésű modellt használ, ezt licenszeli: pl. <b>PVOptimize, OnGrid, CPF Tools</b>
<b>PVSYST</b>	Hay, Perez et al.	„Egydiódás” kapcsolás alapú. Beesési szög számítás, Hőmérséklet korrekció	Meteonorm, Satellight, TMY 2, ISM-EMPA, Helioclim-1 and 3, NASA-SSE, WRDC, PVGIS-ESRA, RETScreen.	Mermoud A. 1995	Genovai Egyetem fejleszti, jelenleg is elérhető.
<b>PV F-Chart</b>	Isotropic Sky (Liu, Jordan 1963)	Evans , Facinelli modell alapú	TMY2	Clark P.L. 1985	



<b>PVSol</b>	Hay and Davies	Based on irradiance and module voltage at STC and efficiency characteristic curve. Linear or dynamic temperature model. Incident angle modifier.	MeteoSyn, Meteonorm, PVGIS, NASA SSE, SWERA, custom locations.	Valentin Energy Software	1998-ban fejlesztették, most is kapható a legfrisseb verzió
<b>INSEL</b>	Isotropic Sky, Temps and Coulson, [Bugler, Hay and Kambezidis], Perez et al., and Reindl et al.	Egy és két diódás modell, négyféle beesési szög modellel	Worldwide InselWeather database.	Obst, C., 1994	Doppelintegral GmbH
<b>SolarPro</b>	nem ismert	„Egydiódás” kapcsolás alapú, egyszerű hőmérséklet számítás	Japan Meteorological Agency.	1997	Laplace System, Japan
<b>Clean Power Estimator (CPE)</b>	PVForm (Perez et al.)	PVForm alapú	TMY2, Múhold alapú mérési adatok!	1998	www.cleanpower.com
<b>HOMER</b>	HDKR	Power calculated as a function of incident radiation, derating, rated array capacity and PV cell temperature.	Scaled data in a text file. User can select locations in software, use TMY 2 data or input custom data.	NREL 1993	
<b>PVToolbox</b>	nem ismert	„Egydiódás” kapcsolás alapú, egyszerű hőmérséklet számítás	nem ismert	Thevenard D. 2002	Kanadai fejlesztés ottani meteorológiai adatbázissal
<b>UW-Hybrid (TRNSYS)</b>	Isotropic Sky, Hay and Davies, Reindl, Perez et al.	5-parameter array performance model	TMY, TMY 2, Meteonorm, EnergyPlus, IWECC.	TRNSYS	TRNSYS modul

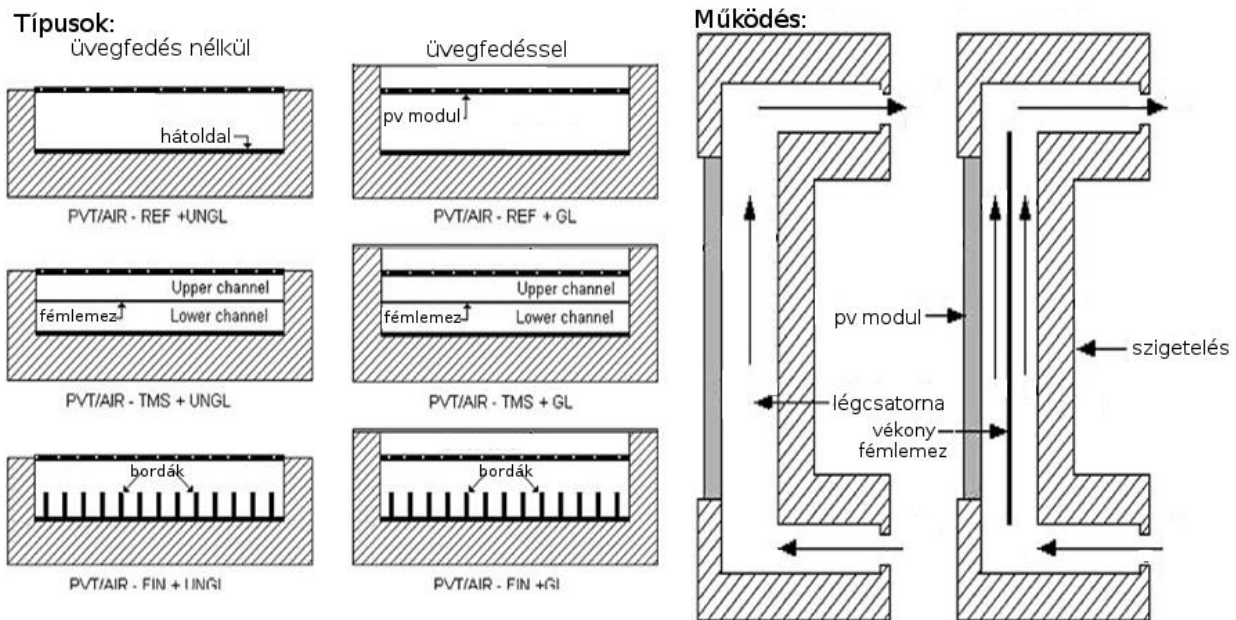
A fenti szoftverekkel összességében elég pontos számítások végezhetők, ahogy azt a 19. ábrán látható (Klise, Stein, 2009):



19. ábra. A különböző programokkal szimulált és a mért adatsor, havi bontásban

## 2.8. A napelem modulok hűtése

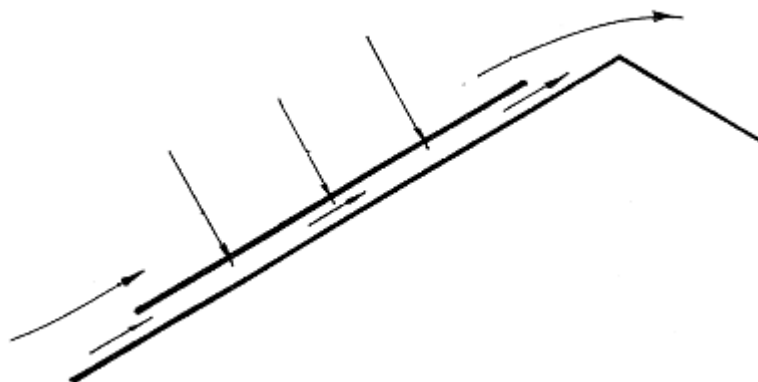
A fotovoltaikus modulok teljesítményét nagymértékben meghatározza azok hőmérséklete, ami bizonyos körülmények mellett mesterségesen csökkenthető. Erre sokféle lehetőség kínálkozik, kezdve az extrém esetekkel (pl. folyékony nitrogén hűtés vagy ventilátoros hűtés), de azt már korábban bizonyították, hogy az ezek által nyert teljesítménynövekedés nincs arányban a költségekkel, csak a koncentrátoros fotovoltaikus alkalmazásokban (Pravettoni et al., 2011). A passzív hűtési lehetőségek tárháza szintén széles, de ebben az esetben a hűtőközeg általában levegő, a légsere pedig vagy konvekció (amikor az anyagáramlást a benne kialakuló sűrűségkülönbség okozza) hatására (20. ábra), vagy a szél segítségével történik.



20. ábra Konvekciós passzív hűtésű napelem működése és típusai (Karim, 2011)

A konvekciós hűtést általában falba vagy tetőbe épített napelemeknél használják, és a hűtőközeg energiáját az épület fűtésére is lehet hasznosítani. A szabadon álló modulok hűtésében a szél és a konvekció egyaránt szerepet játszik (21. ábra).

A saját kutatás során a szabadon álló és tetőre helyezett napelemek áramlási viszonyait vizsgálok, figyelembe véve a hőközlés ezen formáit, mivel esetünkben mindkettő nagy szerepet játszik.



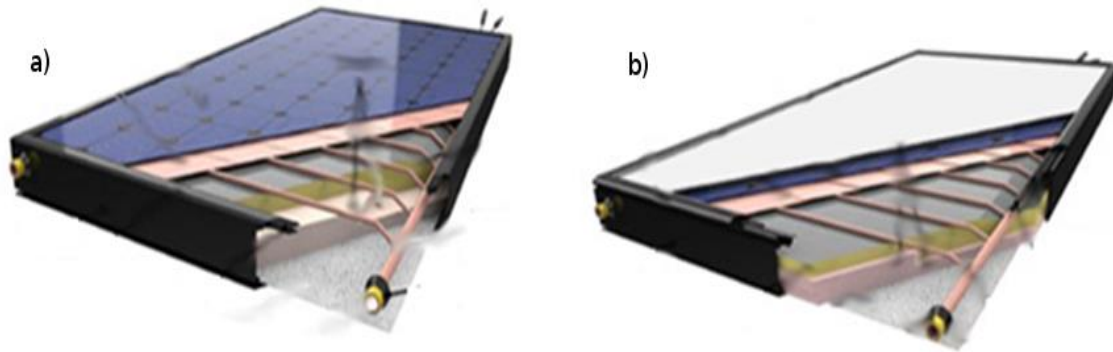
21. ábra A napsugárzás hatására megindul a konvekció

Másik lehetőség a PV/T (fotovoltaikus és termál kollektor), amikor a napelem működése során keletkező hőt arra használjuk fel, hogy HMV-t (használati melegvizet) állítsunk elő. Nyilvánvaló, hogy ez a legjobb megoldás, hiszen így a modulok összhatásfoka elérheti a 60-

70%-ot (Bergene, Lovik, 1995), viszont telepítése csak olyan helyen lehetséges, ahol a termikus energiát fel is lehet használni. Emiatt kimondottan üzleti célú villamosenergia-termelésnél nem jön szóba, viszont ajánlott háztartási méretű rendszereknél.

### 2.9. A fotovillamos-fototermikus (PV/T) típusú rendszerek

A fotovillamos-fototermikus (PV/T) kollektorok olyan rendszerek amelyek kombinálják a fotovillamos modulokat a termikus napkollektorral, így egyazon berendezés hőenergiát és villamos energiát is termel. Többféle változata lehetséges, alapvetően megkülönböztetünk levegős (pl. 20. ábra) és folyadékos rendszereket (pl. 22. ábra), mivel ezek technikai kialakítása alapvetően különböző. A folyadék hűtésű rendszerek két alapvető szempont szerint készülnek: az egyik a fotovillamos hatásfokot helyezi előtérbe, a másik a fototermikus hatásfokot. Az alábbi ábrán látható a két megközeítés lehetséges technikai megvalósításai (Solar Choise, 2015):



22. ábra. A PV/T kollektorok két lehetséges megközelítése

A 22. ábrán látható a) jelű kollektor villamos energiatermelésre lett optimalizálva, b)-nek a termikus hatásfoka a magasabb. Míg az a) modul esetében egy hagyományosnak mondható PV modul alá helyeztek egy réz abszorbert és a hozzá kapcsolódó gyűjtőcsöveket, majd a hátoldalt szigetelték. A b) jelű ezen felül dupla üvegezést is kapott, ami egyértelműen növeli a reflexiót és az üvegezésben az elnyelődést. Ebben az esetben a cellahőmérséklet is magasabb lesz, mivel az elülső oldalon nem tudja leadni a hőt (konvektív módon) a környezet felé, viszont jobb lesz a termikus hatásfok és a jobb szigetelés miatt eleve magasabb hőmérsékletre fűti a közeget.

A teljesítmény alapú (exergia) mérések és kutatások alapján az alábbi tények összegezhetők: (Daghigh et al., 2011)

- A PV/T kollektor nagyobb kimenő energiasűrűséget produkál mint egy külön PV modul és egy síkkollektor.
- Minél nagyobb energiát szeretnénk kinyerni a PV/T kollektorból, annál rosszabb a villamos termelés hatásfoka.
- Exergia alapú vizsgálat alapján elmondható, hogy a legjobb teljesítménye a dupla üvegezést nem tartalmazó PV/T moduloknak van (Fujisawa, Tani, 1997).
- A plusz üvegezést nem tartalmazó modul ~8%-kal több villamos energiát termel, a kettős üvegezésű PV/T viszont hozzávetőlegesen azonos villamos energiát termel mint egy normál PV modul, továbbá annyi termikus energiát, mint egy normál síkkollektor külön.

Az exergia az a hasznos energiatarthatam amely az alkalmazás során munkává alakítható. Napenergiát hasznosító gépek esetén, (Mészáros et. al., 2004) „a szokásos jelölésmódnak megfelelően a vizsgált rendszer által a környezettől (időegységenként) felvett teljes energiát hívjuk tulajdonképpen *energiának* ( $E$ ), a hőerőgép által a környezetnek visszaadott energia szokásos neve *anergia* ( $A$ ), míg a kettő különbsége (tehát a hőerőgép által elvégzett hasznos munka) az úgynevezett *exergia* ( $E_x$ ). Az exergiát és az energiát a hatásfok ( $\eta$ ) kapcsolja össze:

$$E_x = \eta E .”$$

A PV/T kollektorok termikus hatásfokát ( $\eta_t$ ) a felhasználható termikus teljesítmény ( $Q_h$ ) és a modul felületére ( $A_k$ ) eső sugárzás ( $I$ ) alapján számíthatjuk. A villamos hatásfok ugyanígy a villamos teljesítmény ( $Q_v$ ) és felület ( $A_{PV}$ ), illetve az egységnyi felületre eső sugárzási teljesítmény ( $I$ ,  $W$ ) hányadosa. Ideális esetben  $A_k = A_{PV}$  (kollektor felület és nettó PV felület,  $m^2$ -ben), így

$$\eta_t = \frac{Q_h}{A_k I} \text{ és} \quad (2.9)$$

$$\eta_v = \frac{Q_v}{A_{PV} I}, \quad (2.10)$$

akkor a PV/T kollektor összhatásfokát a két részhatásfok összegeként írhatjuk fel:

$$\eta_{\sigma} = \eta_t + \eta_v. \quad (2.11)$$

Az összhatásfok az (2.9) és (2.10) alapján tehát mérésrel az alábbi módon adható meg:

$$\eta_{\sigma} = \frac{Q_v + Q_h}{A_k I}. \quad (2.12)$$

A PV/T síkkollektor által pillanatnyi hőteljesítményét ( $Q_h$ ) a rajta átfolyó közeg melegedéséből számíthatjuk.

$$Q_h = \dot{m} c_p (t_{ki} - t_{be}), \quad (2.13)$$

ahol  $\dot{m}$  a tömegáram,  $c_p$  a fajhő, továbbá  $t_{be}$  a bemeneten és  $t_{ki}$  a kimeneten mért hőmérsékletek.

Tovább részletezve Hottel és Whillier (1958) PV/T-re módosított modellje alapján a kollektor teljesítménye ( $Q_k$ ) kifejezhető az abszorbeált napsugárzás, a hőveszteségek és az előállított villamos energia alapján:

$$Q_k = F_R A_k [I(\tau\alpha) - U_L(t_{be} - t_w)] - Q_v, \quad (2.14)$$

ahol  $A_k$  a kollektor felület ( $m^2$ ),  $t_w$  a környezeti hőmérséklet,  $(\tau, \alpha)$  az üvegezés transzmittancia és abszorpciós jellemzői,  $U_L$  a teljes hőveszteségi fok,  $Q_v$  a villamos teljesítmény (W),  $F_R$  pedig a hőelvonási faktor., amely a (2.15) összefüggésből fejezhető ki:

$$\frac{F_R}{F'} = \frac{IC_b}{U_L F'} \left[ 1 - \exp\left(\frac{U_L F'}{IC_b}\right) \right]. \quad (2.15)$$

A további jelölések itt,  $C_b$  a vezetőképesség az abszorber és a cső között és  $F'$  a (2.17) alapján, vagy mérésrel a (2.16) képlettel határozható meg, a (2.14) összefüggést átrendezve, ahol a villamos teljesítmény nem jelenik meg.

$$F_R = \frac{Q_h}{A_k [I\tau\alpha - U_L(T_{be} - T_w)]}. \quad (2.16)$$

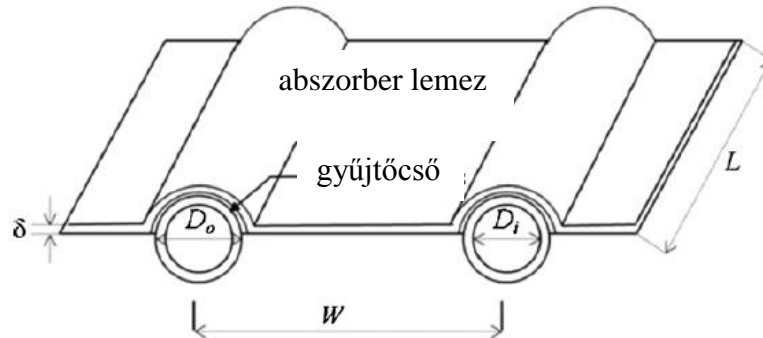
Az  $F'$  tényező a közeg alapján változik, vízre (és hasonló viszkozitású folyadékokra) a következőképpen írható fel:

$$F' = \frac{1}{U_L} \frac{1}{W \left[ \frac{1}{U_L [D_o + (W - D_o)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{wm}} \right]}, \quad (2.17)$$

ahol  $W$  a csőígyó sorai közti távolság (ami az abszorberre van hegesztve),  $D_o$  és  $D_i$  a cső külső és belső átmérője (23. ábra),  $h_{wm}$  a folyadék hőátadási tényezője. Az  $A/A_k$  arány a hasznos abszorber felület aránya a teljeshez viszonyítva,  $h_{wm}$  az egyenértékű sugárzási együttható és  $F$  a cső hatásfok ami a következőképpen adható meg:

$$F = \frac{\tanh\left[\sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}\left(W - \frac{D_o}{2}\right)\right]}{\sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}\left(W - \frac{D_o}{2}\right)}, \quad (2.18)$$

ahol  $k$  a cső hővezetése és  $\delta$  a csővastagság.



23. ábra. A kollektor abszorbera a megadott méretekkel

Ha a hőelvonási faktor ( $F_R$ ) ismert, a kollektor aktuális hőteljesítménye kifejezhető ( $Q_h$ ) a (2.16) összefüggésből és behelyettesíthető a (2.9) összefüggésbe, és így meghatározható a termikus hatásfok (2.19):

$$\eta_t = \frac{F_R A_k [I\tau\alpha - U_L(T_{be} - T_w)]}{A_k I}. \quad (2.19)$$

A fotovillamos hatásfok mérése a (2.10) összefüggés alapján lehetséges, de  $\eta_v$  megadható a 3. táblázat szerint is, így az Evans, Florschuetz (Evans, Florschuetz, 1977) képletet is használhatjuk:

$$\eta_v = \eta_{ref} [1 - \beta_{PV}(t_{PV} - t_{ref})], \quad (2.20)$$

ahol  $\eta_{ref}$  a standard körülmények közt mért hatásfok (STC),  $\beta_{PV}$  a modul hőmérsékletfüggési együtthatója,  $t_{PV}$  pedig a cellahőmérséklet. A  $t_{ref}$  a hőmérsékletfüggési együttható mérésekor meghatározott referencia hőmérséklet, ami a Standard Teszt Feltételek (STC) esetén 25 °C.

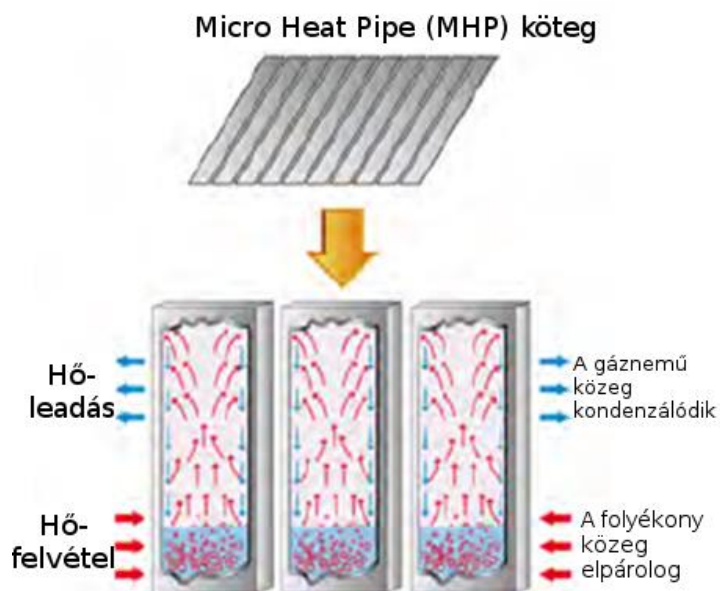
A kettős és a szimpla üvegezésű PV/T kollektorok az  $U_L$ , a  $\tau$  és az  $\alpha$  értékében különböznek. A vizsgált rendszer folyadék hűtés helyett hőcsöves (heat pipe) megoldással gyűjti be a hőt a kollektorfelületről, ami miatt a hőelvonási faktor és magának a hővezető anyag tulajdonságainak a meghatározása szükséges (3.5.1. pont).

A Hottel-Whillier PV/T-re módosított modell nem igazán alkalmazható a hőcsöves (heat pipe) rendszerű PV/T kollektorokra, mivel felépítésben eleve más megközelítésűek. A (2.14) összefüggés még itt is helyálló, viszont az  $F$  és  $F'$  – (2.18) és (2.17) – tényezők számítása másként történik, figyelembe véve a heat pipe egyedi tulajdonságait, kiváltképp ha az a továbbiakban ismertetett MHP-jellegű (micro heat pipe – mikro hőcsöves, 24. ábra).

Alapvetően tömör hővezető (solid heat pipe) és termoszifon alapú heat pipe rendszerek ismertek és ezek mindegyike meg is található különböző PV/T rendszerekben.

A solid heat pipe olyan hővezető anyagot takar, amelynek a hővezetése nagyon nagy. Ezek többnyire fémek az alumíniumtól kezdve a rézen át az ezüstig (és még egyéb fémek és anyagok), illetve ezek ötvöze. Hátrányuk, hogy relatíve drágák, talán az alumíniumot kivéve.

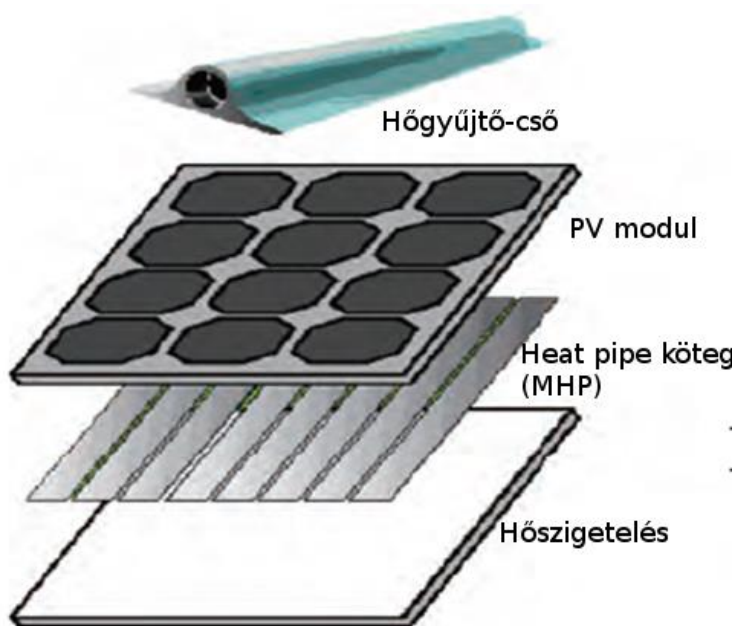
A termoszifon-effektus alapján működő hőcsöves rendszerek rendelkeznek egy gőzfejlesztő és egy kondenzációs résszel (24. ábra).



24. ábra. Termoszifon heat pipe sematikus ábrája (Quan et al., 2010)

Egy speciális megoldással is találkozhatunk, amely egy 2008-as, Kínában bejegyzett szabadalmon alapul (Zhao et al., 2008), ami egy úgynevezett micro heat pipe (MHP) köteg (MHP-Array). A leírások alapján alumínium anyagról van szó, amelynek a belsejében mikrosövek ( $D < 2$  mm) helyezkednek el és ezekben a termoszifon működésnek megfelelő anyag található.

Az MHP-val kiegészített fotovillamos modul előnye vizsgálati szempontból az, hogy a modul felépítése teljesen változatlan a normális PV-modulokhoz képest, csak a hátsó merevítő rétegre (ami rendszerint tedlar) van felragasztva az MHP anyag (25. ábra). Így akár két rendszernek a hatásfokát külön-külön is összehasonlíthatjuk.



25. ábra. A micro heat pipe (MHP) rendszerű napelem felépítése

A disszertációmban egy ilyen modulokat tartalmazó rendszert is vizsgállok, mert így a kidolgozott cellahőmérséklet számítási módszer kiegészíthető a hűtési folyamattal.

### **2.10. A szakirodalmi feldolgozás áttekintő értékelése**

A szakirodalmi feldolgozás során bemutattam a fotovillamos modulok működését és típusait, azokat a típusokat részletezve, amelyeket a dolgozatomban érintek. Rávilágítottam, hogy a veszteségek jelentős része a napelem modulok melegeződéséből következik, de az elhelyezés módja és helyszíne jelentősen befolyásolhatja ennek mértékét. Az is nyilvánvaló, hogy az elhelyezés módja és helyszíne minden rendszernél egyedi, de az alapvető módokat szétválasztva vizsgálható a melegedés problematikája, illetve az elhelyezési módok alapján a mértékére is lehetne következtetni, de azt a szakirodalomban fellelhető PV modellek nem vizsgálják.

A konvektív légáramlások (természetes vagy mesterséges) befolyásolják a hőátadási tényező mértékét, amely a termodinamikai egyensúly kialakulásában jelentős szerepet játszik, illetve részletekbe menően csak ennek birtokában lehet számításokat végezni a működés közbeni cellahőmérsékletre vonatkozóan. A szakirodalmi feldolgozás alapján elmondható hogy számos modell, illetve ezekre épülő szoftver alkalmazható a napelemek aktuális hatásfokának becsléséhez, viszont egyetlen olyannal sem találkozunk, amely figyelembe venné a szélsébség és a természetes konvekció hatására változó hőátadási tényezőt. Nyilvánvalóan fontos a pontos aktuális hatásfok ismerete, hiszen így pontosabban lehet számolni a termelést és ez főleg PV rendszerek méretezésénél, illetve megtérülésük számításánál fontos. Az is kiderül, hogy a vizsgálati szabványok a hatásfokot egy adott hőmérsékleten adják meg, de a gyakorlatban ettől jóval eltérő értékek is előfordulnak. Ezek főleg negatív irányban módosítják a hatásfokot, mivel a működési időszakban akár a vizsgálati hőmérsékletnél 50-60 °C-kal is magasabb hőmérséklete lehet a szilícium celláknak.

A melegedés csökkentésére lehetőséget adnak bizonyos aktív és passzív hűtési technológiák, amelyek lehetőséget biztosítanak arra is, hogy a „hulladékhőt” hasznosítsuk. A PV/T rendszerek közül kiemelttem egy újfajta technológiát – az MHP hőgyűjtővel rendelkező PV kollektorokat – amelyek számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, viszont a hagyományos módszerekkel nem számítható a termikus hatásfokuk, illetve újszerűségük révén keveset is tudunk róluk.

A szakirodalmi feldolgozás során kiderült, hogy a napelem modulok hőátadási tényezőjére és a szél általi hűtésre vonatkozóan nincsenek megbízható adatok, így ezt vizsgálni kell. Bár vannak szerzők (például Guivarch, Peuportier, 2006, ill. Zondag et al., 2002) akik hőáramhálózatos modellt alkalmaztak fotovillamos modulok hőtranszport folyamatainak vizsgálatára, de ezek nem követik a szerkezeti kialakítást, így általánosan nem használhatóak. Fotovillamos-termikus modulok esetében ilyenfajta megközelítés nem történt, de még a PV modulokra felírt hőáramhálózatos modellt sem használták hatásfok meghatározásra, illetve fotovillamos rendszerek komplex modellezésére. Ezen hiányok miatt fogalmazódtak meg a dolgozat célkitűzései, hogy a fotovillamos modulok termikus viszonyai és a hatásfok változása jobban tervezhető legyen.



### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben azokat a módszereket ismertetem, amelyek dolgozat céljainak eléréséhez szükségesek. Így bemutatom a napelemek melegedését befolyásoló paramétereket, azon környezeti jellemzőket, amelyek a modulok termikus modelljének adhatók át peremfeltételként. Kifejtem azokat a gyakorlati módszereket, amelyek a hőátadási tényező meghatározását teszik lehetővé és ennek a szélsatornás validálási módját. Bemutatom, hogyan alkalmazható a hőáramhálózatos modellezés fotovillamos és fotovillamos-termikus modulok esetén és ahol szükség van rá, az anyagvizsálati módszereket.

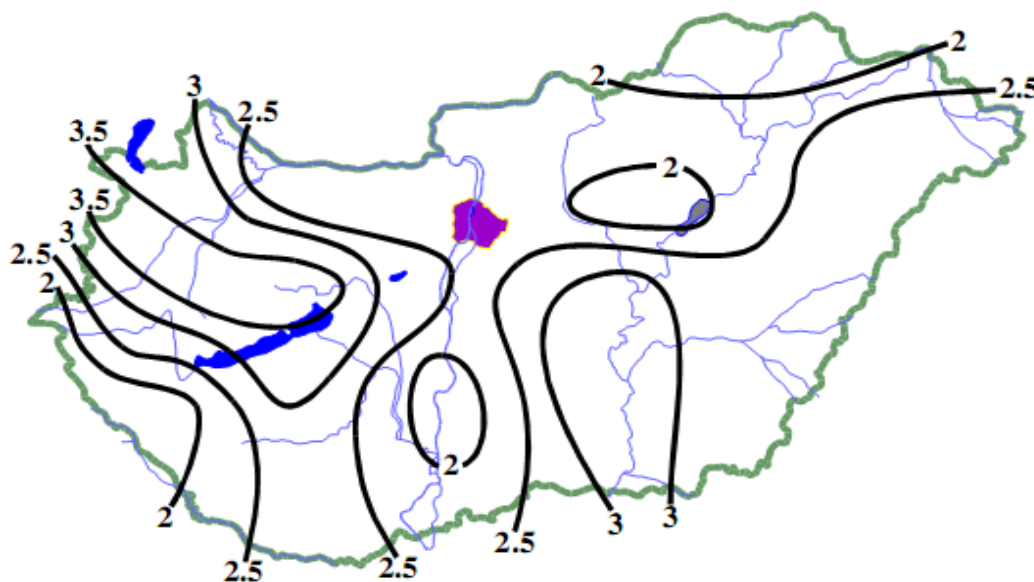
#### 3.1. Környezeti jellemzők vizsgálata

A melegedés csökkenthető a modulok megfelelő körültekintéssel való telepítésével, figyelembe véve a meteorológiai viszonyokat, főképp az uralkodó szélirányt és ezáltal a modulok levegő általi körüláramlását.

Ahhoz hogy ezzel számolni tudjunk, meg kell vizsgálni a regionális meteorológiai viszonyokat. A Meteorológiai Szolgálat pogányi mérőállomása méri a szélsébséget, a szélirányt és a globális sugárzást (diffúz-, és direkt sugárzás). Ezek az adatok bizonyos határok között hozzáférhetők kutatások számára. A Magyar Meteorológiai Szolgálat pogányi mérőállomása által biztosított adatsorokat elemeztem a régióra vonatkozóan, amelyek több éves átlagából (2005-2012) a paraméter identifikáció során meghatároztuk környezeti jellemzőket leíró függvények (Farkas, 1999) Pécsre vonatkozó paramétereit a szélsébség, a környezeti hőmérséklet és a napsugárzás esetében.

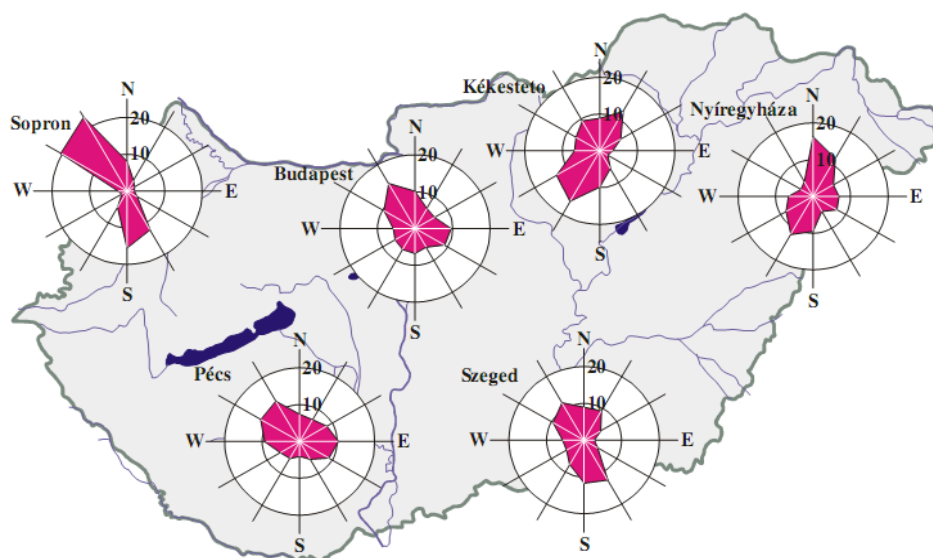
##### 3.1.1. Szélsébség

A szélsébség vizsgálata (mérése és modellezése) a kutatásom szempontjából kulcsfontosságú, mert a fotovillamos modulok körül áramló levegő hűti a modulokat, ezzel javítva a rendszer hatásfokát. A szél, vagy a konvektív áramlások befolyásolják a hőátadási tényező értékét, tehát a modulok hőveszteségeit, így ezek pontos értékének ismertnek kell lennie, hogy a később ismertetett hőáramhálózatos modellben felhasználhassuk. A szakirodalomból az egyes területekre vonatkozó éves átlagértékek a szélsébségre és a szélirányra vonatkozóan ismertek (26. ábra, 27. ábra), de ezek nem elegendők az általunk felvázolt mérnöki alkalmazáshoz (Radics, Báthory, 2006).



26. ábra Szélsébségek átlagos értéke országosan m/s-ban ( $v_{szél}$ , m/s)





27. ábra A szélirányok relatív gyakorisága (%)

Alapvetően ismert tény, ha nincs valamilyen globális-, vagy makroméretűnek mondható meteorológiai jelenség (pl. ciklon), a szélesség a napsugárzás intenzitásának megfelelően is változik. Tapasztalati tény, hogy napközben többször van szeles idő mint éjszaka, és nyáron a napközbeni szélesség értékek általában magasabbak mint télen.

A Meteorológiai Szolgálat által rendelkezésünkre bocsájtott adatok alapján Farkas (1999) matematikai modelljének paraméter identifikációját végeztem el Pécsre vonatkozóan. Az éves lefutásra vonatkozó összetett szélesség modell a következő:

$$w(\tau_h) = e^{a(N_{day})(\tau_h - b(N_{day}))^2 + c(N_{day})}, \quad (3.1)$$

ahol az egyes paraméterek közelítése:

$$a(N_{day}) = d_a \cos(e_a N_{day} - f_a) + g_a, \quad (3.1a)$$

$$b(N_{day}) = d_b \cos(e_b N_{day} - f_b) + g_b, \quad (3.1b)$$

$$c(N_{day}) = d_c \cos(e_c N_{day} - f_c) + g_c, \quad (3.1c)$$

ahol  $\tau_h$  a napból eltelt órák száma,  $N_{day}$  az évből eltelt napok száma  $d_i$ ,  $e_i$ ,  $f_i$  és  $g_i$  az identifikált állandók:

$$\begin{aligned} d_a &= 166,4, \quad d_b = 0,3593, \quad d_c = -0,463, \\ e_a &= 0,0001989, \quad e_b = 0,2387, \quad e_c = 0,01881, \\ f_a &= 0,03667, \quad f_b = 4,368, \quad f_c = 4,348, \\ g_a &= -166,4, \quad g_b = 13,15, \quad g_c = 2,635. \end{aligned}$$

Az identifikált paraméterek a következő fejezetben ismertetett módon lettek meghatározva.

### 3.1.2. Környezeti hőmérséklet

A környezeti hőmérséklet értékek a szakirodalomban szintén megtalálhatók a havi átlagokra vonatkoztatva (5. táblázat). Kutatásom szempontjából a legfontosabb értékek a napközbeni órákra lebontott adatok (amikor a fotovillamos rendszerek energiát termelnek), amelyek csak további vizsgálatokkal, illetve a régióra jellemző adatok feldolgozásával alkalmasak számunkra. A környezeti hőmérséklet hatása szinte minden esetben hűtési behatásként értelmezhető a

napelemek esetében, mivel a kristályos szilícium fotovillamos modulok konverziós hatásfoka 20% alatti, így a napsugárzás e fölötti tartományban hővé alakul a modul abszorber felületén. Tehát napközben, ha  $I > 0$  (besugárzási energia), akkor modulok hőmérséklete biztosan magasabb a környezeténél, így a  $\Delta T$  ( $T_{cella} - T_{környezet}$ ) szinte mindig pozitív értékű.

5. táblázat: A léghőmérséklet havi középértékei (°C) Nyugat-Magyarországon (Radics, Báthory, 2006)

	Magyaróvár	Sopron	Zirc	Keszthely	Pécs	Budapest
Január	-1,6	-1,3	-2,8	-1,0	-0,7	-1,1
Február	-0,1	0,2	-1,0	0,7	1,3	1
Március	4,9	4,8	3,7	6	6,1	5,8
Április	9,9	9,6	8,8	10,9	11,9	11,8
Május	15	14,5	13,8	15,9	16,9	16,8
Június	17,9	17,6	17,2	19	20,4	20,2
Július	20	19,7	19,3	21,1	22,6	22,2
Augusztus	19,1	18,9	18,1	20,3	21,9	21,4
Szeptember	15,4	15,3	14,4	16,5	17,9	17,4
Október	9,9	9,7	9,2	10,9	11,8	11,3
December	4,4	4,2	3,7	5,3	6,2	5,8
Év	9,6	9,5	8,6	10,5	11,5	11,2

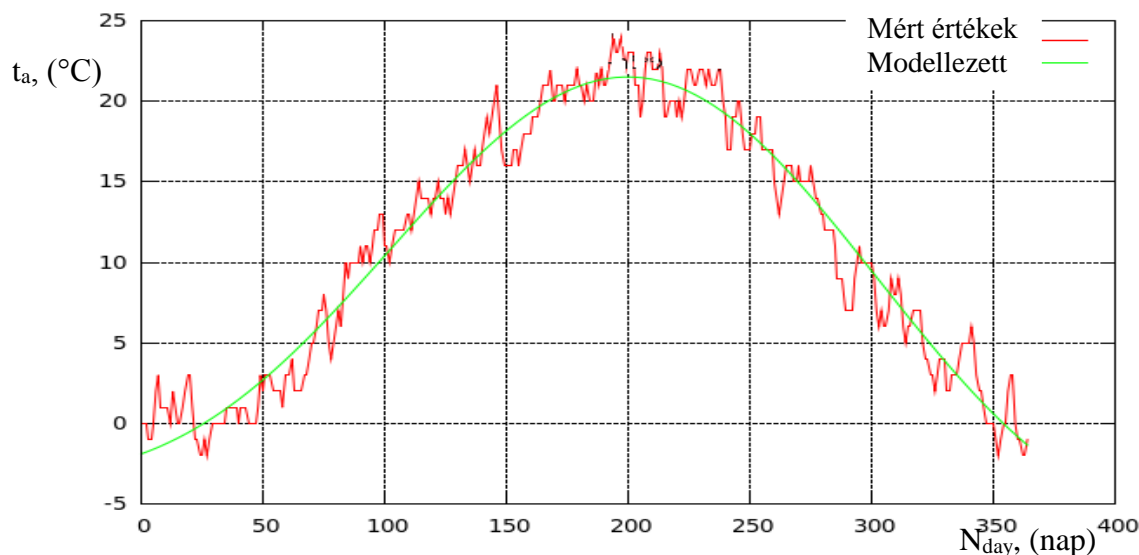
A környezeti hőmérséklet éves lefutása az alábbi modellel közelíthető (Farkas, Rendik, 2003):

$$t_w(\tau) = t_m \cos[\alpha(\tau - \tau_0)] + t_a \quad (3.2)$$

A *gnuplot* programot alkalmaztam a (3.1), (3.2) egyenletek paramétereinek meghatározására, a diszkrét adatokra való illesztés során. A program a Marquart-Levenberg algoritmus segítségével határozza meg az adatok minimumhelyeit, tehát az illesztési pontokat (jelen esetben:  $c_1 - c_5$ ), (Koniorczyk, Ádám, 2003).

A számítógépes közelítő minimum-keresési eljárások (min a Marquart- lényegében a következő módon működnek. Először ad egy becslést a keresett paraméterek értékére: ez az illesztési paraméterek kezdőértéke. Ezután az algoritmus a kezdőértékektől abba az irányba lépteti a paramétereket, amerre a minimalizálni kívánt mennyiség leginkább csökken és kiszámítja, hogy az így eszközölt kis módosítás hatására mennyivel csökken a minimalizálni kívánt mennyiség értéke. Ha ez a csökkenés egy adott kicsiny küszöbérték alá süllyed, vagyis az eljárás konvergál, az algoritmus befejeződik és az így kapott paraméterértékeket adja vissza megoldásként.

Először a napi órák átlagokra határoztam meg a hőmérséklet függvényt, majd ez lett összevonva az éves lefutás függvényével (28. ábra), ami a napi átlagokat követi.



28. ábra. A napi átlagok éves lefutására illesztett görbe

Kezdőértékként a Farkas által meghatározott adatokat adtuk meg (Farkas, Rendik, 2003).

A paraméter identifikáció leírása a *gnuplot* programban a következő:

```
gnuplot> fit ((c1*x**2+c2*x+c3)*exp(-((x-c4)/182.5)**2)) "globalsugarzas-maxok.csv"
After 12 iterations the fit converged.
Final sum of squares of residuals : 1.75182e+06
rel. change during last iteration : -9.17166e-09

degrees of freedom (FIT_NDF) : 361
rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 69.6613
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 4852.7

Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
-----
c1          = -0.0114765        +/- 0.000665   (5.795%)
c2          = 3.80973           +/- 0.4793    (12.58%)
c3          = 441.654           +/- 71.07     (16.09%)
c4          = 180.798           +/- 9.66      (5.343%)

correlation matrix of the fit parameters:

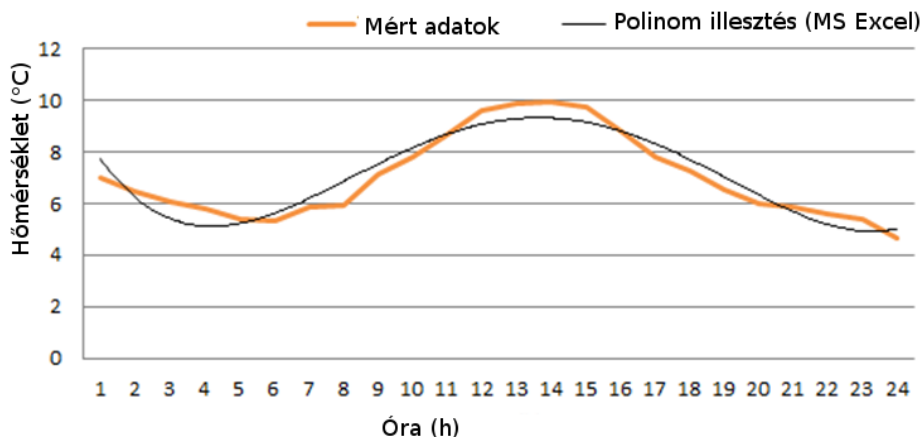
c1          c1      c2      c3      c4
c1          1.000
c2          -0.741  1.000
c3          0.543 -0.965  1.000
c4          0.336 -0.871  0.958  1.000
```

29. ábra. A *gnuplot* program kimenete az illesztési folyamat során

A *gnuplot* illeszti a görbét visszaadva a módosított paramétereket (29. ábra), továbbá egyéb hasznos információkat is ad a folyamat eredményéről mint például a standard hiba (“Standard Error”, azaz a megadott paraméterek aszimptotikus eltérése a görbétől és hogy az egyes paraméterek hogyan befolyásolják a hibát) és a szabadságfok, amely leírja az illesztés jóságát (ahol az adatpárok mutatják a különbséget a keresett értékek között). Az eredmény tartalmazza a korrelációs táblázatot is.

A korrelációs mátrix főátlója egyes (1.000) értékeket tartalmaz, a többi érték a nullához közelít. A nem diagonál értékek minél közelebb vannak nullához, az illesztés annál pontosabbnak mondható. A környezeti paraméterekre való illesztés esetében az illesztési paraméterek, kevésbé korreálnak, hiszen az adatokat a csillagászati hatások mellett a makro és mikro időjárási körülmények is befolyásolják. Az illesztés pontossága a (Farkas, Rendik, 2003)-hoz hasonlóan megfelelő az alkalmazás szempontjából, illetve a meteorológiai adatokra való illesztés azok jellege miatt nem lehet teljesen pontos, emiatt a korreláció értékek csak harmadrendben közelítenek észrevehetően a nullához.

A következő lépésben meghatároztam a napi átlagokra illesztett függvény paramétereit.



30. ábra. Az illesztett függvény a környezeti hőmérséklet napi átlagára (az év 321. napja)

A 30. ábra egy lehetséges megoldást mutat ami Excel-ben készült, de számunkra az adott függvény paramétereinek identifikációja a feladat (Farkas, Rendik, 2003):

$$t_a = [a_4 N_{day}^2 + a_5 N_{day} + a_6] \exp \left[ - \left[ \frac{N_{day} - a_7}{182.5} \right]^2 \right], \quad (3.3)$$

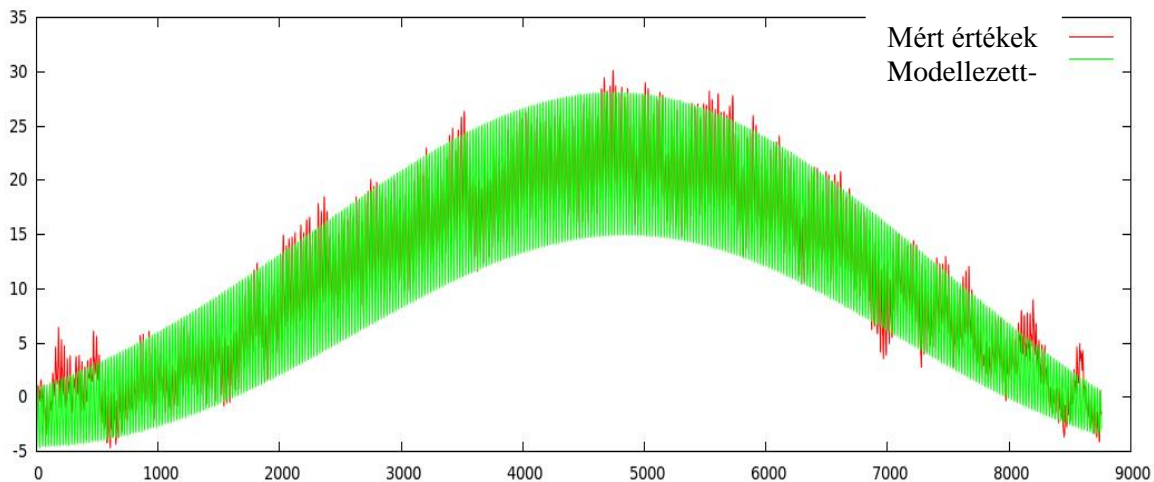
ahol  $\alpha = 2\pi/24$ ,  $\tau_0 = a_8$ . Az  $a_i$  ( $i = 1..8$ ) a (3.3) és (3.4) összefüggésben az identifikált paraméterek a régióra vonatkozóan. A bemenő paraméter itt is az  $N_{day}$ , mint az év adott napja, azaz az eddigiekhez jól illeszthető. A  $t_m$  (a koszinusz függvény amplitúdója), (Farkas, Rendik, 2003):

$$t_m = [a_1 N_{day}^2 + a_2 N_{day} + a_3] \quad (3.4)$$

Ahogy az eljárást az előzőekben ismertettem, a gnuplot által meghatározott értékek a következők:

$a_1 = -0,0001298$ ,  $a_2 = 0,04555$ ,  $a_3 = 2,689$ ,  $a_4 = -0,000804383$ ,  $a_5 = 0,305511$ ,  $a_6 = -7,31937$ ,  $a_7 = 212,189$ ,  $a_8 = 14,0$ .

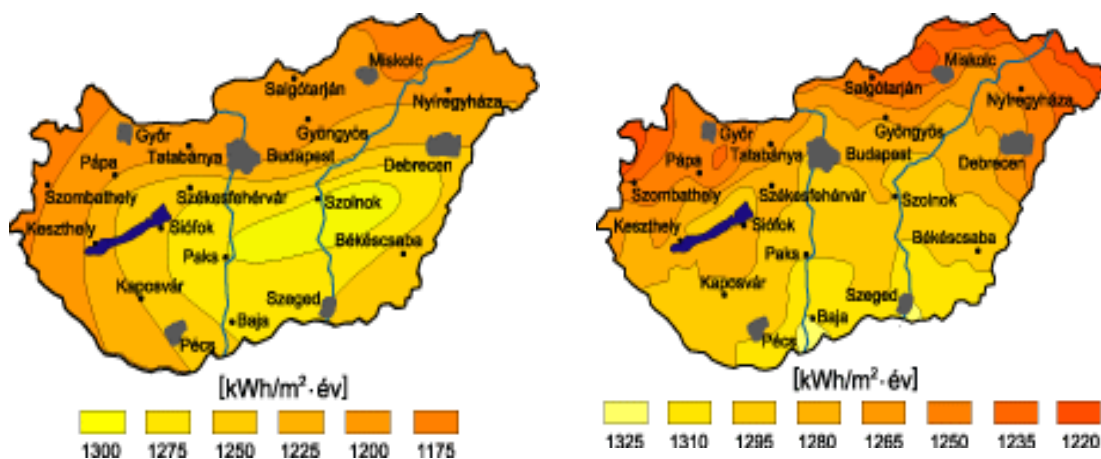
Ezen paraméterek behelyettesítve a (3.2) egyenletbe a következő függvényt adják, amely a teljes éves adatsort lefedi (31. ábra).



31. ábra. Az illesztett függvény órás lefutásban az éves átlagokra

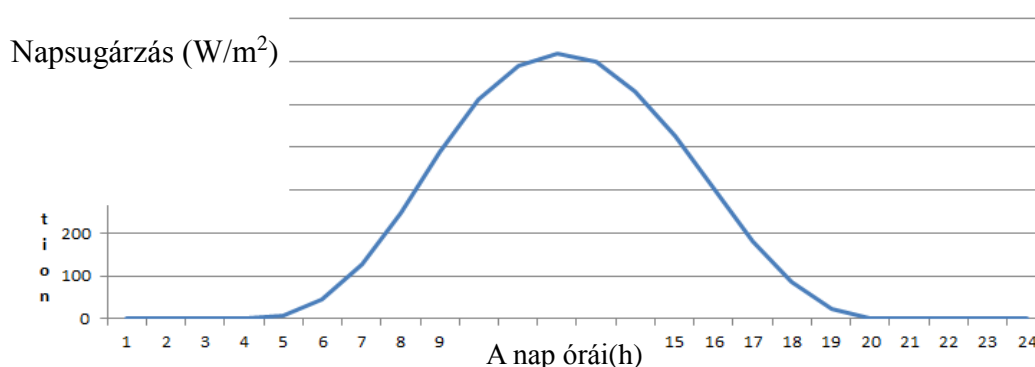
### 3.1.3. Napsugárzás

Alapvetően napsugárzásnak a direkt beeső fénysugarakat nevezzük, de a fotovillamos alkalmazás esetén a diffúz komponenssel is számolni kell. A napsugárzás értékeket az irodalomban minden esetben egy vízszintes felületre beérkező teljesítmény-adattal jellemezzük, melynek mérőszáma a  $W/m^2$ . A vízszintes felületre megadott értékeket a dőlésszög ismeretében egy tetszőlegesen döntött felületre transzformálhatjuk trigonometrikus függvénnyel.



32. ábra A napsugárzás (globál- és direkt-) éves átlaga

Napsugárzás intenzitása adott helyen mérhető és modellezhető egyaránt, mint ahogy az a 32. ábrán is látható (Naplopó Kft., 2015). A legtöbb esetben a teljes napsugárzást (direkt és diffúz) pyranométerrel mérhetjük, mely adatokat az épületenergetikától kezdve a meteorológiai modellekig felhasználják. A modellezés esetében több lehetőség adódik: a légkörön kívüli sugárzástól kiindulva ( $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ ) a légréteg diffúz hatásának és a fény légkörön belül megtett útjának számításával (AM – Air Mass), a derült égre vonatkozó (tehát ideális) napsugárzást viszonyokat rendkívül jól közelíthetjük, Ez így még nem alkalmas az említett alkalmazások kiszolgálására, de léteznek modellek melyek ez alapján és a helyszínre vonatkozó napos órákból kiindulva jó közelítést adnak a napi sugárzásti adatokra vonatkozóan (Farkas, 1999). A másik lehetőség, hogy megvizsgáljuk az adott hely mérési adatait (ha létezik ilyen) és a több éves napsugárzásti adatokra illesztünk egy matematikai függvényt, amely az előbb vázolt módszernél sokkal pontosabb eredményt ad (33. ábra).



33. ábra. Egy napi sugárzásti eloszlás (Pécs, 2014. április 22.)

A számítások során felhasznált, Pécsre vonatkozó adatokat a Magyar Meteorológiai Szolgálat Pécs-Pogány Reptéren található meteorológiai állomása szolgáltatta. A kapott hét éves adatok (2005-2011) átlagát véve (Farkas, Rendik, 2003) alapul, a napsugárzást intenzitása az alábbi matematikai modellel írható le:

$$I(\tau) = \begin{cases} I_m \cos\left[\frac{2\pi}{24}\tau\right] + \exp\left[-\frac{\tau - \tau_0}{\tau_h}\right]^2, & \text{if } |\tau| \leq \tau_h \\ 0, & \text{if } |\tau - \tau_0| \geq \tau_h \end{cases} \quad (3.5)$$

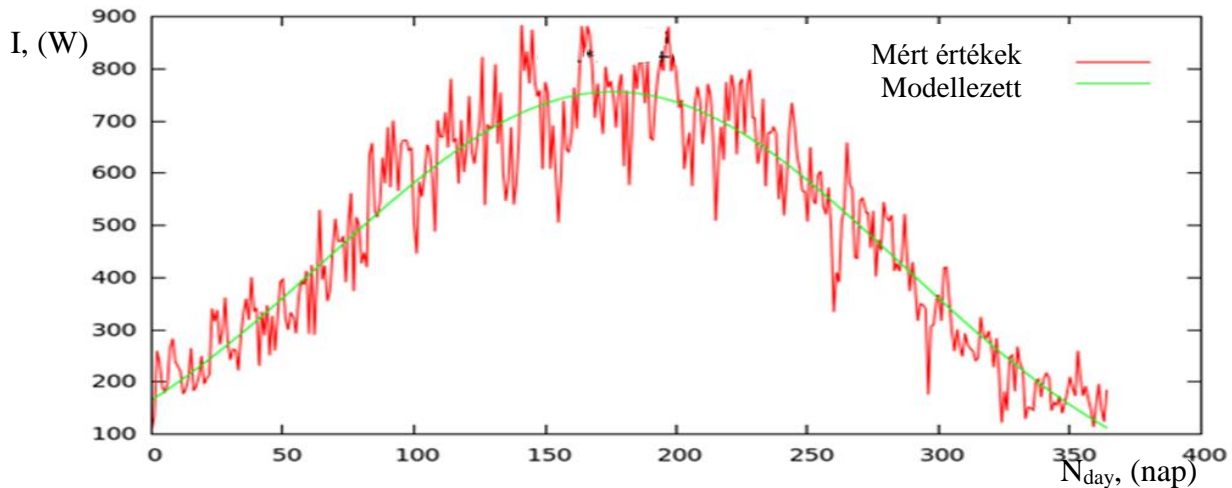
A függvény a napi maximumok ( $I_m$ ) leírására a (3.6) egyenlettel, míg a  $\tau_h$  együttható az intervallum felezésre a (3.7) összefüggéssel adható meg.

$$I_m = [c_1 N_{day}^2 + c_2 N_{day} + c_3] \exp \left[ - \left[ \frac{N_{day} - c_4}{182,5} \right]^2 \right], \quad (3.6)$$

$$\tau_h = [c_5 N_{day}^2 + c_6 N_{day} + c_7]. \quad (3.7)$$

Kezdőértékként a már adott, Budapestre érvényes értékek lettek megadva, amelyek már korábban (Farkas, 1999) által meghatározásra kerültek (34. ábra).

Az első négy paraméter a napi maximumok leírásában használandó ( $I_m$ ), a maradék három a napi maximumok meghatározásához szükséges.

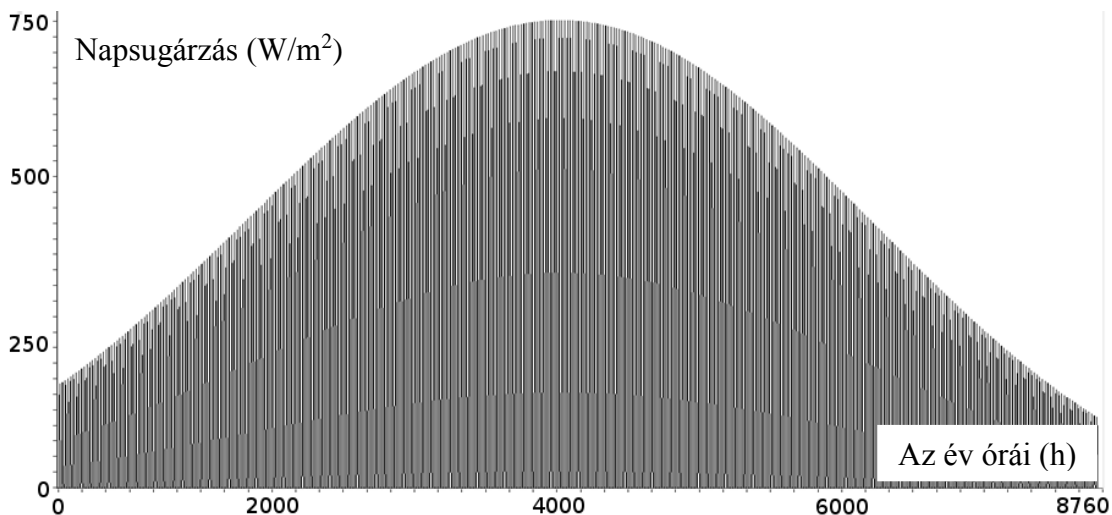


34. ábra. Függvény illesztése a mért napsugárzás napi átlagadatokra

Ezek alapján a Pécsre meghatározott paraméterek a közelítő eljárással az alábbi módon adódnak:

$$c_1 = -0,0114765; c_2 = 3,80973; c_3 = 441,654; c_4 = 180,798; c_5 = -0,00013; c_6 = 0,004587; c_7 = 3,657.$$

Ezzel a teljes (globál – diffúz+direkt sugárzás) napsugárzás Pécsre vonatkozóan számítható és a következő ábrán látható függvény adódik (35. ábra). Az ábrából egy napot kiemelve a 33. ábrával megegyező görbét láthatunk.

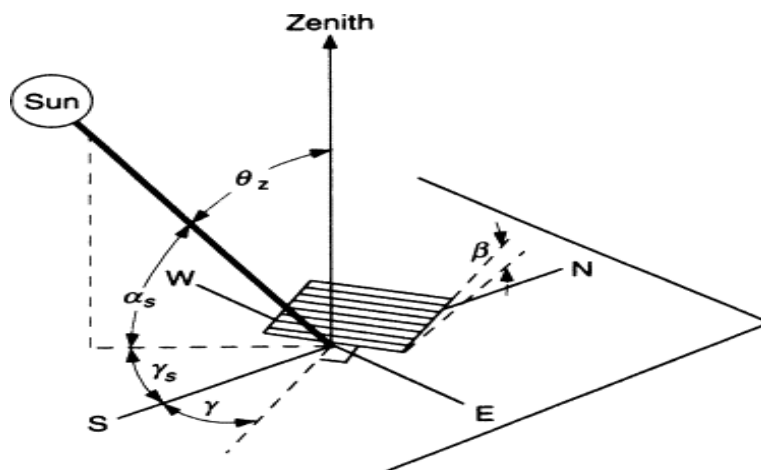


35. ábra. A sugárzás számított intenzitásának éves diagramja ( $W/m^2$ )

Ez a függvény alkalmas lehet a talajjal párhuzamos napelemes rendszerek számítására, de ilyen eset csak ritkán adódik – általában csak valamilyen speciális építési megoldásnak köszönhetően –, hiszen nem ideális, hogy a levegő nem tudja a modulokat körüláramolni, azaz hűteni. Ha a napelemek egy vagy két tengely mentén el vannak forgatva, azaz a horizontális síkhoz és a déli tájoláshoz képest kitérésük van (36. ábra), akkor a kimeneti adatok transzformálása szükséges a döntött/tájolt síkra, külön a diffúz és a direkt napsugárzási komponensekre vonatkozóan. Így előbb ezeket összetevőket kell meghatározni.

#### 3.1.4. A diffúz és direkt sugárzási komponensek szétválasztása

A napsugárzás csak azon részét lehet transzformálni, aminek meghatározott irányvektora van. Ezek a közvetlenül a naptól érkező fénysugarak (ezt nevezzük direkt sugárzási komponensnek), amelynek viszont egy része még az atmoszféra bizonyos elemein (por-részecskék, aeroszok, vízpára, stb.) szétszóródik. Az atmoszférában szóródó és abszorbeálódó, úgynevezett diffúz sugárzás az idővel változó nagyságú, az atmoszféra és a nap járásával változó légtömeg (AM) miatt. Ezek meghatározásához először a derült égboltra (“clear sky”) vonatkozó órás, a talajjal párhuzamos felületre érkező értéket kell meghatározni, majd ezt kivonni a modellezett teljes/globális sugárzási értékekből. Szintén több módszer alkalmazható a tiszta égbolt ( $I_c$ ) sugárzási értékeinek meghatározására, a legismertebb a (Hottel et al., 1976) és az ASHRAE (Farber, Morrison, 1977) által kidolgozott módszer.



36. ábra. A fotovillamos modulok tájolásának meghatározásában fontos szögek

Az ASHRAE módszer megadja az adott szélességi fokra (jelen esetben  $46^\circ$ ) vonatkozó adatokat táblázatos formában, azaz a nap órás mozgásából adódó beesési szögre ( $\theta_z$ ) vonatkozóan a “derült égbolt” ( $I_c$ ) értékeket:

#### 6. táblázat: Az ASHRAE derült égbolt (clear sky) együttható

Óra	$\theta_z$ , fok	$I_c$ , $W/m^2$
11-12, 12-13	32,3	861
10-11, 13-14	37,1	805
9-10, 14-15	45,3	694
8-9, 15-16	55,2	542
7-8, 16-17	65,8	361
6-7, 17-18	76,8	167
5-6, 18-19	87,6	14



Az ASHRAE “derült égbolt” értékek az 6. táblázatból kiolvashatók, vagy megadhatók egy illesztett lineáris függvénnyel:

$$I_c = -15,679\theta_z + 1388,2, I_c > 0. \quad (3.8)$$

A pontos értékek meghatározásához a beesési szög ismerete szükséges, amely az alábbi szögtranszformációval számítható horizontális felületre vonatkozóan ( $\beta=0^\circ$ ). (3.9)

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi, \quad (3.9)$$

ahol  $\omega$  a nap szögelfordulása a föld forgásából adódóan ( $\omega$  értéke az időzónák szabálytalan határai miatt nem pontos, hozzávetőlegesen  $\pm 4^\circ$  eltéréssel), ami óránként  $15^\circ$ -kal változik, azaz  $\omega = 15h-180$  (ahol  $h$  az idő, 0-24 óra),  $\varphi$  a szélességi fok értéke ( $\varphi = 46^\circ$ ), és  $\delta$  a deklinációs szög:

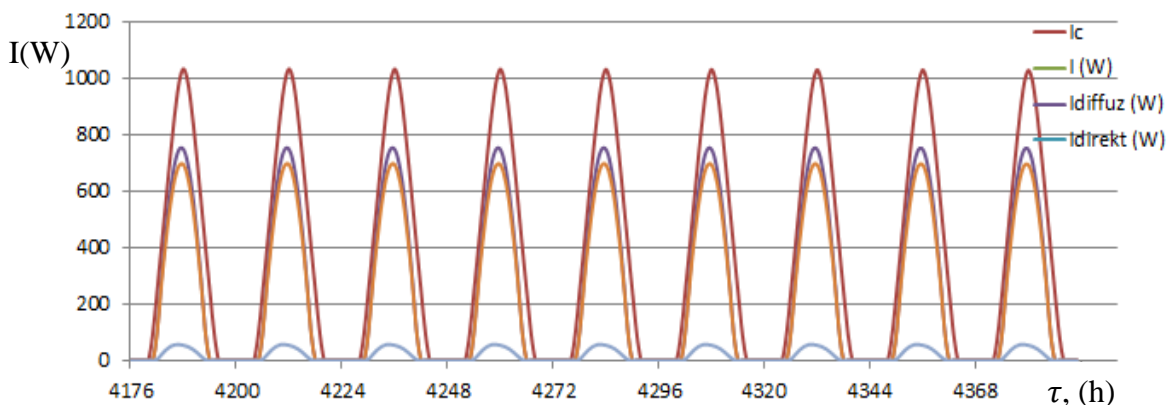
$$\delta = 23,45^\circ \sin \left( 360 \frac{284+n}{365} \right), \quad (3.10)$$

itt  $n$  változó az év napja: 1-365 intervallumban.

A diffúz sugárzás vízszintes felületen megadható az  $I/I_c$  és  $I_d/I$  korrelációs függvényeként, ahogy azt (Duffie, Beckman, 1998) az alábbi formában leírta (3.11):

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,00 - 0,1 \frac{I}{I_c} & \text{for } 0 \leq \frac{I}{I_c} < 0,48 \\ 1,11 + 0,0396 \left( \frac{I}{I_c} \right) - 0,789 \left( \frac{I}{I_c} \right)^2 & \text{for } 0,48 \leq \frac{I}{I_c} < 1,10. \\ 0,2 & \text{for } 1,1 \leq \frac{I}{I_c} \end{cases} \quad (3.11)$$

Így ismerjük  $I_d/I$  hányados értékét, és ezt szorozva az  $I$ -vel – ami a (3.5) egyenletből adódik – megkapjuk a diffúz sugárzás értékét (37. ábra).



37. ábra. A teljes-, a diffúz sugárzás és “derült égbolt” együttható ( $I_c$ ) diagramja

### 3.1.5. Napsugárzási értékek döntött felületre

Alapvetően tehát a fotovillamos modulok a vízszintessel bezárt szögben kerülnek elhelyezésre, azaz definiálható egy  $\beta$  szög. Sokszor a Déli égtájhoz képest is kitéréssel rendelkeznek, az épületek helyzetéből adódóan ez a  $\gamma$  szög, amelyet a 36. ábrán szintén láthatunk. Ha a derékszögtől vett elforgatás relatíve kicsi ( $-60^\circ$ -tól  $+60^\circ$ -ig), akkor a diffúz komponens kezelhető úgy, mintha az egyenletesen érkezne be a felületre az égboltról. Ha így van (ritka esetekben fordul csak elő nagyobb kitérés, mivel mindig Déli tájra törekszünk), akkor az elforgatott felületre (azaz a napelem felületére) érkező sugárzás ( $I_T$ ) az alábbi egyenlettel számítható:

$$I_T = I_b R_b + I_d, \quad (3.12)$$



ahol  $R_b$  a direkt sugárzás aránya és a (3.13) egyenlettel számítható.

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}, \quad (3.13)$$

ahol  $\theta$  a beesési szög az elforgatott felületre és  $\theta_z$  a zenith szöge. A zenit szög számítását megadtuk korábban (3.10), míg a direkt sugárzás beesési szöge a (3.14) egyenlettel számítható (Duffie, Beckman, 1998):

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega. \quad (3.14)$$

A meteorológiai függvények bemenete minden esetben *egységesen az év napjának száma*, de megadhatunk intervallumot is, ekkor akár a teljes éves lefutás lekérdezhető. Mivel minden függvény bemenete ugyanaz, ezért a lekérdezés egységes és így felhasználható a hőáramhálózatos modell alapján elkészült Simulink és LabView programok bemeneteként.

### 3.2. A hőátadási tényezők meghatározása

A fotovillamos modulok hőmérsékletét alapvetően tehát a környezeti jellemzők befolyásolják. A napelemnek mint termikus rendszernek vannak hőnyereségei és -vesztései. Ahhoz hogy a távozó hőmennyiséget meghatározhassuk, ismernünk kell a felületi hőátadási tényező ( $\alpha$ ) nagyságát. Egy  $L$  jellemző hosszúságú felület, amely  $T_f$  felületi hőmérsékletű, és annak mentén  $v$  sebességgel áramló  $T_w$  hőmérsékletű közeg között kialakuló hőáram számos paraméter függvénye. Ennek kiszámításához a Fourier–Kirchoff, Navier–Stokes és a Reynolds-féle egyenletekből álló egyenletrendszer megoldása szükséges, vagy a Nusselt-szám számítása illetve mérése révén a (3.15) egyenletből az  $\alpha$  kifejezésével juthatunk hozzá (Brinkworth, 2000):

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}. \quad (3.15)$$

Utóbbi esetben viszont a Nusselt-szám meghatározása szükséges, amely akkor lehetséges, ha ismert a kérdéses áramlási tér, mivel  $Nu = f(Gr, Pr, Re)$ , azaz a Prandtl a Reynolds és a Grashof kritériumok függvénye.

Számos munkában vizsgálták már a fotovillamos modulok esetén a Nusselt-szám meghatározásának problematikáját. Az egyik legrészletesebb modell, amely egy  $1,8 \times 0,9$  m méretű fűtött lap mérésén alapul, Sharples, Charlesworth (1997) munkája:

$$Nu_L = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{0.33}. \quad (3.16)$$

A (3.16) összefüggésben a levegő fizikai paramétereit figyelembe véve, a 325 K felületi hőmérsékletű modul hőátadási tényezője ( $\alpha$ ), ami 300 K környezeti hőmérséklet esetén az alábbi összefüggéssel számítható, ahol  $v$  a levegő áramlási sebessége:

$$\alpha = 4.01v^{0.5}. \quad (3.17)$$

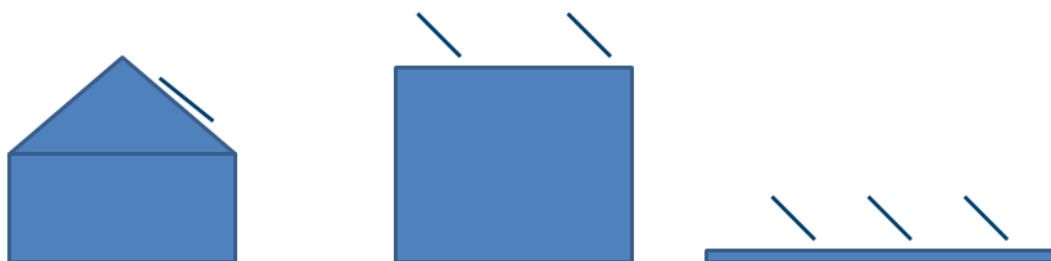
#### 3.2.1. A hőátadási tényezők meghatározása szimulációval

Az áramlási tér számítása és így a  $Nu$ -szám meghatározása lehetséges numerikus módszerekkel is. Ehhez első lépésben az áramlási teret diszkretizálni kell (Gan, 2009). Erre a célra egy  $x = 50$  m és  $y = 30$  m nagyságú téglalap alakú 2 dimenziós mikrokörnyezetet hoztam létre, amelyben  $x = 15$  m-nél kezdődően egy 3 m homlokzat-magasságú, 10 m szélességű,  $45^\circ$ -os tetődőlésű nyeregtetős ház szelvénye kapott helyet, amelyen egy 1,25 m hosszú, 20 mm profilmélységű modul helyezkedik el a tetővel párhuzamosan, 0,1 m távolságra attól. A másik környezet egy lapostetős ház, amelyen egy esetben a déli oldalon, más esetben az északi oldalon helyeztük el ugyanezt a modult, amelyek tipikusnak tekinthető elhelyezések (38. ábra).

Ezen és további két ugyanezen paraméterekkel rendelkező áramlási téren elvégzett CFD

szimulációkkal lett kiszámolva a napelemek hőátadási együtthatója, de ezen 2 dimenziós modellek ki lettek egészítve 3D számításokkal amelyekben az oldalszelet és a homlokzatra szerelt elhelyezést vizsgálom (3.2.4. pont).

A numerikus számítás szempontjából fontos a numerikus háló minősége, ezért a napelem és a tető környezetében a faltól növekvő oldalhosszúságú prizma elemeket generáltunk, így a határréteg a  $k-\varepsilon$  turbulenciamodell megerősített falkezelését (enhanced wall treatment) lehetőségét ki tudjuk használni, ami a határréteg-leválásokat és a fal közeli áramlásokat hivatott megfelelően modellezni. A tér többi részében háromszög elemeket alkalmaztunk, strukturálatlan felépítésen. A modul közelében a háromszög elemek oldalhossza 4 mm, míg ettől távolodva fokozatosan növekszik, a skewness – a háló minőségi mutatója – pedig az egész hálóra vonatkozóan a 0,5-ös érték alatt marad. A numerikus háló hibrid jellegű, és 564 752 db elemből épül fel.



38. ábra. A tipikus elhelyezések típusai az áramlástanai modellben

A fizikai modell alapját a kontinuitási egyenlet az impulzusegyenlet és az energiaegyenlet adja, továbbá felhasználásra került a Boussinesq-féle közelítés a levegő sűrűségváltozásának meghatározására (Ansys, 2005).

Az egyenletek peremfeltételeinek megadásánál a levegő fizikai paraméterei konstansok, kivéve a sűrűséget. A környezeti hőmérséklet 300 K, a modul falának hőmérséklete konstans 350 K. Minden esetben öt különböző szélességre vonatkozóan vizsgáltuk a fotovillamos modulok hőátadását, melyek rendre  $v_{szél} = \{0, 1, 3, 5, 7\}$  m/s, amit a Magyarországon leggyakrabban előforduló szélességekre alapoztuk.

Ezen számítások eredményeit a 4.1. pont tartalmazza.

### 3.2.2. A validálás alapjául szolgáló referenciaépület ismertetése

A HÁH modell validációja LabView-ban, a mérőrendszer működése közben megtörtént. Ennek folytán fel lehet használni épületek tervezésénél a fotovillamos teljesítmény hosszútávú becslésére. Első alkalmazásként egy *referenciaépület*nél (RATI Kft. gyárépület, Komló) alkalmaztam, amelynél a hőátadási tényező meghatározásakor használt CFD módszer helyességét is teszteltük. A tervezett épület nulla energiafelhasználású gyárépületnek készült, ahol a fotovillamos modulok mellett (és a sok egyéb kiemelkedő gépészeti megoldások között) az épület szellőzését természetes módon kívántuk megoldani. A koncepció alapján (Kistelegdi, 2012) az elképzelt Venturi-tányér apparátus működését azonban szélcsatornában kellett megvizsgálni.

Mivel a szélcsatorna mérések elkészültek, adódott a lehetőség, hogy a hőátadási tényezők számítására alkalmazott módszer (4.2 pont) így legyen ellenőrizve. Ha a számítás eredményeként kapott áramlási tér megegyezik a mérésekkel, akkor a modellhasonlósági tételeket alapul véve, a hőátadási tényező meghatározásának alapjául vett  $Nu$ ,  $Pr$ ,  $Gr$  számok is megegyeznek.

A referenciaépület (39. ábra) esetében tehát a szélenergia hasznosítása fontos szerepet kapott a passzív légcserre megvalósítása miatt. Az intenzív légcserre azért fontos a kérdéses épületben,

mivel a gyártástechnológia miatt (műanyagipar) az élettanilag káros gázok fejlődése és a légtérbe kerülése nem elkerülhető. A megoldás a koncentráció csökkentése, hígítása folyamatos átszellőztetéssel. Az épületen elhelyezésre került 3 darab tányér, melyek a Venturi-tányér nevet kapták és az alattuk található kéményszerű légcsatorna átszellőztetéséért felelnek. A tányér domború volta miatt alatta felgyorsul a levegő és szívó hatást fejt ki a csatornára, mely a gyártócsarnokkal van közvetlen összeköttetésben. Az elképzelés egyedi, Venturi-tányér alkalmazása más épületeken még nem fordult elő, bár különböző szárnyprofilok hasonló célú alkalmazására már korábban is volt példa, illetve az arab országokban használt „Badgir” tornyok is hasonló elven működnek (A'zami, 2005).



39. ábra. A referencia nullenergiás gyárépület látványterve a Venturi-tányérokkal és a napelemekkel

A gyárépület zéró energiafelhasználásának további feltétele számos fotovillamos modul elhelyezése a homlokzaton és a tetőn, amely a gyártás villamos energiájának fedezésére szolgál. Összesen mintegy 100 kWp napelem kerül majd elhelyezésre, de első ütemben, anyagi források szűke miatt csak 12 kWp. A korábbi munkáinkból kiindulva megvizsgáljuk a napelemek energiatermelési adatait, de ehhez elsősorban ismernünk kell a napelemek pontos hatásfokát, illetve annak változását a szélesebbesség függvényében, így a hőátviteli együttható CFD segítségével lesz meghatározva.

A Venturi tányérok használhatóságának kérdése miatt a tervezés első fázisában, az épület modellje szélcsatornában került elhelyezésre, ahol több tányér-forma is meg lett vizsgálva, illetve az épületburkon 94 pontban lettek mérve a nyomásértékek, ebből vonva le következtetéseket a szellőzés mértékére.

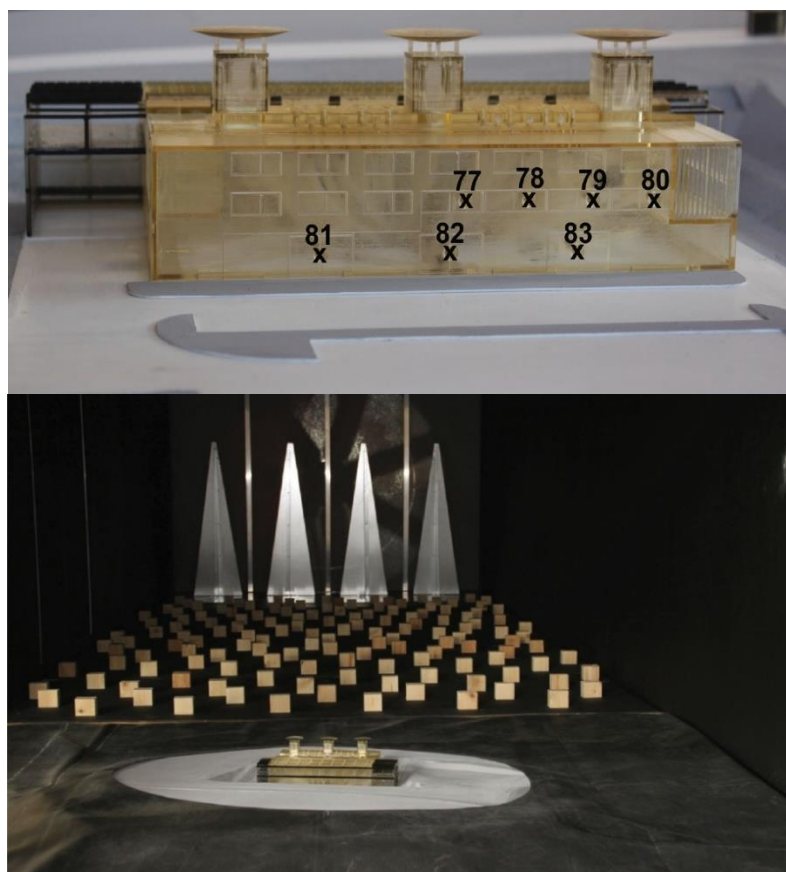
### 3.2.3. Szélcsatorna vizsgálatok

A szélcsatorna vizsgálatokat a Gesellschaft für Aerophysik végezte (Kistelegdi, Baranyai, 2012). A vizsgálatok során 3 m/s befúvási sebességet állítottak be és örvénygenerátorokat, illetve a felületi érdességet szabályozó elemeket alkalmaztak a természetes környezet szimulálása érdekében (Plate, 1993). A komló környezeti nyílt terepen levőnek minősíthető, mivel nincsenek épületek a közelben. Ez alapján a földközeli határreteg 200-300 m magasságig befolyásolja a szabad áramlást (40.ábra). A szélcsatornában az épületmodell dimenziói (M 1:200) miatt elegendő 150 m magasságig modellezni a földközeli határreteg-áramlást, ezt a 10 x 10 cm méretű „érdesítőelemek” teszik lehetővé.



40. ábra. A szélprofil alakulása különböző típusú környezet esetén

A szélcsatorna 3,0 m x 2,0 m x 1,7 m méretű tesztszekcióval rendelkezik (41. ábra), melyben a makett forgatható a különböző szélirányok beállítása miatt. A vizsgálatok során az épületet körbeforgatva 30°-onként végeztek méréseket. A vizsgálatok részben a szellőztetés mértékére irányultak, de több Venturi-tányér konstrukció is meg lett vizsgálva, a legjobb forma kiválasztása érdekében és már ezen a modellen is el lettek helyezve a napelemek, bár ezekre közvetlen mérés nem történt.



41. ábra. A 3D nyomtatással készült makett (felül) és a szélcsatorna a gyárépület modelljével

Eredményként 12 különböző szélirány esetén, négyféle Venturi-konstrukcióra lettek megadva a statikus nyomás alapján számolt dimenziómentes nyomásértékek ( $C_p$ ).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} u_{in}^2}, \quad (3.18)$$

ahol  $p_\infty$  a szélcsatorna főáramában mért statikus nyomás,  $p$  az épületburkon mért nyomás,  $\rho$  a levegő sűrűsége az adott hőmérsékleten és nyomáson, továbbá  $u_{in}$  a szélesség 10 m magasságban (ami a szélcsatorna esetében mindössze 5 cm magasságot jelent).

Az így megadott nyomáseggyütthatók negatív előjel esetén szívóhatást fejeznek ki, míg pozitív esetében túlnyomást. (A  $C_p$  értékek hasonlóak a járműaerodinamikában használt  $C_d$  értékekhez.)

Jelen munkában csak az ovális Venturi-tányér (ahol a torony vízszintes metszetének méretei: 4,90 m x 3,80 m) változatot mutatjuk be, mivel a szélcsatorna vizsgálatok eredményeként ez lett kiválasztva és megépítve. A szélcsatorna vizsgálaton alapuló számítások során a 30°-os szélirány lett részletezve, amely esetében 210 143 m<sup>3</sup>/h térfogatáram adódott, amely a három tornyon oszlik el a 7. táblázatban megadott módon. A kiáramlás a tornyokon történik, míg a levegő a kapukon (a legnagyobb keresztmetszetű nyílások) jut be az épületbe.

7. táblázat: Légáramok a tornyokon keresztül

Torony megnevezés	Szenzor sorszám	Aaero (m <sup>2</sup> )	Cpe-Cpi (-)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)
Torony 1 nyugat	1	1,86	-0,98	-19896
Torony 1 nyugat	2	1,86	-0,89	-18949
Torony 1 nyugat	3	1,86	-0,49	-14118
Torony 1 nyugat	4	1,86	-0,6	-15588
Torony 2 közép	5	1,86	-1,13	-21414
Torony 2 közép	6	1,86	-0,98	-19886
Torony 2 közép	7	1,86	-0,58	-15261
Torony 2 közép	8	1,86	-0,56	-15114
Torony 3 kelet	9	1,86	-1	-20129
Torony 3 kelet	10	1,86	-0,94	-19496
Torony 3 kelet	11	1,86	-0,58	-15366
Torony 3 kelet	12	1,86	-0,55	-14926
Kapu	81	12,71	0,74	73118
Kapu	82	12,71	0,64	67931
Kapu	83	12,71	0,66	69094

#### 3.2.4. A hőátviteli tényezők számítási módszerének validálása

A szélcsatorna vizsgálatok Németországban készültek, amely kezdődött a 3D modell kinyomtatásával, majd a szélcsatorna mérésekkel folytatódott. Az áramlási tér CFD (Computational Fluid Dynamics) szimuláció segítségével is számítható (4.1. pont), majd a mérések és a szimulációk összehasonlíthatóak (Sakr, et al., 2008).

Az egyfázisú áramlásokat legáltalánosabb formában 4 db helytől és időtől függő ismeretlen függvényre felírt megmaradási egyenlet segítségével írhatjuk le. Az alapegyenletek megmaradási tétel alakjának szépsége, hogy a tömeg, az impulzus és az energia megmaradását azonos matematikai formában kezeli, amely általánosan is értelmezhető. Ezek a Navier-Stokes egyenletek.

A Navier-Stokes (NS) egyenletrendszer írja le az egységnyi folyadék-térfogat mozgását. Szükséges volt az egyenletek egyszerűsítése az analitikus megoldás megkönnyítése érdekében, ezért ideális folyadékkal számol a NS ( $\mu = \text{áll.}$  és  $\rho = \text{áll.}$ ):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\
\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\
\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right).
\end{aligned} \tag{3.19}$$

A négy ismeretlen ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  és  $p$ ) meghatározásához szükséges negyedik egyenlet a folytonosság egyenlete, amely  $\rho = \text{áll.}$  esetén a

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{3.20}$$

alakban írható fel.

A műszaki gyakorlatban nemigen van szükség arra, hogy az áramlások időbeni változását is megfigyeljük, még akkor sem ha az áramlás turbulens, általában inkább csak az áramlási képstruktúrájára vagyunk kíváncsiak. Ráadásul ez a fajta időfüggő leírásmód nagyon számításigényes és bonyolult, ezért Reynolds levezette a NS egyenletrendszer időbeli átlagokra vonatkoztatva (átlagsebességre és átlagnyomásra). Ezt nevezik Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) egyenletrendszernek.

A modellezés során több turbulenciamodellt is megvizsgáltunk, hogy melyek lehetnek alkalmasak legjobban a gyárépület mint „tompá test” körüli áramlás leírására. A szakirodalom alapján alapvetően két turbulenciamodell alkalmazható: a  $k-\varepsilon$  és a  $k-\omega$ . (Ferziger, Peric, 2002) A  $k-\varepsilon$  turbulenciamodell a nevében említett két, a turbulencia leírására használt jellemzőt alkalmazza: a  $k$  a turbulencia kinetikus energiája, az  $\varepsilon$  pedig a turbulens kinetikus energia disszipációja, vagyis a turbulens kinetikus energia elnyelődése amikor az örvények mozgási energiája súrlódás útján hőenergiává alakul. A következő transzport-egyenletek jellemzik ezt a folyamatot:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3.21}$$

és

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \tag{3.22}$$

ahol  $G$  a számított turbulens kinetikus energia ( $k$  – sebesség szerint,  $b$  – felhajtóerő alapján),  $Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  - konstansok.

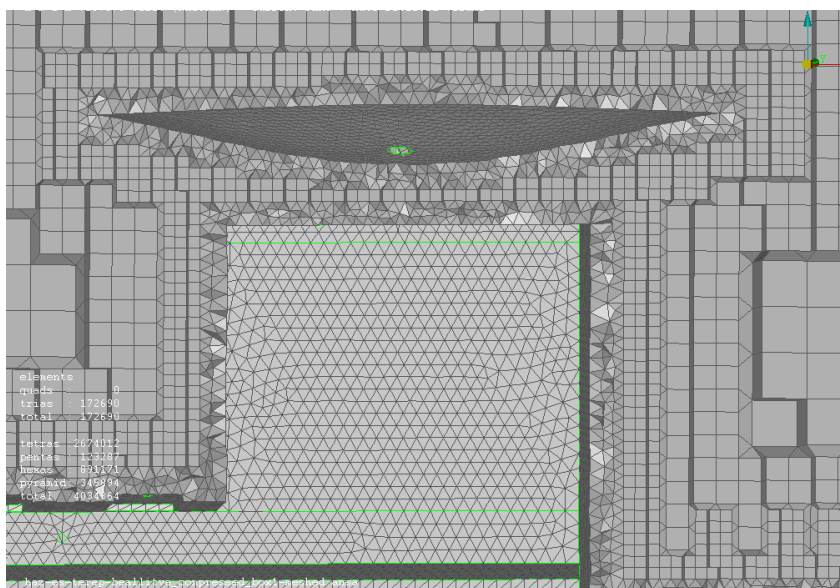
A standard  $k-\varepsilon$  a legrégebben használt turbulenciamodell. Két transzportegyenletet old meg külön-külön  $k$ -ra és  $\varepsilon$ -ra, amely lehetővé teszi a turbulens viszkozitás és a hosszlépték egymástól független meghatározását. Félig tapasztalati modell, mivel a  $k$  transzportegyenlete egy egzakt egyenletből egyszerűsítő feltételezésekkel származik, míg az  $\varepsilon$  transzportegyenlete a  $k$  egyenlet alapján készült dimenzió megfontolások alapján. A megvalósulható (Realizable)  $k-\varepsilon$  modell két alapvető dologban különbözik az előzőtől: a turbulens viszkozitás meghatározására új egyenletet használ és az  $\varepsilon$  transzportegyenlete egzakt egyenletből elhanyagolásokkal és különböző feltételezésekkel lett levezetve.

Azért hívják megvalósulhatónak, mert a modell kielégíti az egyes matematikai kényszereket a húzófeszültségek esetében a turbulens áramlások fizikájának megfelelően. Ez egy korszerű  $k-\varepsilon$  modell, így turbulens áramlások esetén pontosabb eredményeket szolgáltathat. A fő áramlás turbulens jellegére jelentős hatással van a fal jelenléte, illetve a fal menti határreteg, ezért a



falközeli áramlás modellezése jelentősen befolyásolja a számítás pontosságát. A faltól távolodva az áramlás turbulens kinetikus energiája gyorsan nő, ennek következtében az áramlás pontos reprezentációja a fal mentén igen fontos. A Spalart-Allmaras és a  $k-\omega$  modellek alapvetően a lamináris és az átmeneti réteg felbontására lettek kifejlesztve (Ferziger, Peric, 2002), ezzel szemben a  $k-\varepsilon$  modellnél nem ez volt az eredeti fejlesztési koncepció, így a falközeli zónát ismételtelen modellezni kell. A falközeli áramlás modellezésére kétféle módszert kínál a Fluent program: az egyik, hogy falfüggvénnyel számítja az áramlást a határréteg logaritmikus részében úgy, hogy a lamináris alapréteg és az átmeneti réteg egy réteget alkot. A másik módszer szerint egy falközeli modellel (Enhanced Wall Treatment) a lamináris alapréteget is külön megoldja, ehhez viszont a számítási igényt megnövelő részletes határréteg háló kell. A  $k-\omega$  modell  $\varepsilon$  helyett  $\omega$ -ra old meg egyenletet (ez a turbulencia második paramétere), ahol  $\omega$  örvényfrekvencia fizikai tartalma megfelel  $\varepsilon/k$ -nak. A fal közelében kedvezőbben viselkedik a  $k-\varepsilon$  modellnél, viszont a szabad áramlásban rosszabb, ezért például az SST modell változat valójában a határrétegen kívül  $k-\varepsilon$  modellt old meg.

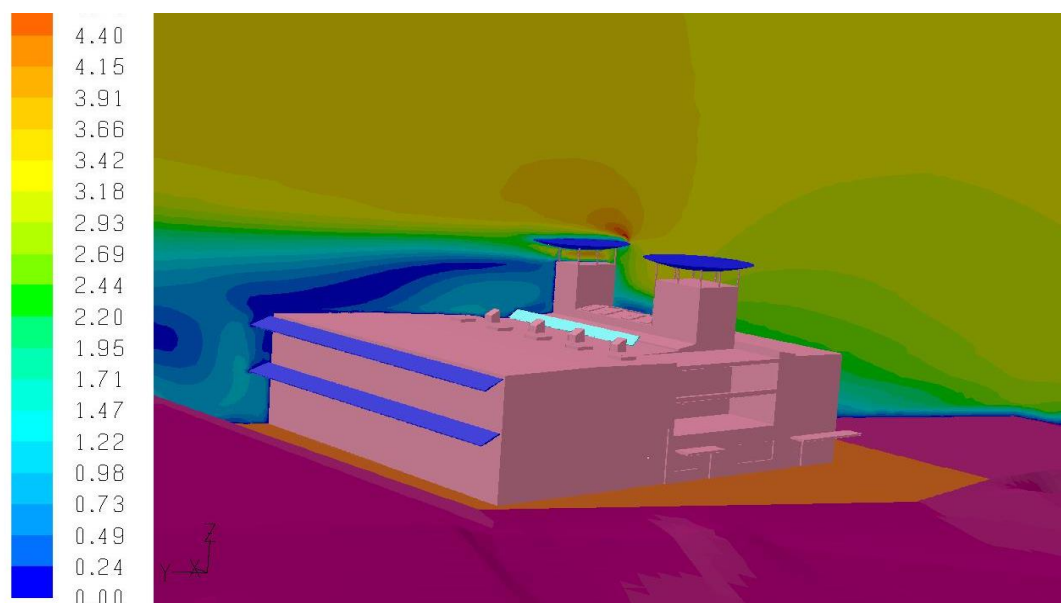
A CFD szimuláció során modellezésre és diszkretizálásra került a referenciaépület CAD modellje. A felületi hálót háromszög elemeket használva, átlagosan 9-11 mm élhosszúságú cellákból építettük fel (42. ábra).



42. ábra. A numerikus háló metszete a keleti toronynál

A térfogati háló a felületi hálóra épül, ezért a felületi háló készítésekor oda kellett figyelni egyes minőségi követelményekre. Ilyenek például, hogy nem lehetnek túlságosan hegyesszögű háromszögek és nem megengedett a hirtelen méretbeli változás, különben a térfogati háló egyes elemei túlságosan torzultak lehetnek, ami a számításokra is hatással van: rontja a pontosságot és destabilizálhatja a megoldási folyamatot. A diszkretizált modell több mint 9 millió térfogati elemet tartalmaz az áramlási tér mérete miatt, és bár a teljes modellt több tartományra bontottuk, így az épülettől távoli térben, az alacsony Reynolds szám miatt feltételezett lamináris jellegű áramlás miatt a térfogati elemek mérete többszörösre lett növelve, például a befúvási oldalon a 40 mm-t is eléri, amely a jellemző méretek miatt (1,7 x 2,0 m) arányaiban 0,02-os felbontást jelent, ami nem befolyásolhatja a végeredményt.

Az első számítások  $k-\varepsilon$  turbulencia modell esetén nem adtak teljesen egyező eredményt, így több változat került számításra, bár később kiderült, hogy mégis ezek közelítenek a legjobban a szélcsatorna mérésekhez (43. ábra).



43. ábra. Az áramlási tér a hosszirányú metszeten megjelenítve (m/s)

A szimulációhoz az épület  $30^\circ$ -os (szélirányhoz viszonyítva) beállítását választottuk, mivel ebben az esetben a legmagasabb a légtömegáramok értéke, de hasonlítási alapként a  $120^\circ$ -os beállítást is vizsgáljuk, mivel a CFD számítások eredményei ehhez jobban közelítenek. Hangsúlyozni kell, hogy mindkét vizsgálat (tulajdonképpen a mérés és a szimuláció is) modellkísérletnek tekinthető, azaz a valósághoz való legnagyobb hasonlóságra törekszünk. A legnagyobb hasonlóság elérése kétféle módon lehetséges: vagy a Reynolds-szám megtartása szükséges, ami ebben az esetben a nagy méretkülönbség miatt nem igazán lehetséges (ehhez a szélcsatornában  $66\text{ m/s}$  sebességet kellene beállítani, a hasonlósági kritériumok miatt), vagy a dimenziómentes nyomásértékekkel számolunk ( $C_p$ ), amely a mindenkori környezeti nyomáshoz való különbséget veszi alapul a légsebességtől függetlenül, mint ahogyan az autópárhán használatos  $C_D$  aerodinamikai alaktényező. Ennek meghatározása viszont tapasztalati összefüggéssel (3.18) történik és emiatt jelentős egyszerűsítéseket tartalmaz, ami a pontosságot ronthatja. Ezen okok miatt nem jelenthető ki hogy a CFD számítás, vagy a szélcsatorna kísérlet a pontosabb, mivel mindkettő más oldalról próbálja a hasonlóságot közelíteni. A döntést a valós épületben való mérések fogják megadni.

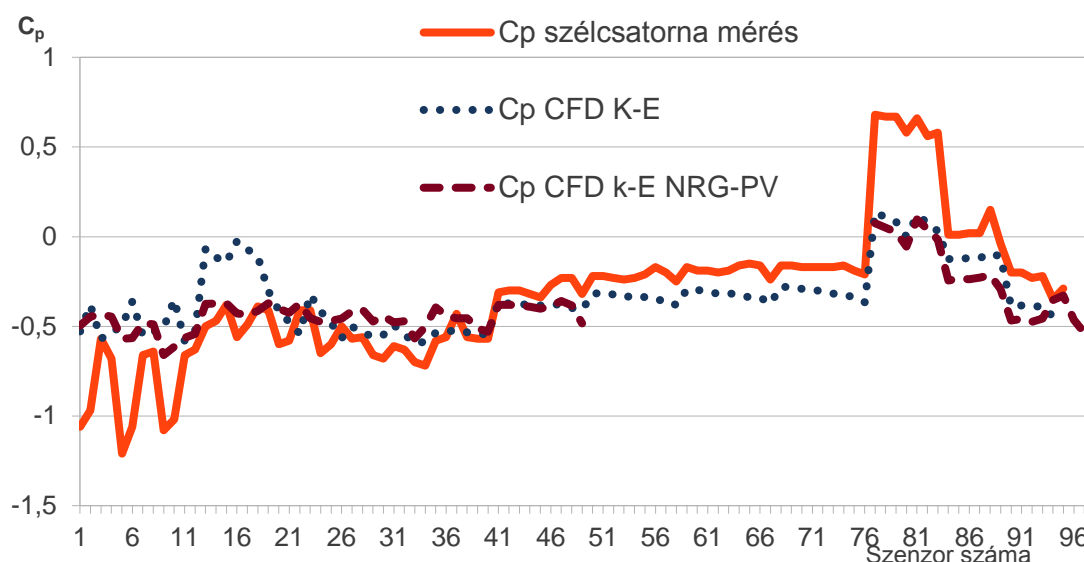
Mindezek ellenére összehasonlításra került a CFD szimuláció és a szélcsatorna vizsgálat a későbbi mérésekkel való összehasonlítás miatt, majd a megváltozott geometria körüli áramlás már csak CFD-vel lett számolva. Mindezekhez még hozzájön az a számítás, amelyben az energiaegyenletet is megoldjuk – a napelemek hatásfokának pontos számítása érdekében –, de ez a számítási mód még jobban közelíti a valóságos körülményeket, ezért a  $C_p$  értékek összehasonlítása esetében is érdemes vizsgálni, említeni (8. táblázat).

A 44. ábrán a „ $C_p$  CFD k-E NRG-PV” nevű adatsor esetében az energiaegyenlet is megoldásra került a napelemek körüli levegő áramlásának modellezéséhez. Az ábrán látható továbbá, hogy a  $C_p$  értékek a tornyok esetében magasabb értékekre jöttek ki a CFD esetében mint a szélcsatorna vizsgálatoknál, a kapuknál pedig ugyanez alacsonyabb, így az egyik átszellőztetési vizsgálat esetében mikor a kapuk és a tornyok vannak nyitva, a  $\Delta C_p$  alacsonyabb értéke miatt a CFD vizsgálat kisebb térfogatáramokat határoz meg. A 8. táblázatban láthatjuk ezek pontos értékeit  $30^\circ$ -os szélirány esetében, összehasonlítva a  $120^\circ$ -os befúvási iránnyal.



8. táblázat: A mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása

megnevezés	sorszám	Aaero (m <sup>2</sup> )	Szélsősatorna 30°			120°			Cp CFD k-E i3000			Cp k-E kiviteli-terv-i200-NRG-PV		
			Cpe-Cpi (-)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)	légsébeség (m/s)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)	Cpe-Cpi (-)	légsébeség (m/s)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)	Cpe-Cpi (-)	légsébeség (m/s)	Légáram (m <sup>3</sup> /h)	légsébeség (m/s)
Torony 1	1	1,86	-0,98	-19896	-2,97	3673	-0,45	-9108,32	-1,36	-0,36	-7273,40	-1,09	20302,04	-1,06
Torony 1	2	1,86	-0,89	-18949	-2,83	2869	-0,30	-6442,15	-0,96	-0,32	-6882,44	-1,03	21291,01	-0,97
Torony 1	3	1,86	-0,49	-14118	-2,11	1839	-0,49	-14092,24	-2,10	-0,32	-9138,26	-1,36	28812,24	-0,57
Torony 1	4	1,86	-0,6	-15588	-2,33	9113	-0,46	-11837,10	-1,77	-0,33	-8489,56	-1,27	25980,00	-0,68
Torony 2	5	1,86	-1,13	-21414	-3,20	-3157	-0,42	-7897,78	-1,18	-0,42	-8034,99	-1,20	18950,44	-1,21
Torony 2	6	1,86	-0,98	-19886	-2,97	-2746	-0,28	-5737,63	-0,86	-0,41	-8399,01	-1,25	20291,84	-1,06
Torony 2	7	1,86	-0,58	-15261	-2,28	-1758	-0,47	-12386,42	-1,85	-0,36	-9581,82	-1,43	26312,07	-0,66
Torony 2	8	1,86	-0,56	-15114	-2,26	2572	-0,45	-12160,42	-1,82	-0,38	-10239,80	-1,53	26989,29	-0,64
Torony 3	9	1,86	-1	-20129	-3,01	-9446	-0,43	-8629,13	-1,29	-0,49	-9812,66	-1,47	20129,00	-1,08
Torony 3	10	1,86	-0,94	-19496	-2,91	-16431	-0,27	-5641,57	-0,84	-0,43	-8911,55	-1,33	20740,43	-1,02
Torony 3	11	1,86	-0,58	-15366	-2,29	-11099	-0,50	-13366,86	-2,00	-0,44	-11611,10	-1,73	26493,10	-0,66
Torony 3	12	1,86	-0,55	-14926	-2,23	-12665	-0,44	-12058,09	-1,80	-0,42	-11372,12	-1,70	27138,18	-0,63
SUMMA				-210143		87500		-119357,71			-109746,70	-16,39		
Kapu	81	12,71	0,74	73118	1,60	-30176	0,12	61070,81	9,12	0,22	44359,67	6,62	98808,11	0,66
Kapu	82	12,71	0,64	67931	1,48	26555	0,08	42200,67	6,30	0,19	37371,11	5,58	106142,19	0,56
Kapu	83	12,71	0,66	69094	1,51	40847	0,03	16086,23	2,40	0,14	28015,91	4,18	104687,88	0,58
SUMMA				210143		87500		119357,71			109746,70			

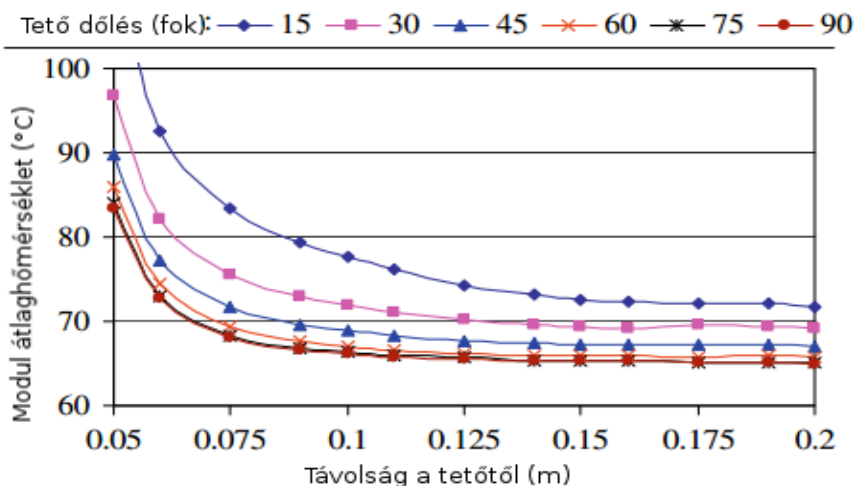
44. ábra. A  $C_p$  értékek mérési pontonkénti összehasonlítása

A legjobb eredményeket végül a  $k-\varepsilon$  (a 8. táblázatban  $k-E$ ) turbulencia modell használatakor kaptuk, bár  $k-\omega$  SST turbulencia modellel is végeztünk számításokat. A táblázatban a  $k-\varepsilon$  esetében kapott értékeket tüntetjük fel, mert ezek adták vissza a legjobban a szélcsatorna-mérések eredményeit, de a későbbi (a felépült épületben) mérések akár a  $k-\omega$  SST modellt is igazolhatják. A táblázatban megadásra kerültek a sebesség-értékek az adott keresztmetszetekben, és mivel az épületben anemométerrel fogjuk tudni mérni a légsebességet a tornyokban, így összehasonlítási alapként ezek használhatók.

Ezen eredmények közvetve függenek össze a hőátadási tényezők számításával, ezért kerültek ismertetésre itt, az Anyag és módszer fejezetben.

### 3.2.5. Az ideális elhelyezés vizsgálata a hőátadási tényezők által

A szimulációk során vizsgáltam a modulok ferde tetőtől való optimális távolságát, így rendre 5 és 10 cm-re helyeztem a tetőtől a modulokat a CAD modellben. Az előző fejezetekben ismertetett hőátadási tényezők meghatározása a 10 cm-es távolságban történt, mivel ez bizonyult optimálisnak. Ehhez kapcsolódó munkámat 2009 elején kezdtem (lásd Háber, Farkas, 2009; Haber, Farkas, 2010), viszont Gan (2009) ugyanerre irányuló, tőlem független vizsgálatait előbb publikálta, így az alábbiakban Gan (2009) részletesebb eredményeit ismertetem (45. ábra).



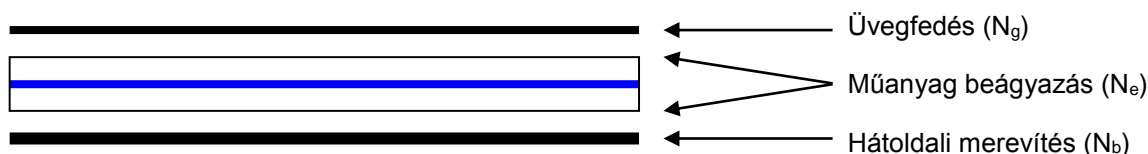
45. ábra. A PV modulok átlaghőmérséklete

Gan (2009) legfontosabb eredményeit a 45. ábra tartalmazza, amely szerint 5 cm távolság esetén még  $45^\circ$  dőlésnél is elérheti a hőmérséklet a  $90^\circ\text{C}$ -ot ( $20^\circ\text{C}$  környezeti hőmérséklet és  $1000\text{ W/m}^2$  napsugárzás esetén). 10 cm esetén a hőmérséklet  $72^\circ\text{C}$  és innen már nem csökken szignifikánsan.

Láthatjuk, hogy 10 cm-nél – ha a tetődőlés meredekebb, vagy falra helyezett a modul –, akár ehhez képest is még  $5^\circ\text{C}$ -al alacsonyabb hőmérséklet érhető el, viszont ekkor a kedvezőtlen beesési szög miatt többet veszítünk, hiszen Magyarországon a  $35\text{-}36^\circ$  dőlés az optimális (Rusirawan, 2013).

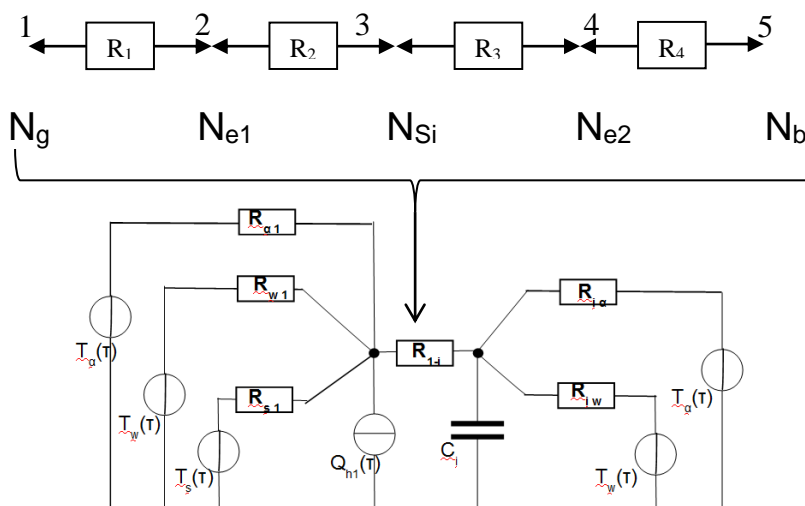
### 3.3. Napelem modulok hőáramhálózatos modellezése

A hőáramhálózatos (HÁH) modellezés esetében a napelem modulok csomópontjaira felírva meghatározhatók a hőközlési folyamatok a villamos analógia alapján. A hálózat egyes csomópontjai a szerkezeti felépítést hivatottak reprezentálni (46. ábra), melyek az anyagminőségi jellemzők miatt termikus ellenállásokkal vannak összekötve. A szerkezetet anyagai, illetve rétegei alapján csoportosítva meghatározhatjuk az egyes csomópontok (rétegek) átlagos hőmérsékletét. Így gyakorlatilag egy hely szerinti diszkrétizálást végzünk, amellyel kiküszöböljük a parciális differenciálegyenletek szükségességét (Imre, 1983).



46. ábra A fotovillamos modulok általános felépítése

A hőáramhálózatos modellben az egyes részek hőkapacitását a hálózat csomópontjaihoz rendeljük, a csomópontokat pedig hőátviteli ellenállásokkal kötjük össze (47. ábra).



47. ábra A csomópontok és a hőátviteli ellenállások kapcsolata az egyszerűsített hőáramhálózatos modellben

A hőáramhálózatos modellben  $R_i$  jelöli a hőellenállásokat a csomópontok között,  $T$  feszültséggenerátor ( $T_a$  – a légáram hűtő hatása (hőátadás),  $T_w$  – a környezeti hőmérséklet,  $T_s$  – a besugárzás),  $Q$  áramgenerátor,  $C_i$  pedig a csomópontokhoz tartozó hőkapacitás, amelyek

megjelenítését a későbbiekben a modell átláthatóságának érdekében elhanyagoltuk, mivel minden csomópontozhoz tartozik kapacitás is.

A fotovillamos rendszer esetében az abszorber oldalán fellépő hőáramforrást (a napsugárzást) és a szél hatását hőáram-generátorral jelképezzük, míg a környezeti hőmérsékletet termikus feszültségforrással írjuk le.

A 47. ábrán látható csomópontok a 9. táblázat anyagai szerint lettek besorolva. A fotovillamos modulok szerkezeti felépítése változó, de a leggyakrabban használt anyagok az üvegből készült fedőréteg, az EVA (ethylen-vinyl-acetat) beágyazóréteg (ami a szilícium cellákat védi az oxidatív behatásoktól) és a hátoldali védőréteg, amely többnyire TEDLAR anyagú.

9. táblázat: A napelem modul anyagának tulajdonságai:

Anyag	Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	Hővezetés (W/mK)	Fajhő (J/kgK)	Rétegvastagság g (mm)
üveg fedés (N <sub>g</sub> )	2580	0,98	79	3
beágyazó réteg (N <sub>ei</sub> )	939	0,23	1926	0,5 (2 rétegben)
szilícium (N <sub>si</sub> )	2730	144	712	0,4
hátoldali védőréteg (N <sub>b</sub> )	150	0,36	1200	0,1

A tranziens állapotra érvényes termikus modell a hőáramhálózatos modell alapján:

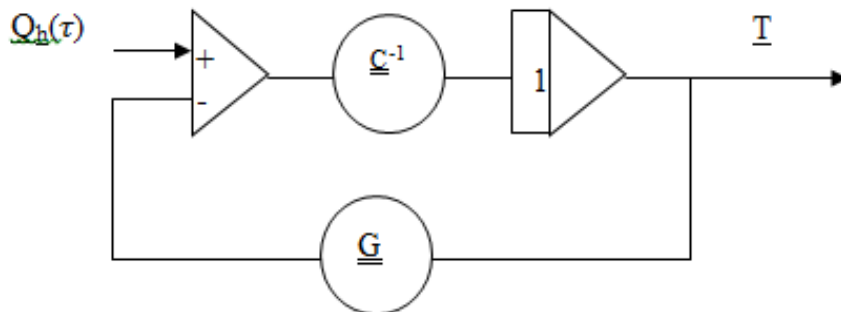
$$\underline{G}\underline{T}(\tau) + \underline{C} \frac{d\underline{T}(\tau)}{d\tau} = \underline{Q}_h(\tau), \quad (3.32)$$

ahol  $\underline{G}$  a hőátviteli mátrix,  $\underline{C}$  a hőkapacitás mátrix,  $\underline{T}$  a hőmérséklet oszlopvektor,  $\underline{Q}_h$  a hőáram oszlopvektor.

$\underline{G}$  hőátviteli mátrix:

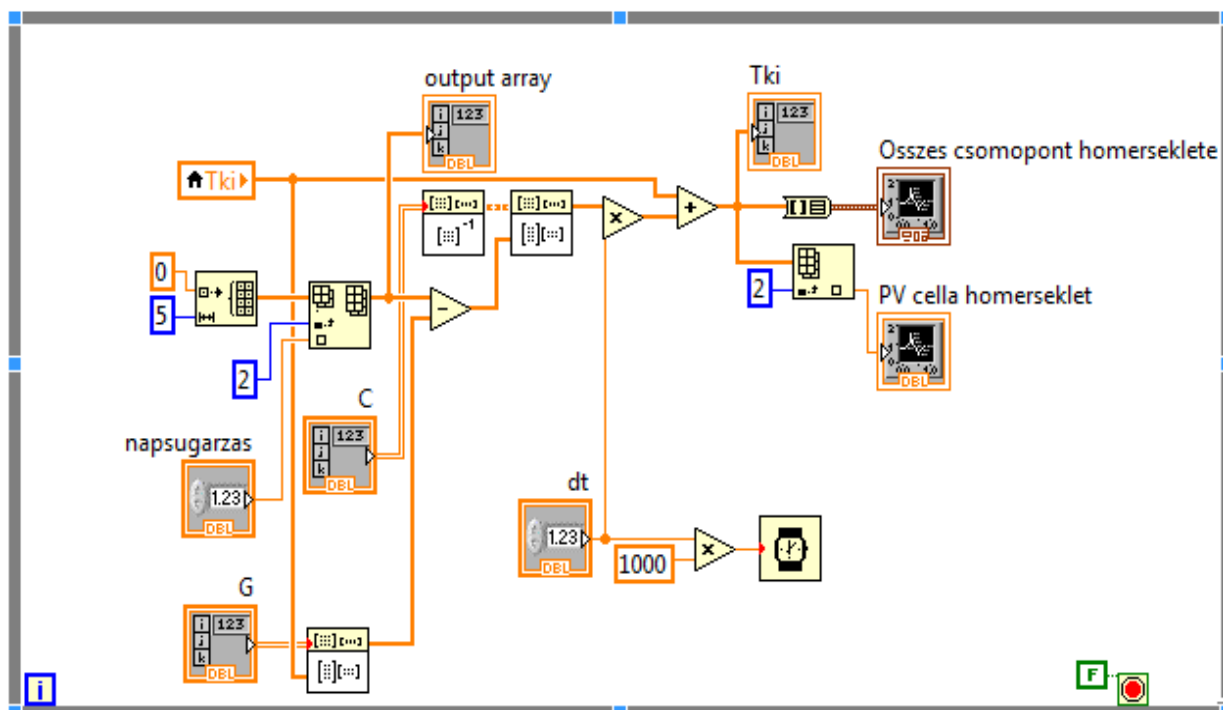
$$G = \begin{bmatrix} G_1 & -1/R_{12} & \dots \\ -1/R_{21} & \dots & -1/R_{45} \\ \dots & -1/R_{54} & G_5 \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

A hőkapacitás meghatározása az anyag fajhője alapján lehetséges, de figyelembe kell venni a hőáramhálózatos modell struktúráját is. A tranziens modell (3.32) alapján felírható az analóg számítógépes kapcsolás (48. ábra), amellyel identikus a LabView blokk diagram.



48. ábra. Az analóg számítógépes kapcsolás

Az analóg számítógépes modell lényegében csak formailag különbözik a LabVIEW diagramtól, a megoldást az 49. ábrán láthatjuk.



49. ábra. A LabView blokkdiagram a csomóponthőmérséklet számításához

A szimulációs programot párhuzamosan futtatva az adatgyűjtő programjával, a mérési adatok átadhatók a modellnek, és egy grafikus modulon (Waveform Chart) megjelenítve mérés közben összehasonlíthatók az eredmények.

### 3.4. A mérés-adatgyűjtő rendszer a hőáramhálózatos modell validálásához

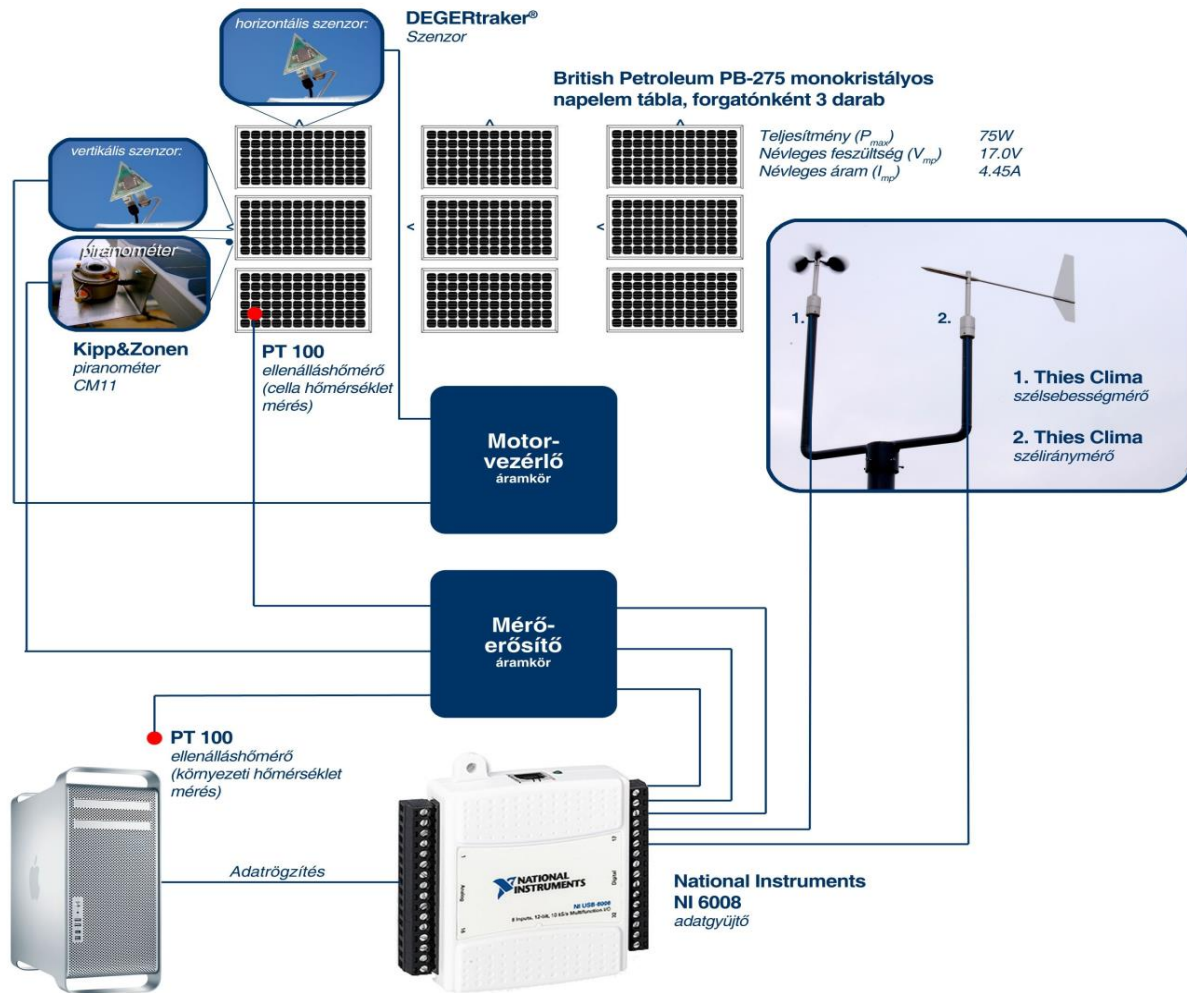
A Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki Karán 2004-ben megvalósított fotovillamos rendszer mellé telepített adatgyűjtő (DAQ) mérte a rendszer jellemzőit, de a 2010-es épületfelújítás során újra fel kellett építeni a komplett rendszert, ekkor már a kutatásunk eredményeinek ellenőrzéséhez megfelelő adatgyűjtést kívántuk megvalósítani. A régi rendszer 10 darab BP Solar 75 Wp PV modult tartalmazott, amelyek dél felé voltak irányítva, konstans  $46^\circ$ -os dőléssel. A fotovillamos rendszer adatgyűjtője csak az inverter által hálózatba táplált energia mennyiségét naplózta.

A kutatás a fotovillamos modulok energiaviszonyainak vizsgálatára irányul, különösképpen a természetes áramlások (szél és konvektív) általi hűtő hatásra. A PV modulokat körüláramló levegő befolyásolja a hőátadási tényező mértékét (Háber, Farkas, 2012). A munka során létrehoztunk egy hőáramhálózatos modellt, ami leírja a hőáramokat a PV modul szerkezetének belsejében. Ez alapján felírható a hőátadás matematikai megoldása, ami a szerkezet csomópontjainak hőmérsékletét adja meg mátrixos formában és ez egyszerűen megoldható Matlab/Simulink-ben (Ramaprabha et al., 2010).

Célszerű egy Labview kapcsolás létrehozása is, mivel az eredményekkel, a mérésekkel *előben* összehasonlítva, validálni is lehet a matematikai modellt. Ehhez azonban olyan eszközök kellene amelyekkel Labview-on keresztül lehet kommunikálni.

Ezen okok miatt egy teljesen új adatgyűjtő rendszer lett felépítve, ami tartalmaz szélirány és – sebesség szenzort, pyranometert, két PT100 szenzort. (50. ábra) Az egyik hőérzékelő standard hőmérőházba telepítve, míg a másik a napelem hátuljára ragasztva úgy, hogy a szenzornál a hátoldal a celláig ki lett vágva, így ez a pontos cellahőmérsékletet adja vissza. Ennek a számítása a célunk a matematikai modellel is, így ez egy összehasonlítási adatként szolgál.





50. ábra. Az adatgyűjtő rendszer sematikus ábrája

### 3.4.1. A fotovillamos rendszer ismertetése

A kísérleti rendszer 9 db napelemet tartalmaz a BP típusból, amelyek 3-as csoportonként egy két tengelyű napkövető állványra vannak elhelyezve. A modulok tulajdonságait a 10. táblázat ismerteti. A rendszer együttes teljesítménye 675 Wp 5,84 m<sup>2</sup> nettó felülettel.

10. táblázat: A BP275 modulok fő jellemzői

Típus:	PB 275
Teljesítmény:	75 Wp
Névleges feszültség:	12 V
Max. feszültség:	17 V
Opencircuit voltage:	21,4 V
Max. áramerősség:	4,45 A
Rövidzárási áram:	4,75 A
Hőmérsékletfüggési együttható	0,5% / °C
Cellák száma:	36
Méret:	1209 x 537 mm
Tömeg:	7,5 kg

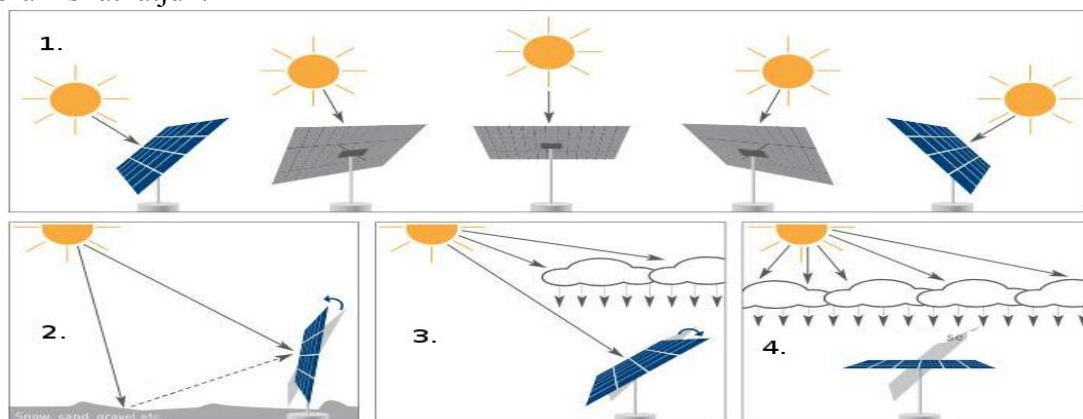
Az inverter SMA Sunny Boy 700 típusú, az adatait a 11. táblázat tartalmazza

## 11. táblázat: SMA Sunny Boy 700 típusú inverter fő jellemzői

Névleges teljesítmény:	700 W
Bemenő feszültség:	75 - 150 V, 100 - 200 V, 125 - 250 VDC
Kimenő feszültség:	230 VAC
Max. bemenő áramerősség:	6,2 A
Max. hálózati impedancia	1,75 $\Omega$
Megengedett impedancia ugrás::	0,5 $\Omega$
Megengedett frekvencia változás:	0,2 Hz
Számítógép csatlakozás:	RS 232C
Védelem:	IP 65
Működési hőmérséklet:	-25 - +60°C
Tömeg:	16 kg

A rendszer típusa „belső hálózattal pufferelt” ami azt jelenti, hogy hivatalosan nem mérjük, hogy mennyi energiát adunk át a villamos hálózatba, mert a belső fogyasztás mindig sokszorososa a termelt energiának, így minden esetben a termelés belső hálózatban felhasználásra kerül.

A 9 modul a 3 db napkövető állványra van elhelyezve, hogy a lehető legtöbb energiát termeljék. A napkövetők DEGERtraker típusúak (DEGERenergie GmbH, 2015), két szenzort tartalmaznak, az egyik a horizontális tengelyt állítja be, a másik a vertikálist, egymástól függetlenül. A függőleges tengelyen napkeltétől napnyugtáig követhetjük a napot, míg a vízszintes az évszakok változásából adódó beesési szöget követhetjük, de a két szenzor együtt képes felhős időben az égbolt legfényesebb része felé pozicionálni a modulokat, ahogy azt az 51. ábrán is láthatjuk.



51. ábra. A DEGERtraker rendszer előnyei

Az 51. ábrán látható üzemmódok a következők: 1. Napsütés: A DEGERtraker a nap irányába fordul. 2. Hó: A DEGERtraker a legoptimálisabb szögre áll be, hogy a visszavert fényt is maximálisan hasznosítsa. 3. Szórt felhőzet: A direkt napfény mellett a diffúz hasznosítása is maximális. 4. Egyenletes felhőtakaró: A rendszer érzékeli a legfényesebb pontot és ahhoz igazodik.

### 3.4.2. Az adatgyűjtő rendszer ismertetése

Az adatgyűjtés fő eleme egy National Instruments USB-6008 adatgyűjtő, amely 4 db analóg bemenettel rendelkezik differenciál módban és 8 db bemenettel „egyvezetékes” (single ended) módban, ahol a testet közösítjük más mérőeszközzel. Ezzel az eszközzel feszültséget tudunk mérni -10 és +10 V-os tartományban. A szenzorokat úgy kellett összeválogatni, hogy az adatgyűjtő tulajdonságainak megfeleljenek (12. táblázat), így mindegyik analóg típusú és a feszültség tartományban adnak jelet.

## 12. táblázat: Az adatgyűjtő fő jellemzői

Analóg bemenetek száma	8 single-ended, 4 differential, software selectable
Bemeneti felbontás	12 bit differenciál módban, 11 bits „single-ended” módban
<i>Max mintavételezési frekvencia:</i>	
AI FIFO	512 bytes
Időzítési felbontás	41.67 ns (24 MHz)
Időzítési pontosság	100 ppm
<i>Bemeneti tartomány:</i>	
Single-ended	±10 V
Differenciál	±20 V, ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V

Öt darab érzékelő van, ami azt jelenti, hogy 3 db differenciális és 2 db közös földet használó bemenetet kell használni, ügyelve arra, hogy a referencia potenciál a párban csatlakoztatott eszköznél ugyanaz (Bohorquez et al., 2009).

Szélirány és szélsébség szenzorok:

A szélszenzorok a német ThiesClima gyártótól származnak, amelyek prémium kategóriás termékek.

## 13. táblázat: A szélsébség érzékelő tulajdonságai (type 4.3150)

Méréstartomány	0,3 – 75 m/s
Pontosság	<0,2 m/s
Kimenő jel	0-10 V = 0 – 75 m/s
Tápegység	24 VDC, 15 mA
A szélirány (type: 4.3351) szenzor:	
Méréstartomány	0-360°
Pontosság	1°
Kimenő jel	0-10 V
Tápegység	24 VDC, 4,5 mA

A szélszenzorok egy saját tervezésű állványon kaptak helyet, ahogy az 52. ábrán is láthatjuk.



52. ábra. A fotovillamos és az adatgyűjtő rendszer a PTE-PMMIK főépület tetején

A hőmérséklet érzékelők:

A hőmérséklet szenzorok standard PT100 platina ellenálláshőmérők. Mivel ezek passzív szenzorok, egy táp szükséges a feszültségesés méréshez. A legelterjedtebb megoldás a Wheatstone-híd, amely esetében egy referencia ellenállással hasonlítjuk össze a hőellenállást. A



mért feszültség egyenesen arányos a PT100 változó ellenállásával, amely szintén egyenesen arányos a hőmérséklettel, adott tartományban.

Esetünkben egy Mitsubishi AL2-2PT hőmérséklet távadót alkalmaztunk, amely szintén Wheatstone-hidat tartalmaz és a 24 V-os bemenő feszültséget a számunkra szükséges 0 és 10 V közötti tartományra alakítja, amely egyenletesen van felosztva az 50-től 200 °C-os mérési tartományban. Másik előnye, hogy 2 szenzort köthetünk rá azonos földponton, így ennél ki tudjuk használni a "single ended" módot. Az egyik szenzor egy szabvány hőmérőházban van elhelyezve, míg a másik a már korábban említett módon a PV panel hátára van ragasztva, amely így a kontroll pontot adja a hőáramhálózatos modellhez.

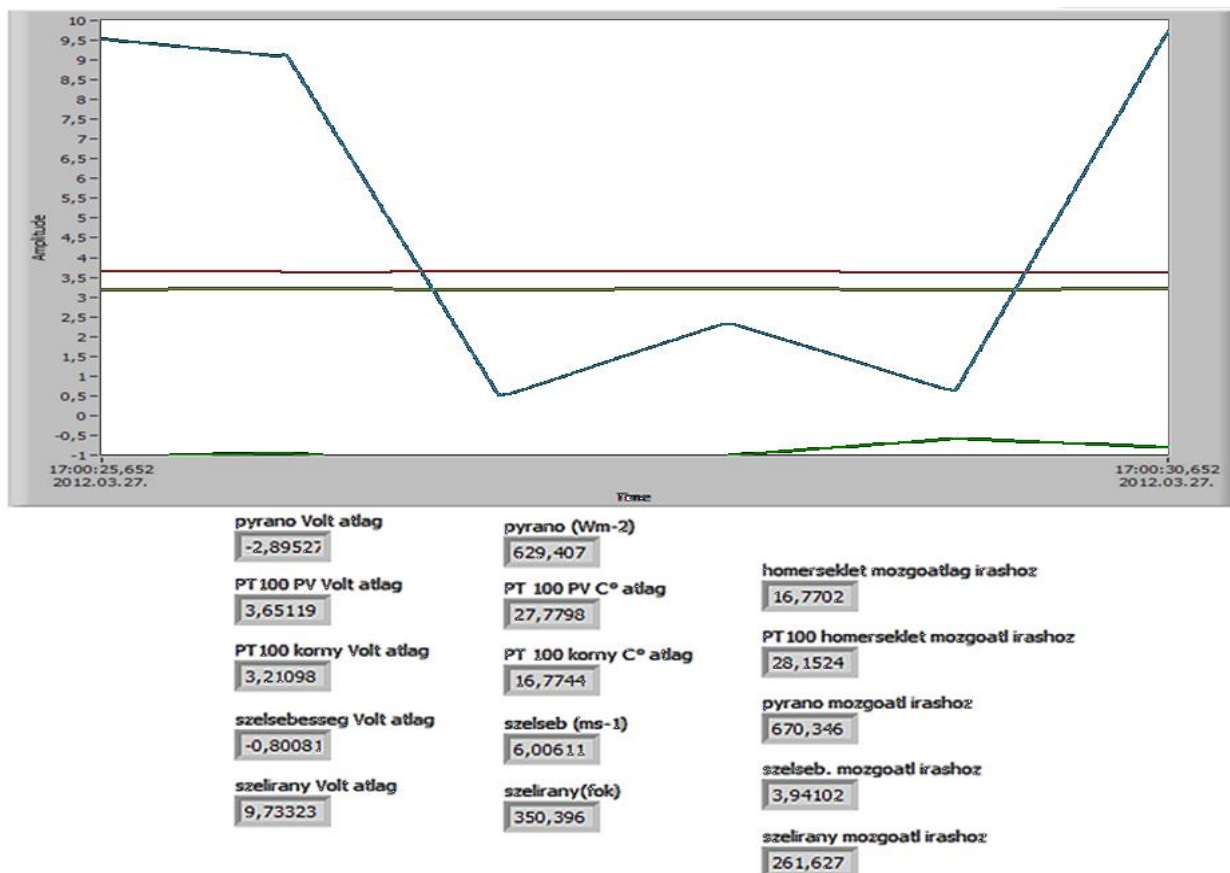
A pyranometer:

A pyranometer egy szélessávú fény szenzor, amellyel a fényerősséget tudjuk mérni egy sík felületen, mind a direkt részét mind a diffúz részét. Érzékelőként egy Kipp&Zonen CM11 típusú pyranometert alkalmaztunk, amely  $4,6 \cdot 10^{-6}$  V feszültséget produkál  $1 \text{ W/m}^2$  besugárzás egységként, emiatt ehhez egy 1000-szeres jelerősítőt építettünk, hogy az adatgyűjtővel pontosabban tudjunk mérni. A pyranometer az egyik napelem modul keretére van erősítve, így együtt mozog a napelemekkel, tehát pontosan azt a besugárzás értéket adja vissza, ami a modulok felületét is éri.

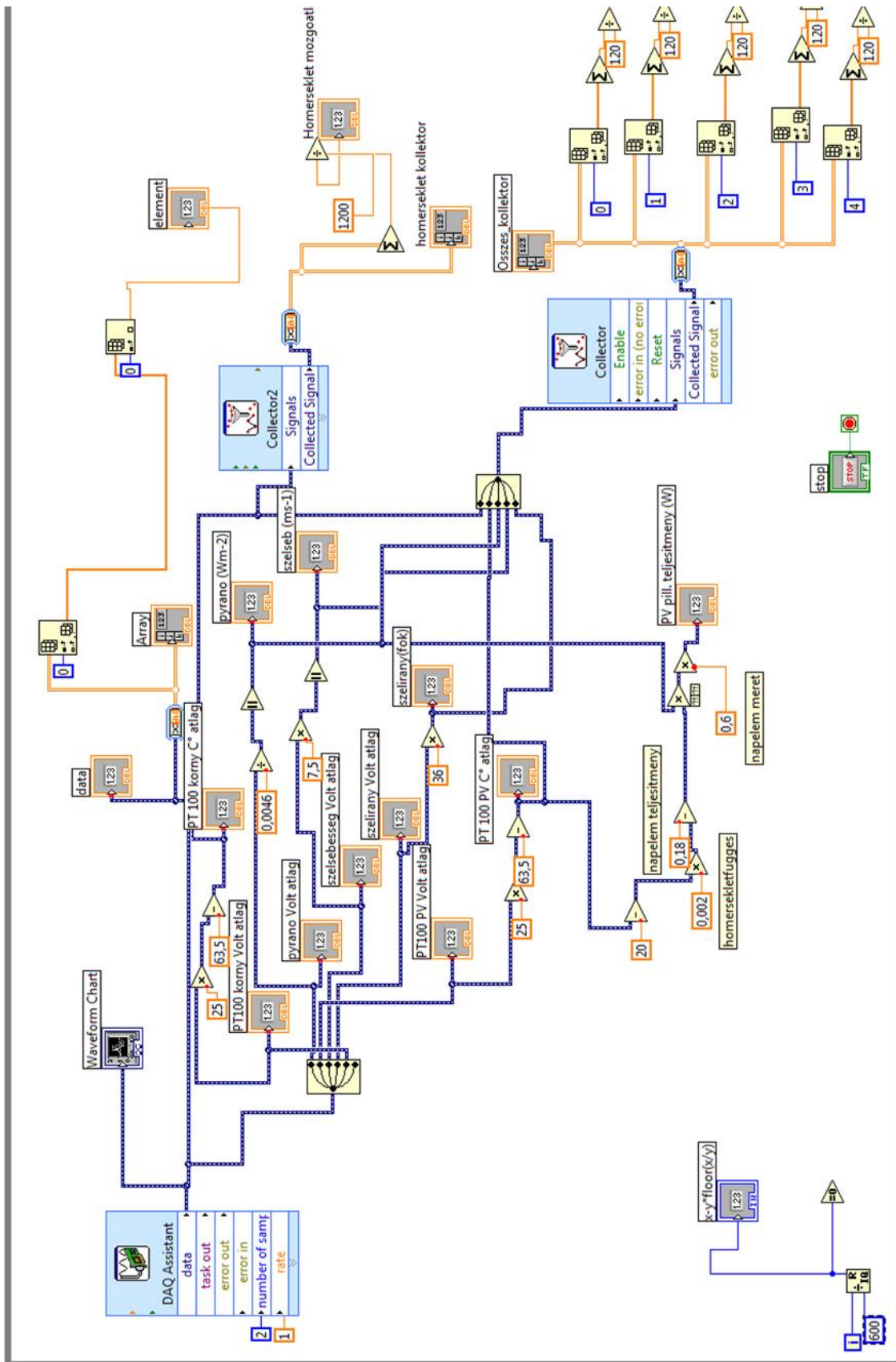
A pyranometert a Szent István Egyetem Fizikai és Folyamatirányítási Tanszékén kalibráltuk (Kocsis et al., 2005).

### 3.4.3. Az alkalmazott adatgyűjtő algoritmusok

Az USB-6008 adatgyűjtőt usb kábelen csatlakoztatjuk a számítógéphez. Ha a kezelőprogram telepítve van, az eszköz közvetlenül a LabView-ből elérhető, programozható. A DAQAssistant segítségével beolvashatók a csatornák, azaz az egyes szenzorok feszültségértékei. Az adatgyűjtő felhasználói felülete az 53., működésének folyamatábrája pedig az 54. ábrán látható.



53. ábra. Az adatgyűjtő felhasználói felülete



54. ábra. A mérőrendszer folyamatábrája

A LabView egy speciális dinamikus adattípust (dynamic data) használ, amely tartalmazza a kiolvasás időpontjának időbélyegét is, így nagyon egyszerű a kezelés, mert a fájlba írásnál ezt is automatikusan kiírja.

Esetünkben tíz perces mozgóátlagot számolunk minden értéknek és ezeket tízpercenként írjuk ki a fájlba. Így a mérési tapasztalatok a standardnak megfelelően összehasonlíthatóak egymással (Kim et al., 2011).

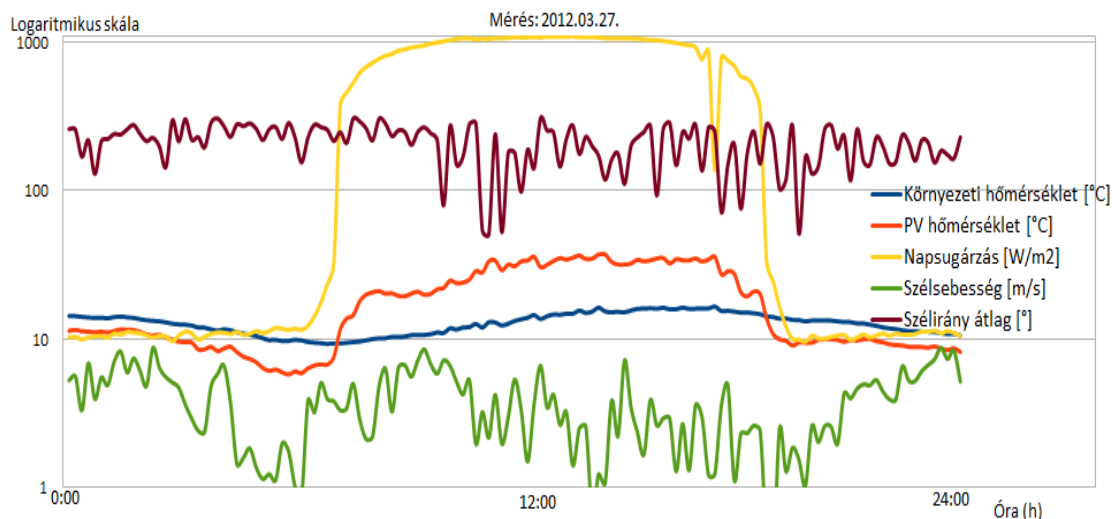
A fájlba a következő formában kerülnek kiírásra az adatok:

```

LabVIEW Measurement
Writer_Version 0.92
Reader_Version 1
Separator Tab
Multi_Headings Yes
X_Columns Multi
Time_Pref Relative
Operator Pollack Solar
Description POLLACK SOLAR ADATGYUJTO
Date 2012/02/02
Time 19:39:13,905999
Date 2012/03/27
Time 16:53:46,592999
X_Value Comment
korny-homers 16.134546
PV-homers 27.536265
pyrano 848.160808
windspeed 6.011510
wind direction 293.773284

```

Egy egynapi mérési adatsort példaként az 55. ábrán láthatunk.



55. ábra. A 2012. március 27-én mért adatok logaritmus skálán megjelenítve

### 3.5. A PV/T modulok működési hőmérsékletének számítása

A fotovillamos modulok vizsgálatához használt hőáramhálózatos modell, a PV/T kollektorok szerkezetének megfelelő csomópontokkal kiegészítve és identifikálva, alkalmas az ilyen jellegű modulok hatásfokának számítására is.

A vizsgált PV/T modult a Micro heat-pipe technologies nevű kínai vállalat gyártotta és egy szabadalmaztatott (Zhao et al., 2008) HeatRuler nevű anyagot használ hővezető anyagként. Így nem a hagyományos PV/T-vel van dolgunk (ahol a csőkiyó vezeti el a hőt az abszorber hátoldaláról), hanem a HeatRuler sávok, amely egy mikro csöves alumínium lapos profil, melynek kiemelkedő tulajdonsága a gyártó által megadott 1 000 000 W/mK hővezetési együttható. Egyéb tulajdonságok a hővezető anyagra vonatkozóan a gyártó által a 14. táblázatban vannak megadva.

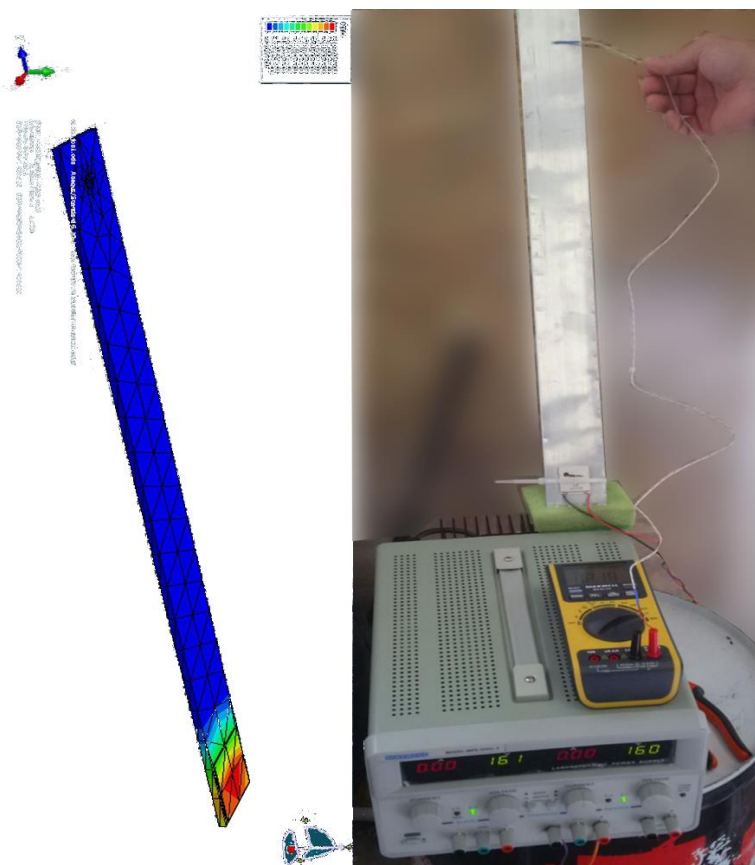
## 14. táblázat. Az MHP struktúra gyártó által megadott fizikai tulajdonságai

Anyag	Alumínium
Struktúra	Kapilláris csövek (mikro csövek)
Hővezetés	1000000 W/mK
Izoterma	<1 K/m
Működési hőmérséklet	-120 °C – 180 °C
Maximális termikus fluxus sűrűség	100-200 W/cm <sup>2</sup>

## 3.5.1. Az MHP anyag hővezetésének meghatározása

A gyártó a hővezetésnek valószerűtlenül magas értéket ad meg, ezért ezt mérésrel ellenőriztük. Egy ismeretlen anyag hővezetését egyszerűen, egy ugyanolyan geometriájú ismert hővezetésű anyaggal összehasonlítva lehet mérni, ha ugyanakkora hőteljesítményt közlünk mindkét anyaggal, továbbá minden egyéb körülménynek is azonosnak kell lennie. Az MHP anyag hővezetését 50 °C körül érdemes vizsgálni, mivel ezeknél a kollektoroknál a méréseim alapján ez egy tipikus érték.

A tesztanyagot (egy hővezető sávot) egy modulból szereltük ki, amelynek dimenziói 50 mm\*500 mm\*5 mm, tehát egy téglalap keresztmetszetű sáv. A hőközlés egy Peltier elemmel történt (típus: QC-127-1.4-8.5MD), amelynek ismert a karakterisztikája, így pontosan beállítható a kívánt hőmérséklet; 12 V-on (professzionális labortáppal beállítva) a cella 65 W-ot közöl a hővezető anyaggal. A Peltier elem 40\*40 mm felületen érintkezik az MHP vezetősávval (56. ábra).



56. ábra. A HeatRuler sáv szimulációja és mérése

Nehézségbe ott ütköztünk, hogy pontosan ilyen méretű, ismert hővezetésű anyagot nem tudtunk beszerezni. A hővezetést nagyon biztosan tudjuk számolni/szimulálni homogén anyagok esetén (Garbai, Bánhidi, 2001), így az ugyanilyen méretekkkel a mérésnek megfelelő körülmények közt az Abaqus végesesemes szoftverrel készítettünk egy szimulációt tiszta alumínium anyaggal

(hővezetési tényező: 237 W/mK, hőkapacitás: 0,88 KJ/kgK, sűrűség: 2700 kg/m<sup>3</sup>). A mérési kontrollpont hőmérséklete és a szimulációban ugyanazon pont hőmérsékletének különbségéből számítható az MHP hővezetése.

A hővezető anyagot különböző szögekben is vizsgáltuk, mivel a heat pipe rendszernek köszönhetően ez változhat. A mikrocövekben ideálisan a kondenzáció miatt függőlegesen működik a legjobban az effektus, viszont a napelemek 45°-tól akár 21°-ig bedöntve vannak felszerelve.

A 3 mérés alapján 45°-os döntésnél a kontrollpont hőmérséklete átlagban 46,4 °C-ot vett fel. A szimuláció alapján a kontroll pont hőmérséklete mindössze 3,2 °C-kal emelkedett a 20 °C-os környezeti hőmérséklet fölé. Így az összehasonlítás alapján az MHP hővezetése az alumíniuménak 8,25-szorosa, azaz 1955,25 W/mK. Függőleges helyzetben ez az érték magasabb valamivel: 2140,4 W/mK, mivel  $\Delta T=28,9$  °C.

Nyilvánvaló, hogy bizonyos körülmények között a hőmérséklet magasabb is lehet. Mivel nem ismert az MHP-ban dolgozó közeg forráspontja, ezért csak a PV/T modulokhoz hasonló körülmények között vizsgáltuk. Fontos továbbá megjegyezni, hogy a mérés tájékoztató jellegű volt, a megadott adatok ellenőrzésére és az alkalmazásra érvényes hővezetési értékek hozzávetőleges meghatározására irányult.

### 3.5.2. A PV/T modulok hőáramhálózatos modellje

Az MHP PV/T modulok szerkezetének megfelelő hőáramhálózatos modell vehető alapul majd az energiatermelési szimulációk végzésére alkalmas modell felállításához azért, hogy egzakt módon lehessen számolni a PV/T celláinak hőmérsékletét.

Ebben az esetben a csomópontok (a 47. ábra alapján kiindulva) és ennek megfelelően az anyagjellemzők az MHP és a hátoldali szigetelés adataival bővülnek (15. táblázat), és figyelembe vesszük a hűtőközeg áramát a számításhoz. A megoldáshoz a 3.32 összefüggés használható.

15. táblázat: A PV/T kollektor anyagjellemzői

Anyag	Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	Hővezetés (W/mK)	Fajhő (J/kgK)	Rétegvastagság (mm)
üveg fedés ( $N_g$ )	2580	0,98	79	3
beágyazó réteg ( $N_{ei}$ )	939	0,23	1926	0,5 (2 rétegben)
szilícium ( $N_{si}$ )	2730	144	712	0,4
hátoldali védőréteg ( $N_b$ )	150	0,36	1200	1
MHP	2700	1955,25	880	5
szigetelés	100	0,3	1120	30

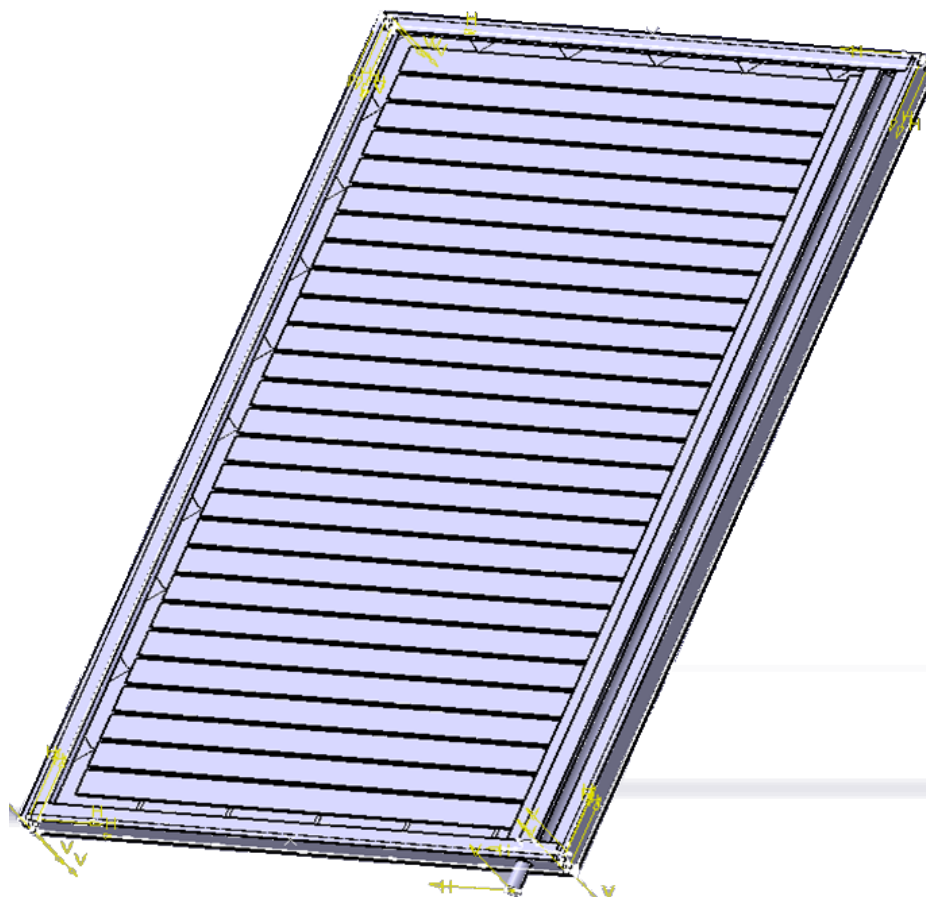
A hőáramhálózatos modellt leíró egyenlet elemei a 25. és 26. táblázatban (4.3. pont) láthatók, így az anyagjellemzők és a hőáramhálózatos modell csomópontjai alapján meghatározott hővezetési- (G) és hőkapacitás (C) értékei. A CAD modell létrehozásához és a szimulációhoz szükséges jellemzőket a 16. táblázat és mérések alapján adtuk meg.

16. táblázat: A PV/T kollektor gyártó által megadott jellemzői:

Hossz	1650 mm
Szélesség	990 mm
Vastagság	50 mm
Tömeg	40 kg
Hasznos felület	1,5 m <sup>2</sup>
Kimenő folyadék hőmérséklet	43 °C
Termikus hatásfok	40%
Hőmérsékleti együttható	-2,8 %/ °C



A „HeatRuler® a PV modulok hátoldalának hűtésére használható (57. ábra), ami növeli a fotovillamos hatásfokot. Indirekt folyadékös vagy levegős hűtéssel a napelem hőmérséklete tartósan 50 °C alatt tartható, ami 10-20%-kal növeli a hatásfokát. Mesterséges folyadékkeringetéssel le lehet vinni a hőmérsékletet 42 °C alá, ami akár 20-30%-os PV teljesítménynövekedést okozhat, úgy hogy közben a termelt hő is felhasználásra kerülhet.”



57. ábra. A PV/T kollektor 3D CAD modellje (hátnézet a HeatRuler sávokkal)

A PV/T kollektorok vizsgálatához elengedhetetlen a működés megismerése. Ennek érdekében a szerkezet megismerése után a teljes modulról 3D-s modellt készítettünk, hogy termikus szimulációnak vethessük alá (57. ábra).

A hőtani szimuláció segítségével megismerhetők a hőátadási folyamatok a szerkezeten belül, így akár javaslat tehető a szerkezeti fejlesztésre. A mérések és a szimuláció eredményei a 4.4-es pontban találhatóak.

Az eszköz szerkezete:

A PV modul Tedlar anyagára egy HeatRuler sávokból álló hővezető-hőgyűjtő részt szereltek, amely a panel hátoldali felületéről begyűjti az abszorbeált hőt, azt pedig a hőgyűjtő egység felé vezeti. A 27 darab lamella lefedi a panel hátsó traktusát (58. ábra), ami az ott létrejövő hőveszteséget próbálja csökkenteni a panel hűtésével együtt.

A hőgyűjtő feladata tehát a HeatRuler sávokból érkező hő tárolása és továbbadása a hozzá csatlakoztatott vizes rendszernek.

A síkkollektorok elülső részén dupla üvegezést alkalmaznak általában gázfeltöltéssel, itt csak egy réteg van, továbbá a PV szerkezet a beágyazóréteggel, a Si cellákkal és a Tedlar hordozóval, de ezek hővezetése jóval nagyobb hagyományos kollektorokénál. Így a PV/T esetében az elülső oldali hőveszteségek sokkal nagyobbak, míg a hátoldalon is csak részleges a szigetelés.

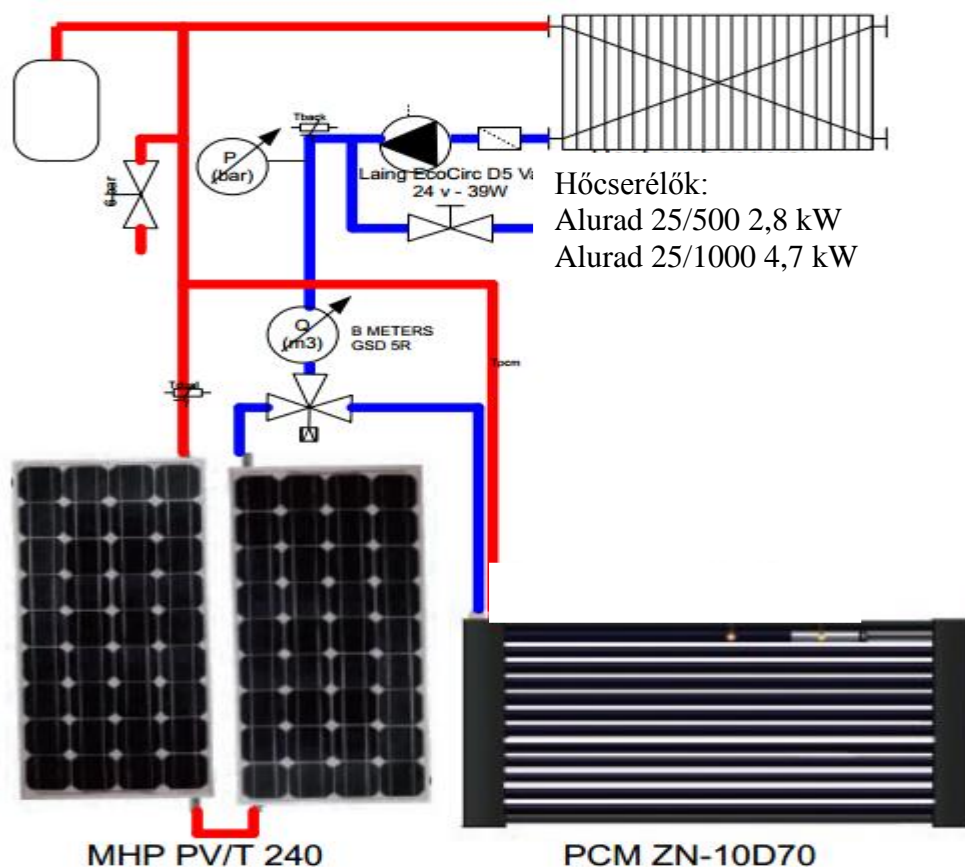


58. ábra. A PV/T modul hátulja a szigetelés nélkül

### 3.5.3. A PV/T modulok mérése

A méréseket kétféle kollektorra végeztük el. A hidraulikai rendszer a PV/T és a PCM (phase changing material) kollektorok esetében közös (59. ábra, 60. ábra)), ez azt is jelenti hogy vagy egyik, vagy másik működik egy időben.

Mivel a PCM kollektor jelentős hőtároló kapacitással rendelkezik, ezért azt elégséges akkor üzemeltetni, ha a benne tárolt energiamennyiség megközelítette a használható maximumot. Ez megfelel a valós felhasználási módjának, hiszen a használati melegvíz kivétele is szakaszos.



59. ábra. A mérési rendszer hidraulikai kapcsolása



A mérési rendszer úgy lett megtervezve, hogy az aktív alkatrészek így a keringető szivattyú és a kétútú szelep mozgatója 24 V-ról működjön, mivel így a teljes rendszer külső energiaforrást nem igényel, mert a 24 V-os akkumulátorról kapja a tápellátást, azaz közvetve a napelemekről működik. A szabályozás alapja a két PT1000 hőellenállás, amelyek merülő hüvelyekben vannak elhelyezve a kollektorok kimenetén. Ha ezekben a pontokban a folyadék hőmérséklet elér egy bizonyos szintet, akkor bekapcsol a szivattyú és a levegős hőcserélőkben keringeti a folyadékot.

A hőcserélők úgy lettek méretezve, hogy mindenkor elegendő hőleadó teljesítményt biztosítsanak a rendszernek. Mivel összteljesítményük 7,5 kW (80 °C fűtővíz és 20 °C környezeti hőmérséklet esetén), ezért a PCM kollektor névleges hőtároló kapacitását ( $W = 20 \text{ MJ} = 5,55 \text{ kW}$ ) hozzávetőlegesen 45 perc alatt le tudja adni. A PV/T esetében a gyári adatok alapján a termikus hatásfok 40% körüli, ez azt jelenti, hogy a  $2 \times 1,5 \text{ m}^2$  hőelnyelő felület 1000 W/m<sup>2</sup> besugárzás esetén 1200 W hőteljesítményt ad le.

A hőmennyiségek mérésére a visszatérő oldalon lett elhelyezve egy további PT100 hőérzékelő és sorban utána egy hitelesített átfolyásmérő impulzus kimenettel.

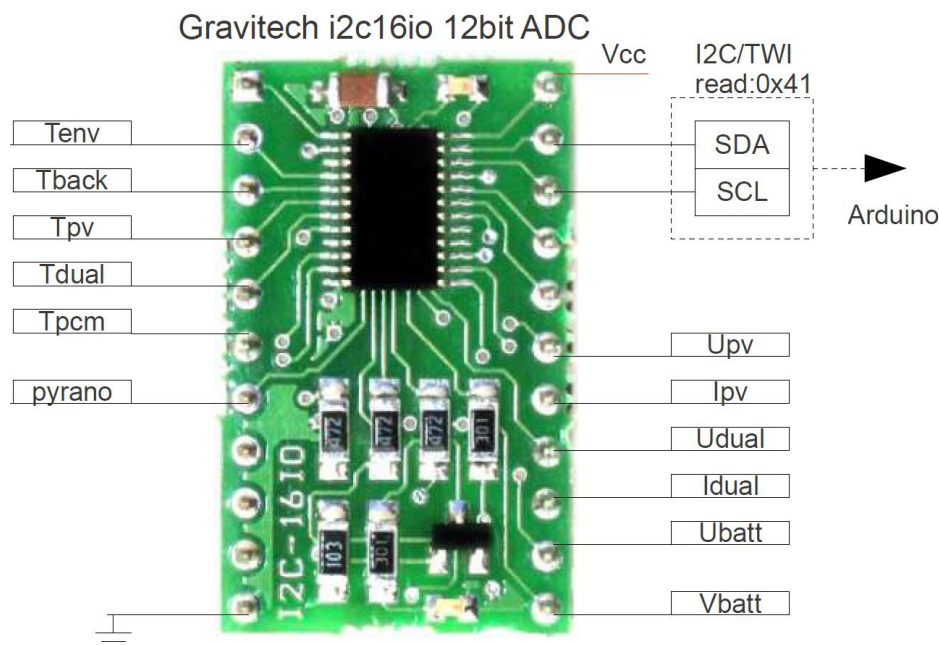


60. ábra. A mérési rendszer a PV/T kollektorokkal (középen), az UlicaSolar (jobbra) napelemekkel és a PCM kollektorral

A szabályozás:

A teljes szabályozási kör rajzát az M4. melléklet tartalmazza. Az átfolyás mérő által küldött impulzusokat közvetlenül mértük egy Arduino mikrokontroller digitális bemenetén, míg a hőmérsékleteket, a feszültséget, az átfolyó áramot és a pyranométer feszültségét egy 12 bites A/D konverteren (61. ábra) keresztül, amely i2c buszon kommunikál a szabályozóval.

A szabályozás nem hőmérséklet-különbség ( $\Delta T$ ) alapú ahogy az ilyen rendszereknél megszoktuk (mivel nincs puffertartály és mert csak a hőmennyiségeket mérjük), hanem amikor a rendszer elér egy hasznos hőmérsékletet, akkor kapcsoljuk az aktív elemeket (szivattyú, szelep). Ez a hőmérséklet a PV/T esetében 45 °C, a PCM kollektor esetében 95 °C. Bár a konvencionális kollektorok esetében már 30-35 °C-os kollektor-hőmérsékletnél is bekapcsolhat a rendszer, itt azt vettük észre, hogy a túl alacsony hőmérsékletű indítás a rendszer kibekapcsolgatását eredményezi a PV/T alacsonyabb hatásfoka és a nagyobb hőveszteségek miatt.



61. ábra. Az ADC bemenetei a naplózás szerinti megnevezéssel

Alapvetően a PV/T kör működik, mivel a PCM rendszernek jelentős tehetetlensége van a nagy hőkapacitás miatt, de ha az eléri a 95 °C-ot, akkor le kell hűteni. A hűtési folyamat lehetőség szerint zavartalanul megy végbe egészen addig, amíg a rendszer 40 °C-ra vissza nem hűl. Egyetlen esemény szakíthatja meg a PCM hűtési folyamatot, mégpedig ha a PV/T hőmérséklete eléri a 100 °C-ot, mivel itt már a rendszerben a hőcserélő folyadék felforrhat, így ez védelmi szempont. A gyakorlatban viszont ilyen esemény nem fordult elő, mivel a PV/T kollektornak nagyok a hővesztései. A maximális hőmérséklet amit naplózott a rendszer az 72,03 °C volt, 2014. július 16-án 12:55-kor.

A rendszer logikai kapcsolása a következő:

```
KAPCSOLÓ=1; //global variable
ESET 1
HA (PVT>45 ÉS PCM<95, AKKOR SZIVATTYÚ=BE ÉS SZELEP=BE, HA (PCM>=95,
AKKOR SZIVATTYÚ=BE ÉS SZELEP=KI ÉS KAPCSOLÓ=2, EGYÉBKÉNT SZIVATTYÚ=KI ÉS
SZELEP=KI );
ESET 2
SZIVATTYÚ=BE;
SZELEP=KI;
HA (PCM<40 VAGY PVT>120, AKKOR KAPCSOLÓ=1);
```

A kontroller feladata az adatgyűjtés is és mivel a rendszer nem igényel gyors beavatkozást (vagyis van idő extra számítások elvégzésére), a kiértékelés egy része is. A kontroller egy SD kártyára írja az adatokat „txt” formátumban az egyes oszlopokat szóközzel elválasztva, ami így egyszerűen beolvasható Excel-be. Az adatgyűjtés miatt egy valós idejű óra (RTC – real time clock) is csatlakoztatva lett a rendszerre, aminek külön gombakkumulátor szolgáltatja a tápforrást.

A mentett adatok a következők:

*DÁTUM; IDŐ; T<sub>back</sub>; T<sub>pcm</sub>; T<sub>pvt</sub>; T<sub>env</sub>; V – Liter (átfolyás); Rendszerállapot (X, D, P); I<sub>pyrano</sub> (W); U<sub>pv</sub>; I<sub>pv</sub>; U<sub>pvt</sub>; I<sub>pvt</sub>; U<sub>batt</sub>; V<sub>batt</sub>; Q<sub>hő</sub>*  
ahol *T<sub>back</sub>* a visszatérő hőmérséklet a hőcserélő után mérve,  
*T<sub>pcm</sub>* a PCM kollektor hőmérséklete,  
*T<sub>pvt</sub>* a PV/T kollektor hőmérséklete,

$T_{env}$  a külső környezeti hőmérséklet,

$V$  a szivattyú által megforgatott hűtőközeg térfogata (liter),

Rendszerállapot X ha minden kikapcsolva, D ha a PV/T működik (a DUAL elnevezés után), P a PCM kör indikátora,

$I_{pyrano}$  (W) a napsugárzás teljesítménye a kollektorok síkjában mérve,

$U_{pv}$  és  $I_{pv}$  a referencia napelem feszültsége és árama, amit az MPPT vezérlő állít be,

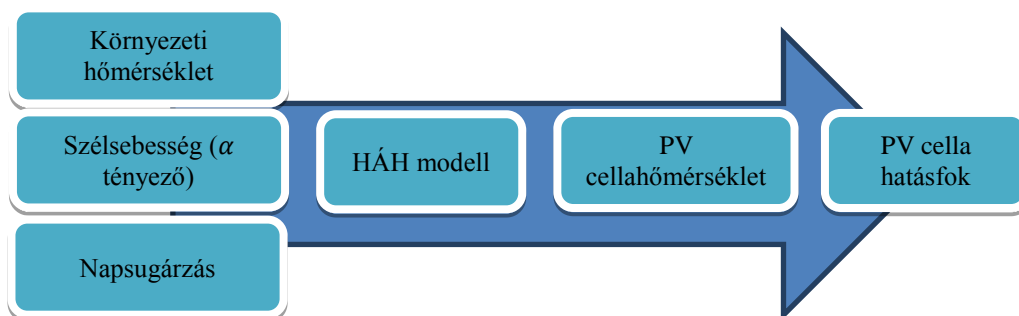
$U_{pvt}$  és  $I_{pvt}$  a PV/T napelem részének feszültsége és az átfolyó áram,

$U_{batt}$  és  $I_{batt}$  az akkumulátor aktuális feszültsége és a fogyasztók felé kimenő áram.

Az értékek mentése az RTC alapján működik, minden egyes egész percben az adott perc összes mintájának (60 db) mozgóátlagát mentve, kivéve a folyadékmennyiség ( $V$ ) amely érték az adott perc végén mutatott állapotban kerül kiírásra. Így a folyadékmennyiség az adott percben a jelenlegi és az egyel azelőtti mentett értékek különbsége.

## 4. EREDMÉNYEK

A kutatás során kidolgoztam egy komplex vizsgálati módszert, amely alkalmas a napelemek celláinak hőmérsékletének számítására a környezeti jellemzők változása alapján (62. ábra). CFD számításokkal meghatároztam a ferde tetős, lapostetős és szabadon álló modulok esetében a hőátadási tényező változását a szélességgel arányban, így a hőáramhálózatos modellben a hőtranszport folyamatok a hőátadásra vonatkozóan változó értékkel számíthatóak. Így bemeneti oldalon megadott napsugárzási érték, környezeti hőmérséklet és a szélesség alapján – kiválasztva a telepítési módot – a hőáramhálózatos modellen alapuló komplex méretező rendszer számítja a cellahőmérsékletet és így számolható a modul aktuális hatásfoka a gyártó által megadott hőmérsékletfüggési-tényező felhasználásával. Ebben a fejezetben a mérési és számítási eredményeket ismertetem, amelyek során új tudományos téziseket lehet megfogalmazni.

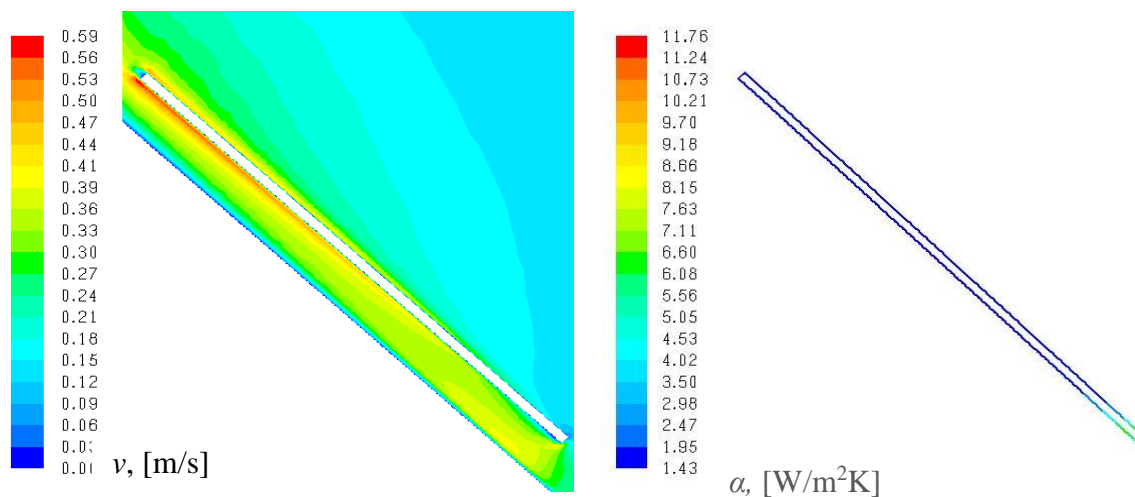


62. ábra. A számítási struktúra

### 4.1. A napelem modulok hőátadási tényezője

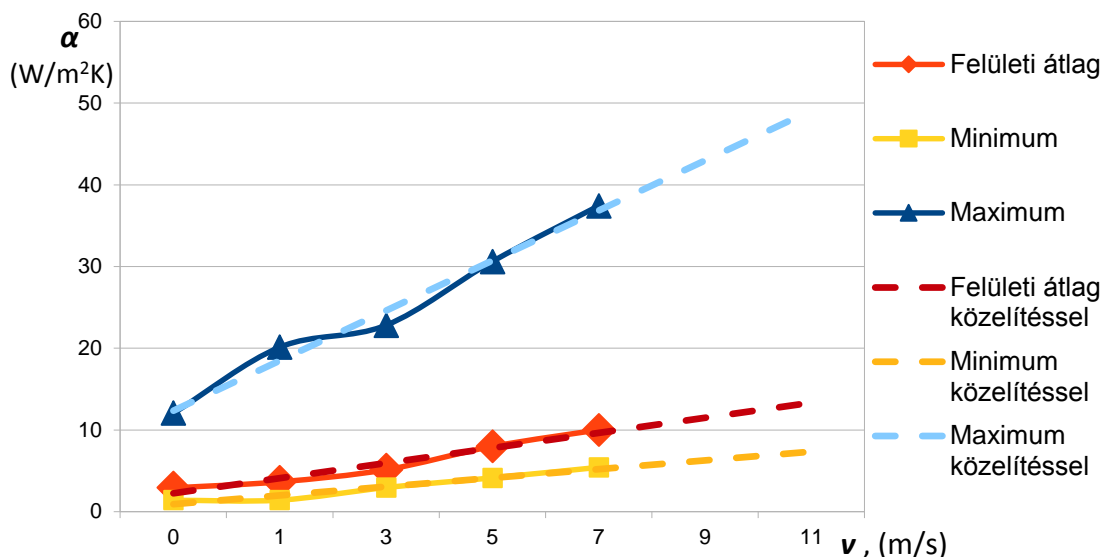
A komplex fotovillamos modellező rendszer alapja egy hőáramhálózatos modell, amelyben figyelembe vehetőek a napelem modulok konvekciós hőátadási folyamatai is. A 3.2 pontban ismertetett módon számítottam a napelemek szélesség függvényében változó felületi hőátadási tényezőjét. Szél hiányában a napelem környezetében természetes konvekció alakul ki, ha a modul hőmérséklete a környezeténél magasabb. Minden alapvető telepítési lehetőségre 0-7 m/s-ig végeztem áramlási szimulációt, hiszen a szél általi körüláramlás változik.

Az első esetben a ferde tetőre szerelt fotovillamos modult vizsgáltam és a számítások eredményeként meghatároztam az ilyen környezetben elhelyezett fotovillamos modul felületi hőátadási tényezőjét. A sűrűségkülönbség hatására meginduló konvektív áramlás legnagyobb értéke a ferde tetőre helyezett modul felső sarkánál tapasztalható  $v_{\max} = 0,58$  m/s, és ahogy a 63. ábrán is látható, míg a hőátadási tényező értéke az alsó részen a legmagasabb.



63. ábra. A légsebesség és a hőátadási tényező változása a modul körül ( $v_{be} = 0$  m/s)

A Nusselt-szám átlagértéke az egész felületre vonatkoztatva  $Nu = 120,24$ , míg a hőátadási tényező  $\alpha = 2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ . A továbbiakban ezen felületi átlagokat adtam meg, amelyek felhasználásra kerülnek majd a hőáramhálózatos modellben. Azt váránk, hogy a modul hossza mentén felgyorsuló légáramlás a hőátadási tényező értékét is növeli, de a lamináris áramlás és a kialakult határreteg miatt az  $\alpha$  értéke az alsó részen a legmagasabb. Az eredmények pontosítása miatt célszerű a modult a számítás szempontjából több rétegre osztani, de a szimulációs modellben egyszerűbb a felületi átlagot felhasználni. A 64. ábrán a hőátadási tényezőre vonatkozó számítási eredményeket láthatjuk, a minimum, maximum és átlagos értékekre vonatkozóan.



64. ábra. Ferde tetőre szerelt fotovillamos modulok hőátadási tényezői

A hőátadási tényező trendjét regresszióanalízissel (táblázatban „közelítéssel” néven) határoztam meg, amely során a következő közelítő egyenleteket kaptuk:

$$\alpha_{\text{átl-ferde-}\dot{E}}(v) = 1,85x + 2,93, \quad (4.1)$$

$$\alpha_{\text{min-ferde-}\dot{E}}(v) = 1,07x + 1,41, \quad (4.2)$$

$$\alpha_{\text{max-ferde-}\dot{E}}(v) = 6,12x + 12,05. \quad (4.3)$$

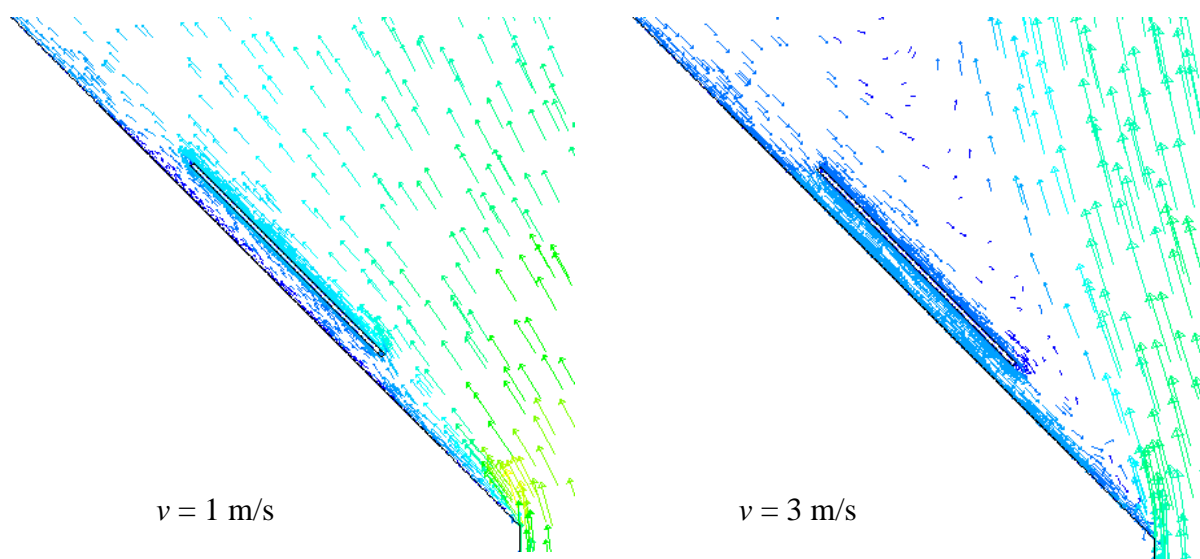
A részletes számszerű eredményeket ferde tető esetén az 17. táblázatban adtam meg.

17. táblázat: A hőátadási tényezők a ferde tető esetében

Szél-sebesség, (m/s)	Hőátadási tényezők, (W/m²K)					
	Felületi átlag	Minimum	Maximum	Felületi átlag, közelítéssel	Minimum közelítéssel	Maximum közelítéssel
0	2,93	1,41	12,05	2,25	0,93	12,36
1	3,66	1,43	20,13	4,10	2,00	18,48
3	5,14	2,95	22,81	5,95	3,07	24,60
5	7,98	4,13	30,60	7,80	4,14	30,72
7	10,00	5,40	37,41	9,65	5,21	36,84
9				11,50	6,28	42,96
11				13,35	7,35	49,08

A 64. ábrán a maximum és minimum értékek megjelenítésére azért került sor, mivel a maximum esetében jól látható a törés a linearitásban, ami a szél hatására megváltozó áramlási irány miatt jön létre. Tulajdonképpen az 1 és 3 m/s szélsébségek között a szél által generált áramlás

„legyőzi” a természetes konvekció hatását és ezután a levegő lefelé áramlik a modul mögött, ahogy az a 65. ábrán látható.



65. ábra. Az áramvektorok a ferde tetőre szerelt fotovillamos modulok esetén északi szélben

Lapostető esetében két modul került elhelyezésre a tetőn. Az egyik a ház tetejének az északi, a másik a déli oldalán, míg az áramlási tér mérete az előzőekkel azonos. A 18. táblázatban és a 66. ábrán látható a modulok átlagos hőátadási tényezője és azok alakulása a szélesség függvényében.

18. táblázat: Az átlagos hőátadási tényezők értéke a lapos tetőre szerelt modulok esetén

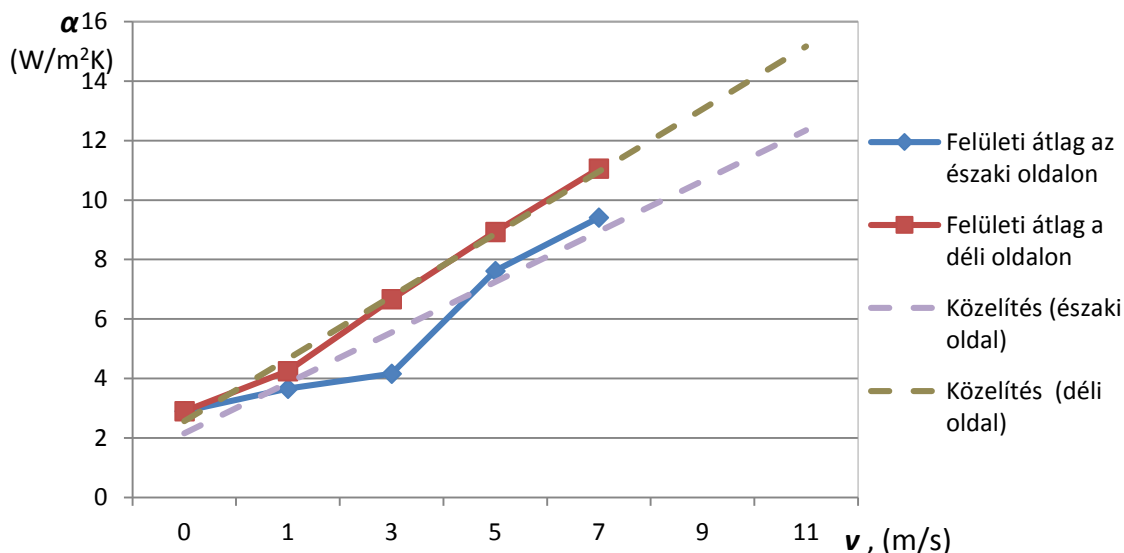
Szélesség, (m/s)	Hőátadási tényezők, (W/m <sup>2</sup> K)			
	Felületi átlag az északi oldalon	Felületi átlag a déli oldalon	Közelítés (északi oldal)	Közelítés (déli oldal)
0	2,91	2,91	2,15	2,56
1	3,67	4,25	3,85	4,66
3	4,16	6,67	5,55	6,76
5	7,62	8,93	7,25	8,86
7	9,41	11,06	8,95	10,96
9			10,64	13,06
11			12,34	15,16

Az északi oldalon hasonló jelenség figyelhető meg mint a nyeregtetős ház esetében, vagyis az áramlási irány megváltozik 1 és 3 m/s szélesség tartományban. A (4.4) és (4.5) összefüggések a két eset közelítő függvényét adják meg, melyek alkalmasak a későbbi felhasználásra a hőáramhálózatos modellben, mivel a független változó itt is a szélesség:

$$\alpha_{\text{lapos-É}}(v) = 2,3 v + 2,91, \quad (4.4)$$

$$\alpha_{\text{lapos-D}}(v) = 2,17 v + 2,91. \quad (4.5)$$

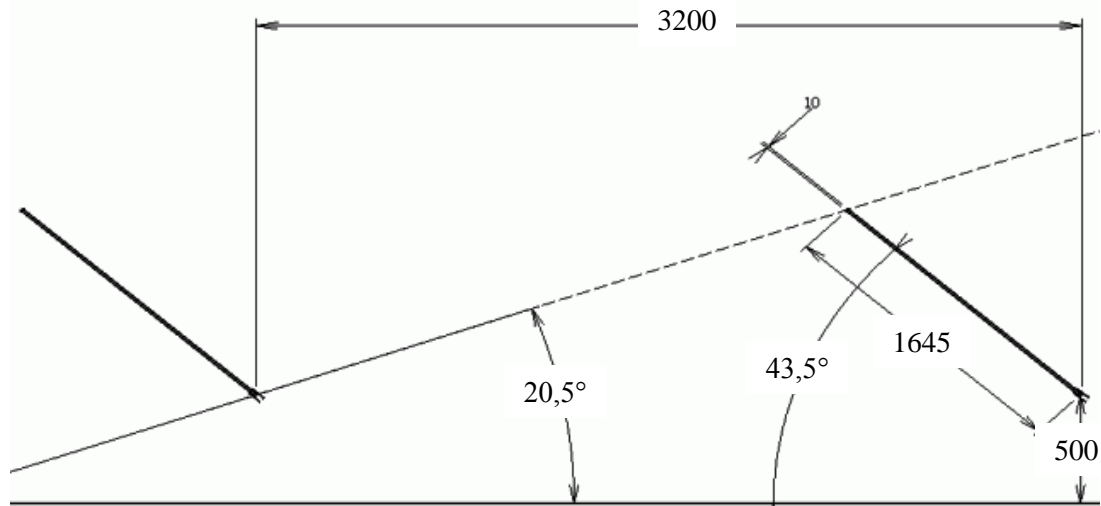




66. ábra. Lapostetőre szerelt fotovillamos modulok átlagos hőátadási tényezőjének alakulása a szélesség függvényében

A továbbiakban megvizsgáltam a szabadon álló modulok hőátadási tényezőit is. Szabadon álló modulok általában naperőműveknél fordulnak elő, ahol nagy mennyiségű (akár MWp nagyságrendű) PV hálózatot helyeznek el kialakított szisztéma szerint. A modulok ebben az esetben 50 cm-re helyezkednek el a talajtól, dőlésszögük 43,5 fok (Pécs a 46,5. szélességi fokon helyezkedik el). Egyéb méretek a 67. ábráról leolvashatók.

A modulok távolsága fontos tényező, mivel a téli beesési szög esetében sem árnyékolhatják egymást. Ennek megfelelően a távolságuk 3,2 m egymástól.



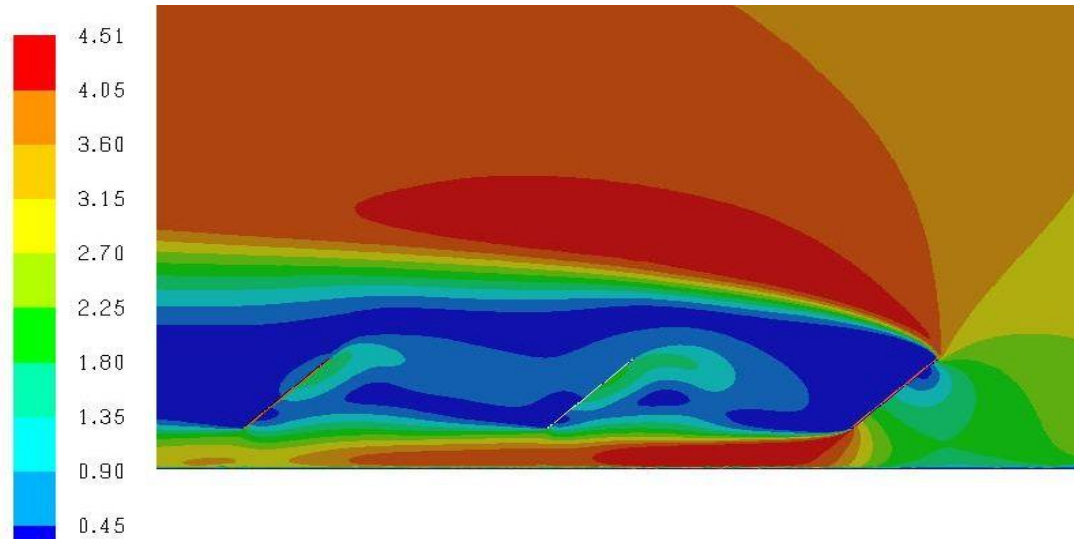
67. ábra. Az áramlási tér egy része a CAD modellben

Az eredmények alapján a Nusselt-szám felületi átlaga ebben az esetben az összes modulra vonatkozóan  $Nu = 120,2453$ , 0 m/s szélesség esetén.

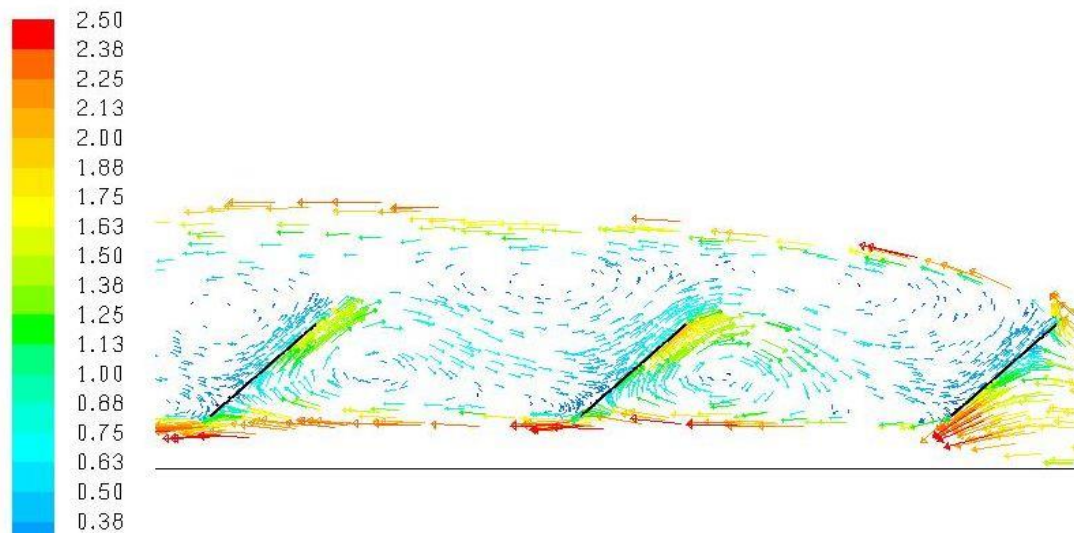
A szabadon álló modulok esetében a szélárnyék hatásnak van nagy szerepe és ez természetesen befolyásolja a hőátadási tényezőt. Míg a szélirány szerinti első modulnak nagy a kitétsége, addig a többinek jóval kisebb, ahogy az a 68. ábrán látható, viszont az első modul örvényeket is generál, ami előnyös hatással lehet a hűtésre (69. ábra).



A szélirány szerinti első modulnál 3 m/s szélességnél annak az elülső oldalánál a szélesség kisebb, mint ( $v_{szél} < 0,45$  m/s). Ez az NPV3 jelzésű modul a táblázatokban, itt tehát az elülső oldal hőleadása alacsonyabb, de ez a hátoldal nagyobb értéke miatt összességében kiegyenlítődik.



68. ábra. A szélesség kontúrok északi, 3 m/s szél esetén



69. ábra. Az áramvektorok a sebesség szerint színezve 3 m/s északi szélnél

A hőátadási tényezők értékei szabadon álló modulok esetében az alábbi táblázatban láthatók.

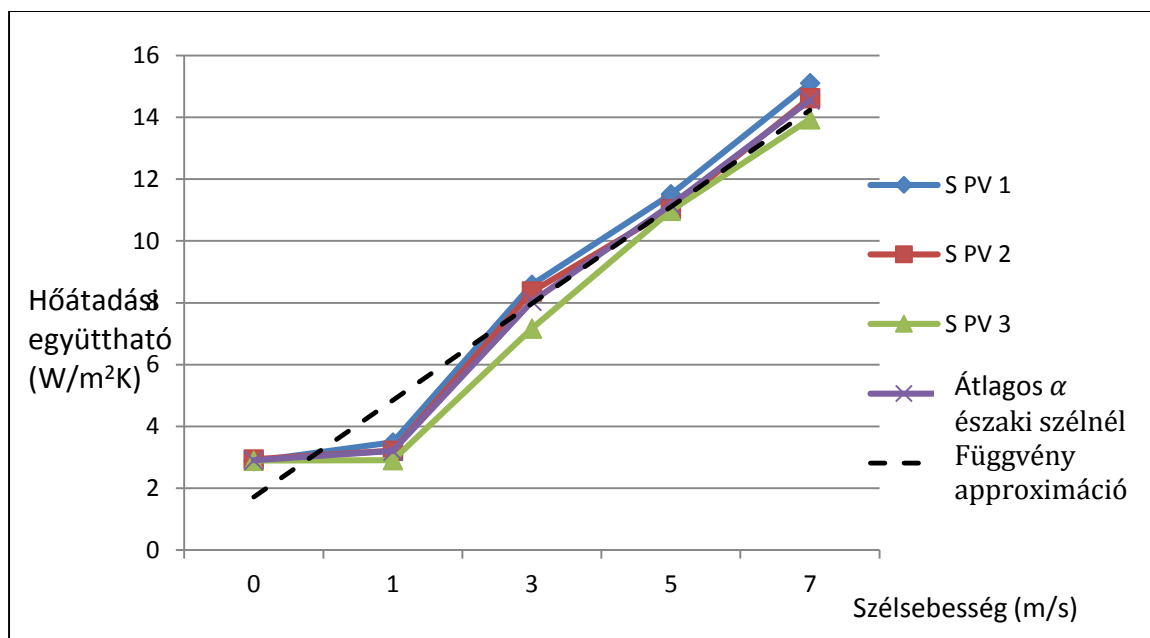
19. táblázat: A hőátadási tényezők változása a szélesség függvényében (déli szél)

Szélesség (m/s)	Hőátadási tényezők ( $\alpha$ , W/m <sup>2</sup> K)			
	S PV 1	S PV 2	S PV 3	átlag
0	2,87	2,93	2,89	2,90
1	3,48	3,21	2,90	3,20
3	8,59	8,36	7,17	8,04
5	11,51	11,02	10,98	11,17
7	15,11	14,62	13,94	14,56

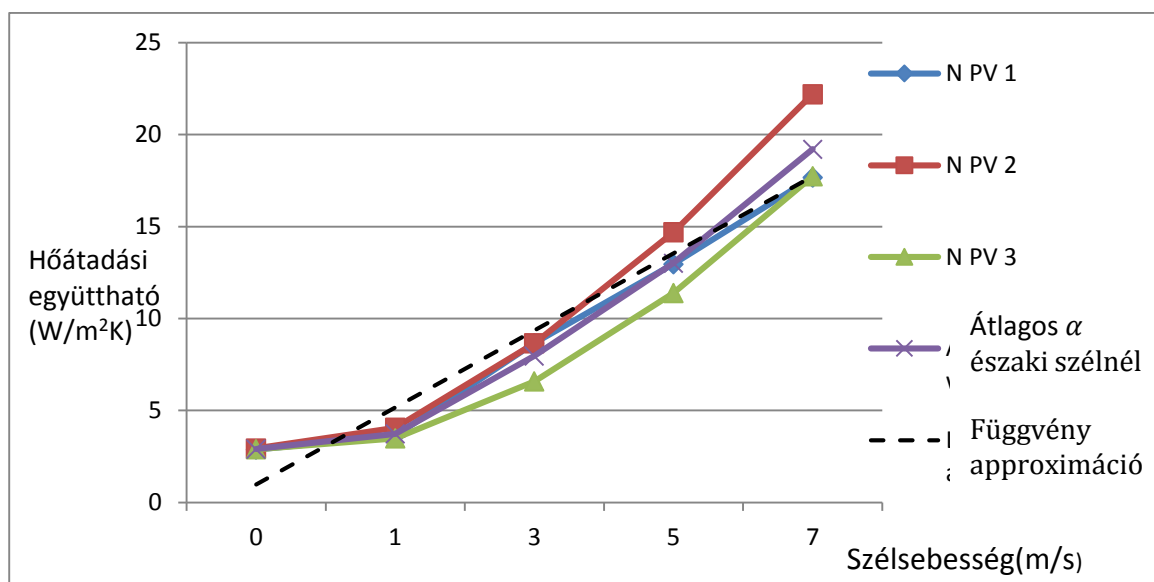
20. táblázat: A hőátadási tényezők változása a szélesség függvényében (északi szél)

Szélesség (m/s)	Hőátadási tényezők ( $\alpha$ , W/m <sup>2</sup> K)			
	N PV 1	N PV 2	N PV 3	átlag
0	2,88	2,93	2,89	2,90
1	3,62	4,06	3,49	3,73
3	8,66	8,65	6,59	7,97
5	12,96	14,69	11,39	13,01
7	17,68	22,20	17,73	19,21

Mindkét esetben a hőátadási tényezők modusra vetített átlagát véve láthatjuk a trendvonalakat a 70. és 71. ábrán, továbbá a trendvonalak lineáris függvényeit a (4.11) és (4.12) összefüggések formájában.



70. ábra. A számítási eredmények és a trendvonal déli szél esetén

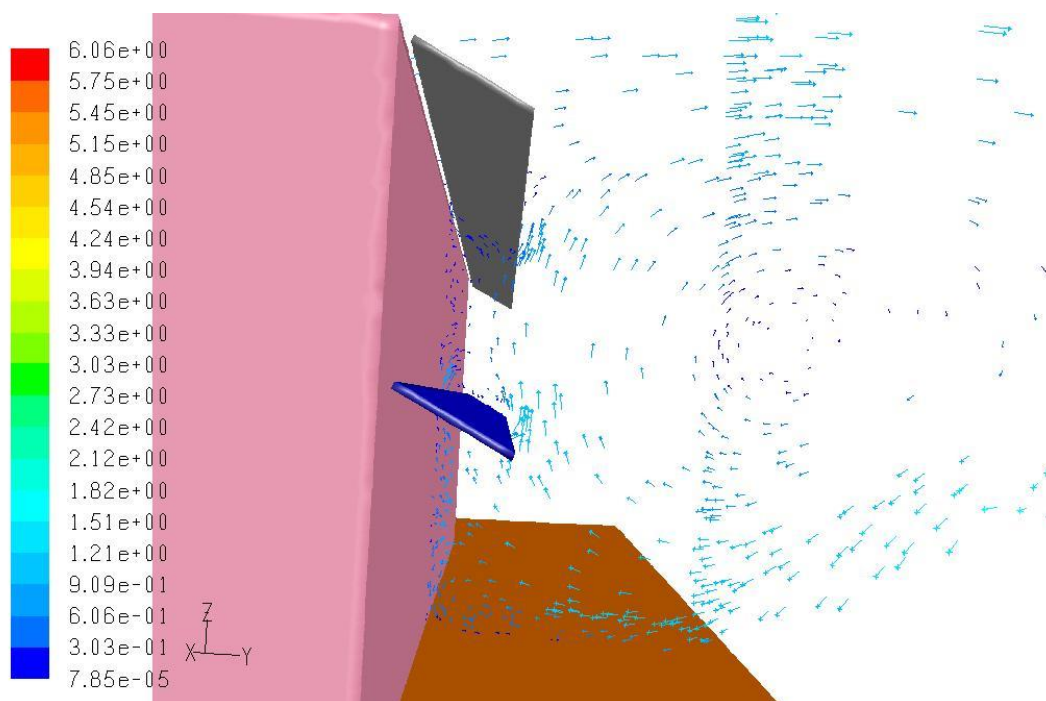


71. ábra. A számítási eredmények és a trendvonal északi szél esetén

A szimulált és a lineáris egyenlettel számított értékek maximális eltérése 7 m/s-nál 7,8%.

A fotovillamos modulok hőátadási tényezőjének vizsgálata kapcsán kidolgoztam, illetve implementáltam egy olyan módszert, amellyel jó közelítéssel meghatározható a hőátadási tényező. Mindez szélcsatorna mérésekkel lett alátámasztva. A szakirodalom alapján a számított értékek, hasonlóságot mutatnak Moshfegh és Sandberg (1998) méréseivel, ahol egy fémlap körüli áramlást vizsgáltak. Fontos, hogy a számítás parametrizálható, így változtatható a környezet és a modulok hőmérséklete, továbbá vizsgálható a kényszerkonvekció hatása is, ami esetünkben a szél hűtő hatására vonatkozhat. Hasonlóképpen számíthatók egyéb tipikus elhelyezési módok, mint például a tetőtől való távolság, amely javíthat a körüláramlás minőségén.

A homlokzatra szerelt modulok hőátadási tényezőjét valós környezetből vett (referenciaépület – 3.2.3-as pont) 3D modellen vizsgáltam (72. ábra).



72. ábra. A szélesség vektorok a szélesség szerint színezve 3 m/s északi szél esetén

Ebben az esetben az eredmény szerint a (4.6) és (4.7) egyenletben meghatározott egyenleteket kaptam.

Homlokzatra szerelt modulok esetén a hőátadási tényezők:

$$\alpha_{\text{átl-homlokzat-É}}(v) = 1,75 v + 3,26, \quad (4.6)$$

$$\alpha_{\text{átl-homlokzat-D}}(v) = 0,96 v + 2,85. \quad (4.7)$$

A fotovillamos modulok hőátadási tényezője oldalszél esetén is változó. Ez esetben azonban nem szükséges vizsgálni a különböző épületek hatását, mivel ha a modulok síkjával párhuzamosak az áramlásvektorok, akkor azok az épület vonalát is ugyanúgy követik. Feltételezve, hogy a PV modulok pontosan a déli irányba vannak állítva a keleti és nyugati szél hatása azonos, mivel párhuzamosan éri a modulokat, továbbá az összes telepítési formára is egy képletet lehet alkalmazni, mivel oldalról nézve a ferde- és lapos tetőre telepített modulok is „szabadon” állnak.

Az oldalszél esetére a hőátadási együtthatók meghatározásához 3 dimenziós számítások szükségesek. Ezt egy valós környezetből vett modellel készítettem el a referenciaépület szimulációja kapcsán (lásd: 4.3.2. pont).

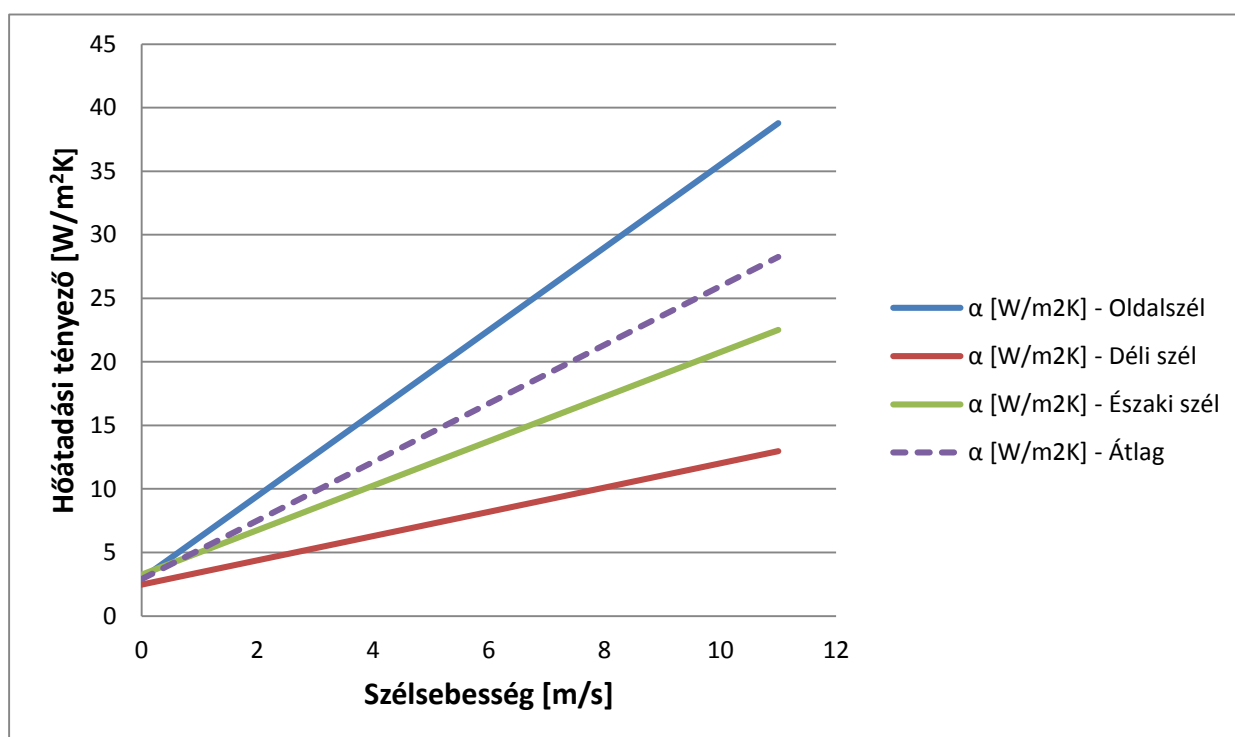
A korábban bemutatott szimulációk peremfeltételeinek alkalmazásával és számítási módja szerint határoztam meg oldalszélre a következő egyenletet:

$$\alpha_{\text{átl-oldalszél}}(v) = 3,26 v + 2,92. \quad (4.8)$$

Ebben az esetben sokkal egyszerűbb volt a regresszió elvégzése, mivel a hőátadási tényező értéke egyenesen arányosan növekszik a szélsébséggel, míg az észak-déli széliránynál a házak vagy az előtte-mögötte levő modulok módosítják az áramlást és örvényeket is okozhatnak.

A HÁH alapú PV szimulációs modellben a referenciaépületen elhelyezett napelemeket vizsgáltam, így a homlokzatra integrált napelem modulokra felírt egyenleteket kell használni, de mivel nem állt rendelkezésre megfelelő széliránygyakorisági adatsor, ezért végül a szélirányokra adódott egyenletek átlagát adtuk ott meg.

Ha ismert egy helyszín széliránygyakorisága – például a 28. ábra szerint, akkor súlyozott átlagot lehet számolni a képletek paramétereire, de itt az egyszerűség kedvéért a számtani átlagot vesszük az oldalszélre kétszeresen, mivel ez képviseli a Ny-i és K-i irányokat is (73. ábra).



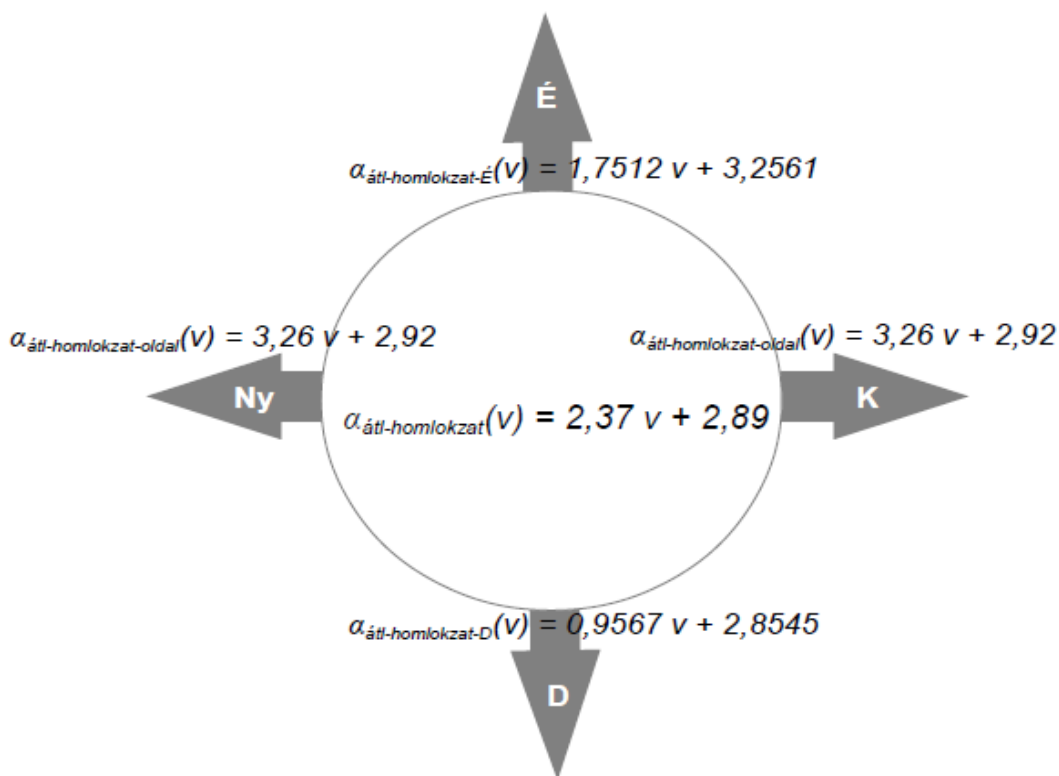
73. ábra. Az egyenletek ábrázolása homlokzatra szerelt PV esetén

Átlagolva az egyenleteket, a következő formula adódik:

$$\alpha_{\text{átl-homlokzat}}(v) = 2,37 v + 2,89. \quad (4.9)$$

A továbbiakban tehát a hőátadási tényező számításakor a (4.9) egyenletet használjuk.

Összegzésként megállapítható, hogy az egyes esetek szimulációjának kapcsán meghatározott hőátadási tényezők a 74. ábrán is megjelenített lineáris függvényekkel kapcsolhatók a hőáramhálózatos modellhez, ahol a  $v$  a mért, vagy a meteorológiai függvény által meghatározott szélsébség.



74. ábra. A homlokzatra szerelt napelem modulok hőátadási tényezőjének átlagolása

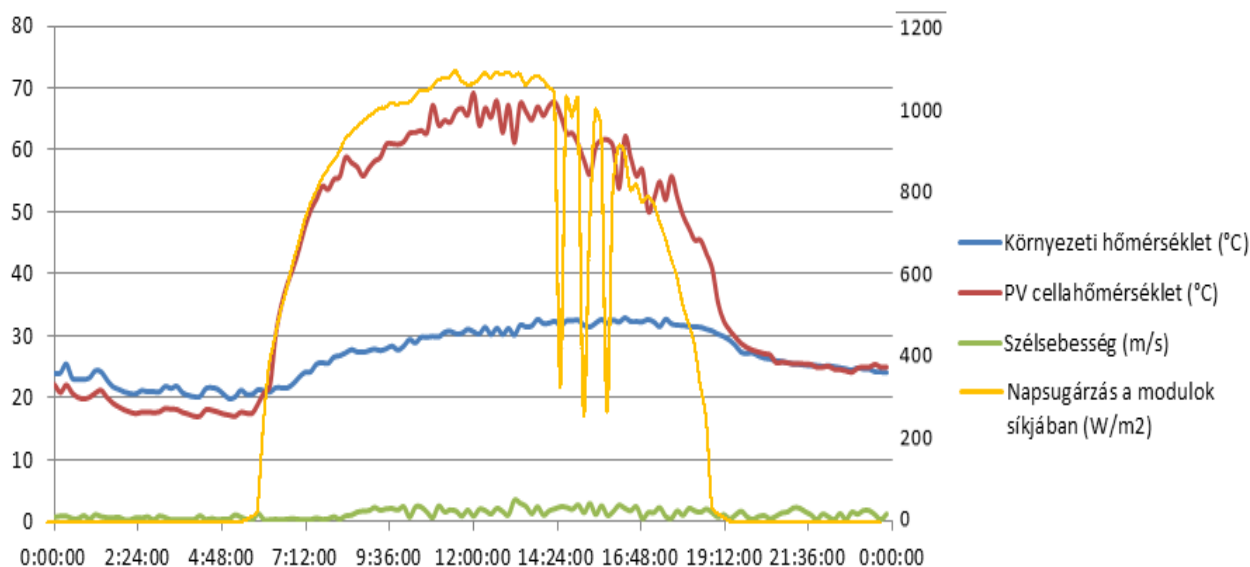
A CFD számítás valós körülményekhez való hasonlóságát szélcsatorna mérésekkel ellenőrizem a 3. fejezetben ismertetett módon. A nyomástényezők ( $C_p$ ) mért és a szimulált értéke közti maximális eltérés 0,64, amely a 33,7% az értékterományra vonatkoztatva, a szórás 0,46.

#### 4.2. Fotovillamos modul hőáram-hálózat alapú modellje

A működési hőmérsékletre vonatkozó méréseket az irodalomkutatásban, a 2.5. pontban ismertetett mérésekkel is össze lehet hasonlítani, továbbá példákban elemezhető, milyen jellemző hatásokon üzemelnek a modulok különböző időjárási körülmények mellett.

Saját mérés alapján a legmagasabb regisztrált cellahőmérsékletet 2012. augusztus 2-án mértem az általam kutatási célra épített, szabadonálló, napkövető berendezéssel kiegészített rendszeren. Ezen a napon, pontosan a 12:00-kor regisztrált 10 perces átlag mutatott  $69,2\text{ }^\circ\text{C}$ -ot,  $1005\text{ W}$  napsugárzás és  $30,6\text{ }^\circ\text{C}$  környezeti hőmérséklet mellett. Ebben az időpontban alacsony,  $0,9\text{ m/s}$  szélsébség lett rögzítve (75. ábra). Ez  $49\text{ }^\circ\text{C}$ -kal tér el a szabványosan mért határfoktól és ismerve a modul hőmérsékletfüggési együtthatóját, ez 24,5% határfok csökkenést eredményez. Így az amúgy sem magas 12,35%-os határfok 9,3%-ra csökken, ami egy nagyobb rendszer esetén jelentős energiatermelésbeni visszaesést jelent.

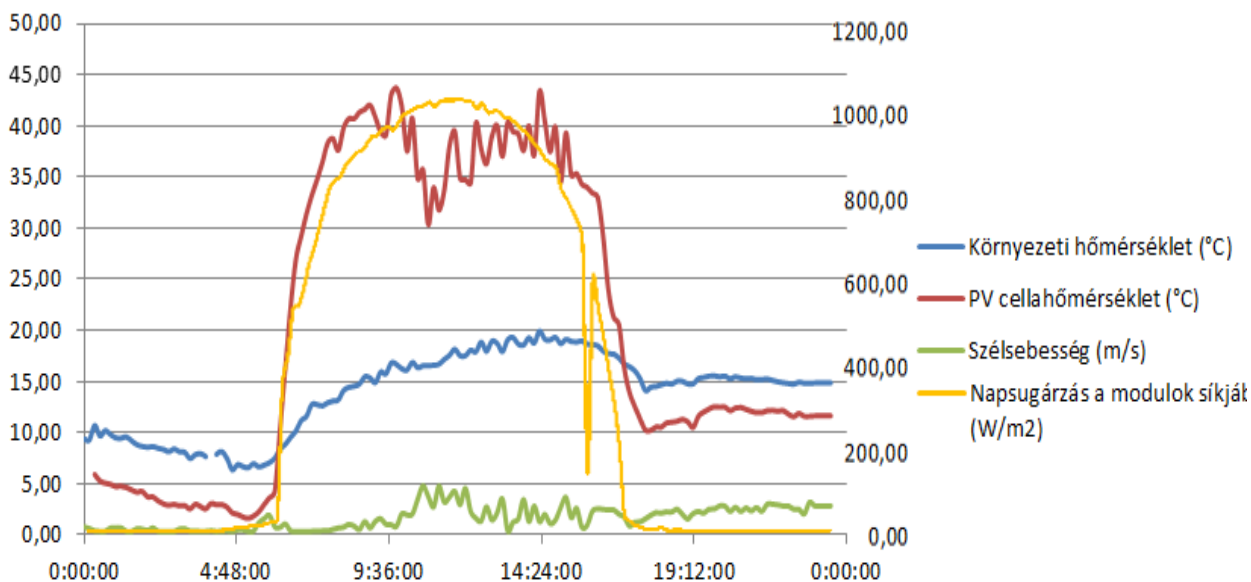
A mért rendszer szabadon álló modulokból áll, mert a ferde tetőre telepített moduloknál még magasabb hőmérséklet is előfordulhat, a kedvezőtlenebb szél általi körüláramlás és így az alacsonyabb hőátadás miatt.



75. ábra. A 2012. augusztus 2.-i nap mérési eredményei.

Ezen a napon is látható, hogy a működési időszakban az átlagos cellahőmérséklet  $56,85\text{ °C}$  volt, ami napi szinten  $18,4\%$  hatásfok-csökkenést eredményezett, vagyis a napi hatásfok csak  $10,01\%$  volt. Ha elemezzük a mérési adatokat, világosan látszik, hogy a szél hűtő hatása mekkora szerepet játszik a modul hűtésében. A 2012. március 21-én rögzített adatsoron (76. ábra) megfigyelhető, hogy azokban az időszakokban, amikor a szélsébség nagyobb, jelentősen visszaesik a cellahőmérséklet.

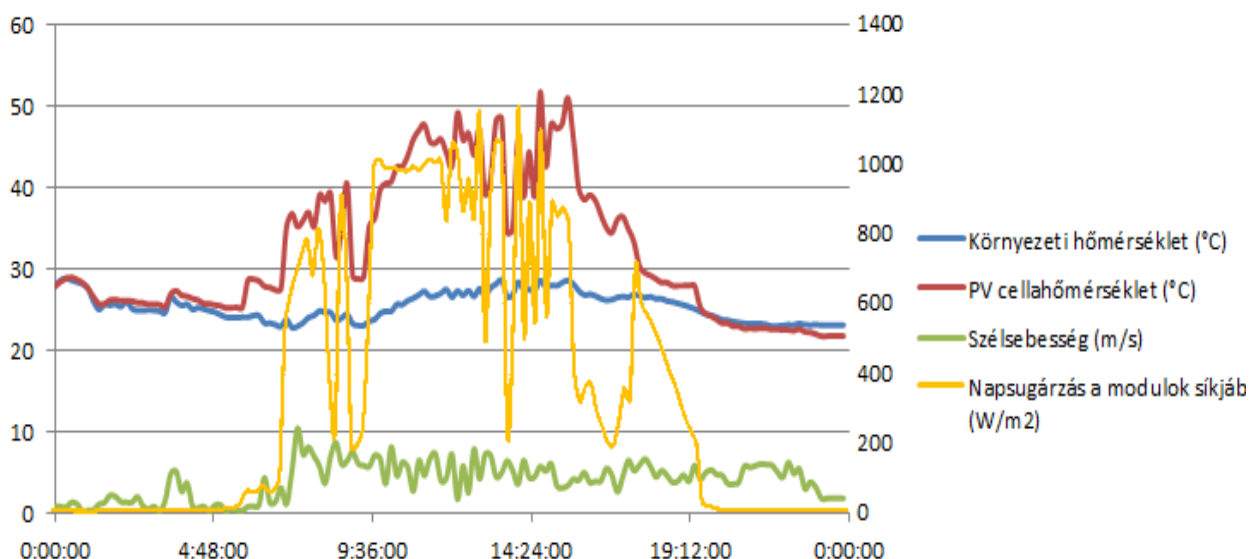
A napkövető berendezés miatt ezen a napon is meglehetősen magas napsugárzási teljesítményt mérhetünk a modulok síkjában.



76. ábra. A 2012. március 21-én mért adatsor

A nyári napfordulón regisztrált adatok jól jellemzik a rendszert, mivel ilyenkor a legnagyobb a napsugárzás mértéke, feltéve ha nem tapasztalható hasonló felhősödés, mint 2012-ben Pécsen (77. ábra).

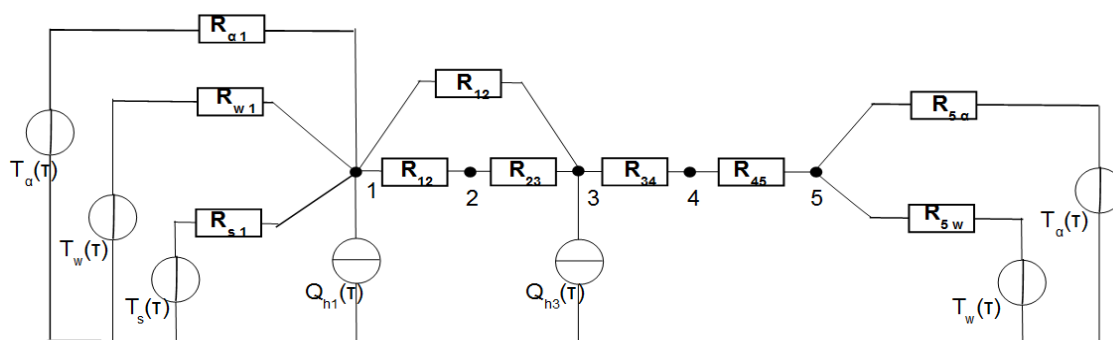




77. ábra. A 2012. június 21-én mért adatsor

Június 21-én tiszta idő esetén mérhető a legnagyobb sugárzási teljesítmény, mert ilyenkor a legkisebb a beesési szög és így az AM (Air Mass) is. A 77. ábrán látható, hogy a modul síkjára eső teljesítmény elérheti az 1200 W-ot is. Itt napközben magas (5-8 m/s) szélsebesség volt tapasztalható, így a modulok hőmérséklete átlagosan 37,95 °C volt, bár ez köszönhető az időszakos felhősödés miatti visszaeséseknek is.

A felállított 5 csomópontos hőáram-hálózatos modell (78. ábra) alkalmas a fotovillamos modul cellahőmérsékletének számítására. A modellt a mérőrendszeren validáltam, amely során a modulok mért és számított hőmérsékletét hasonlítottam össze. A validált modellen végzett szimulációk alkalmasak a fotovillamos modulok hatásfok-változásának számítására is, a meteorológiai modellekkel kiegészítve pedig energiatermelési előrejelzésre.



78. ábra. A fotovillamos modul hőáramhálózatos modellje

A hőáramhálózatos modellel számíthatjuk a modulok hőmérsékletét, ha ismertek a környezeti jellemzők értékei, amit a mérésekből megkaphatunk, vagy átadhatjuk neki a leíró függvények által szolgáltatott értékeket is. A modellparaméterek identifikációja a szerkezeti tulajdonságoknak megfelelően a történik az anyagminőség (9. táblázat) alapján, a (3.32) összefüggés szerint megkívánt módon.

21. táblázat: A hőátviteli matrix ( $\underline{G}$ ) identifikált paraméterei

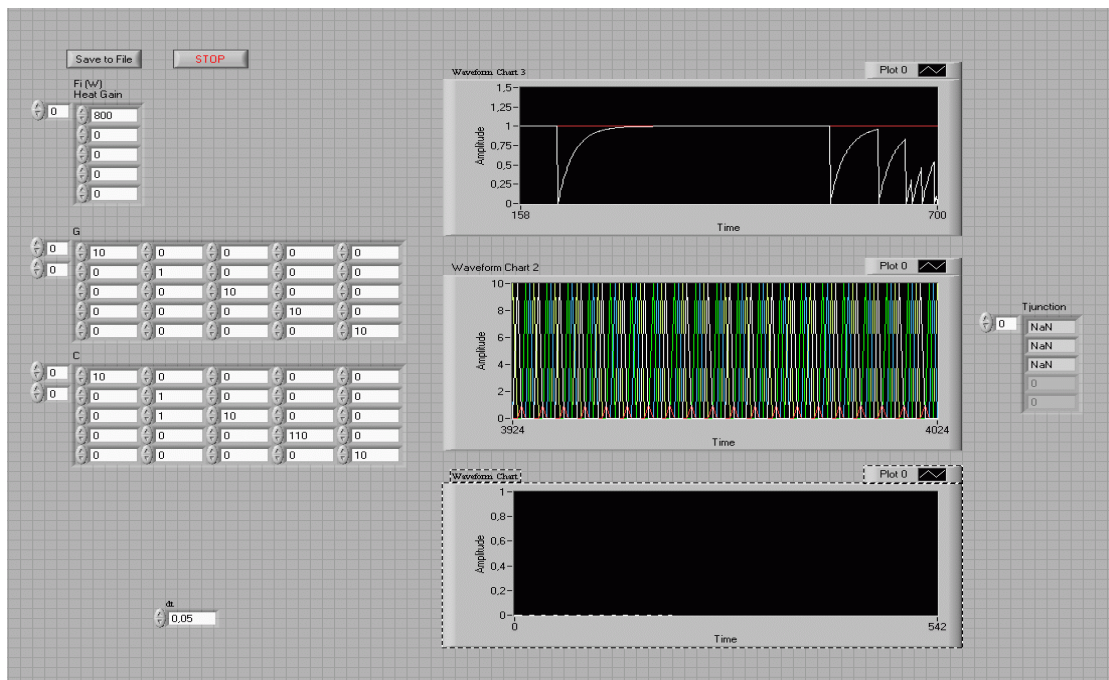
$50-(1/\alpha A) \Delta\tau$	0,605	1	0	0
0,605	0	72,105	0	0
1	72,105	950	72,105	0
0	0	72,105	0	0,295
0	0	0	0,295	$0-(1/\alpha A) \Delta\tau$



22. táblázat: A hőkapacitás mátrix ( $C$ ) paraméterei (J/K)

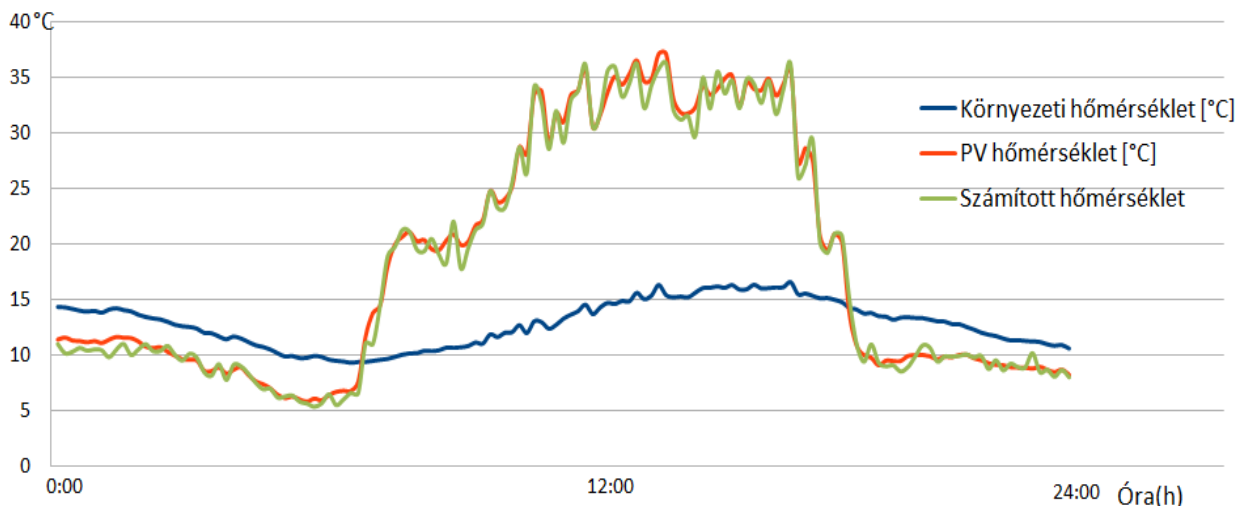
237	0	0	0	0
0	963	0	0	0
0	0	285	0	0
0	0	0	963	0
0	0	0	0	120

Ezen bemeneti értékek átadásra kerülnek a LabView-ban megvalósított hőáramhálózatos modell számára, így a mért és a számított értékek összehasonlíthatók (79. ábra).



79. ábra. A kezelőfelület (Front panel) tesztüzemben

A modell, amit LabView-ban realizáltam, alkalmas az adott típusú szilícium napelem csomóponi hőmérsékleteinek számítására. Nagy előnye a LabView megoldásnak, hogy a napelemek mérőrendszeréhez közvetlenül csatlakoztatható, így a programnak átadhatók a környezeti paraméterek aktuális értékei. Az adatgyűjtő méri a környezeti paramétereken kívül az egyik napelem cellájának hőmérsékletét is, és így a mérési eredmények összehasonlíthatók a modellel. A 80. ábrán láthatjuk a mért és a számított hőmérséklet egy napi összehasonlítását, az aznapi környezeti hőmérséklettel együtt.



80. ábra. A mért és a számított hőmérséklet összehasonlítása 2012. március 29-én

A modell által számított hőmérséklet a statisztikai ellenőrzés szerint hibahatáron követi a mért értékeket. A 23. táblázatban bemutatott 3 nap mérése alapján megállapíthatjuk, hogy a szimuláció alkalmas a fotovillamos modulok energiaviszonyainak számítására.

A felállított és validált modell alkalmas fotovillamos rendszerek tervezésénél – a megfelelő meteorológiai modellekkel kiegészítve – a várható termelési adatok meghatározására, illetve optimalizálásra.

23. táblázat: A mért és számított hőmérséklet alapján a modell jóságának ellenőrzése

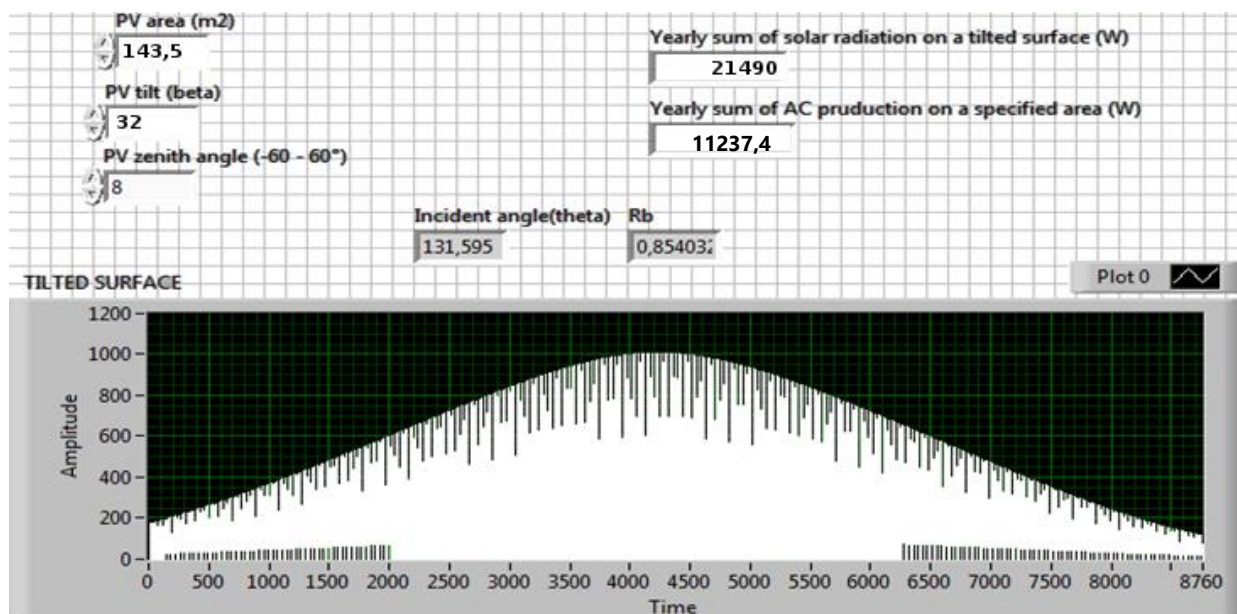
Mérés ideje	Szórás	Legnagyobb eltérés	Átlagos eltérés
2012. március 29.	0,868	2,802	0,643
2012. június 21.	0,831	3,12	0,652
2012. augusztus 2.	0,839	2,97	0,618

A referenciaépület napelemes rendszerén hosszútávon tudjuk vizsgálni az energiatermelési adatokat, valamint összehasonlíthatjuk a HÁH-PV modellel számított eredményekkel.

A referenciaépület 12 kW névleges teljesítményű rendszer esetében a modulok 32°-ban vannak döntve a vízszinteshez képest és 8°-kal van elfordítva a Déli égtájhoz képest. A szélességi fok ( $\varphi$ ) a korábban megadott 46° Komlóra vonatkozóan,  $\beta$  a modulok dőlése 32°,  $\omega$  az óras forgás értéke, míg a deklináció ( $\delta$ ) a (3.10) egyenlettel számítható.

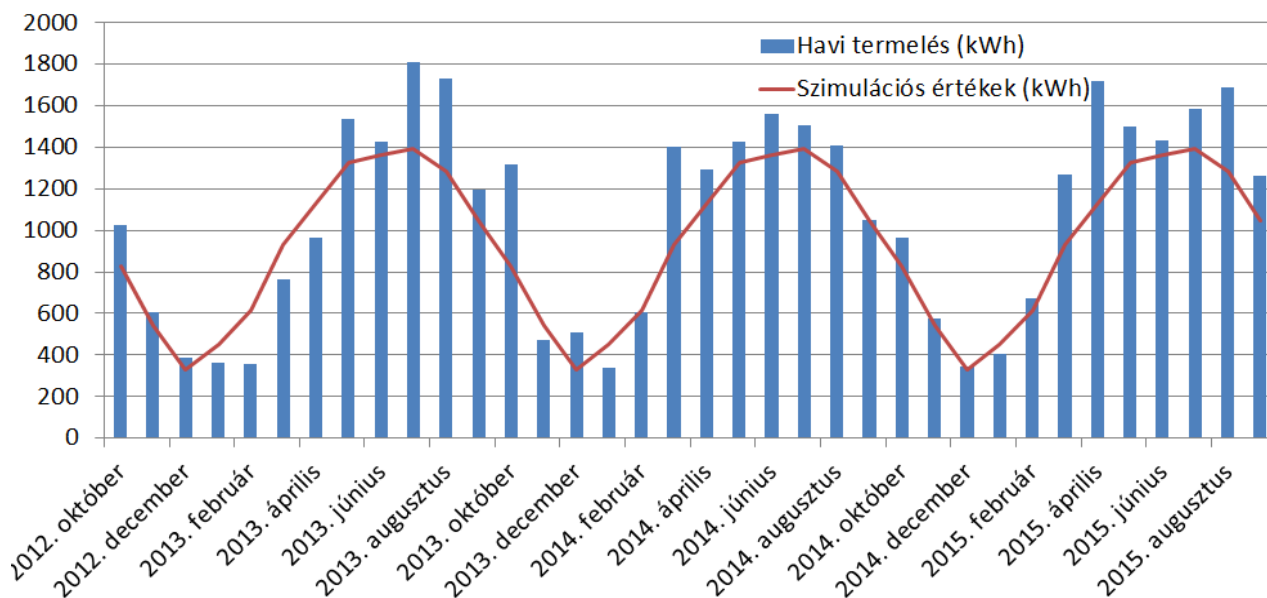
Az alapvető paraméterek megadásra kerülnek, így a modell (81. ábra) számítja a napelemes rendszerrel megegyező tájolású és dőlésű egy m<sup>2</sup> felületre érkező sugárzás értékét, amelyet felszorozva kapjuk meg a 11237,4 kWh/a éves energiatermelési értéket, amely már módosítva van a hőmérsékleti tényezővel a 3.3 pontban leírt módon.

A számított értéket (11237,4 kWh/a) havi, vagy napi bontásban is vizsgálhatjuk és ezek értékei szintén összehasonlíthatók. Az éves mért termelési adat a 2013-as évre 12 455 kWh/a, ami magasabb mint a számított érték, de mivel átlagolt bemeneti adatokkal dolgoztunk, ezért az várható, hogy az évek során kiegyenlítődik ez az érték. Összehasonlításként a PVGIS 13700 kWh/a értéket számolt.



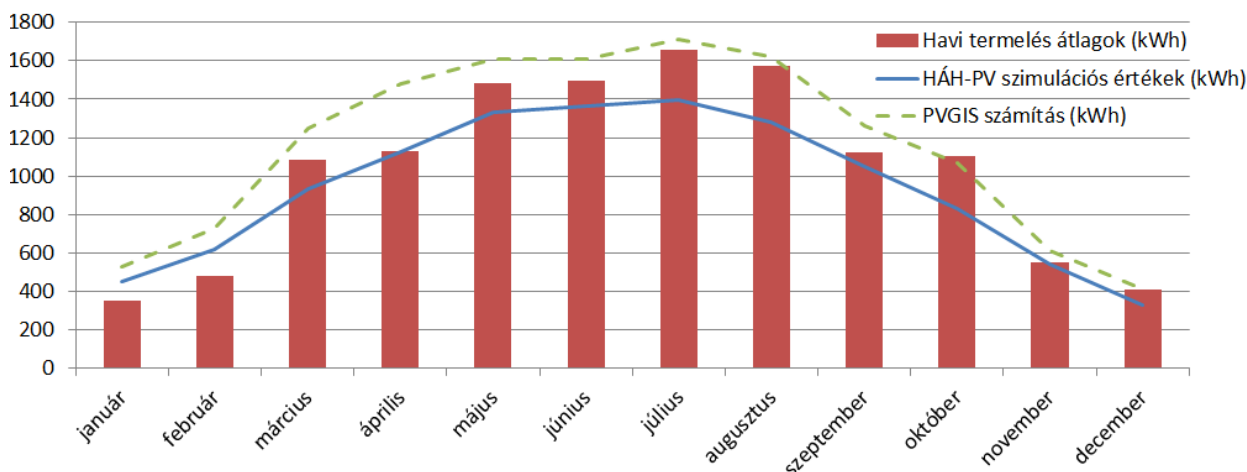
81. ábra. A napsugárzás számított értéke döntött, elforgatott felületre

2012. október 1-je óta vannak mentve a rendszer energiatermelési adatai, vagyis 3 teljes év áll rendelkezésre az összehasonlításhoz (82. ábra).



82. ábra. A mért és a szimulációs értékek összehasonlítása

Ha átlagoljuk a 3 év mérési adatait, akkor nem kapunk ekkora kiugrásokat (83. ábra), várhatóan több év esetén még kisebb eltérések lennének:



83. ábra. A HÁH-PV modellel szimulált és a valós energiatermelési adatok 3 éves átlagának összehasonlítása

A HÁH-PV modell tehát alkalmazható energiatermelési vizsgálatokban is, de a modell validálásához hozzávetőlegesen 10 év energiatermelési adatait kellene vizsgálni, hogy a mért adatok átlaga és a számított adatok között kisebb legyen az eltérés, hiszen a 24. táblázatból is látszik, hogy a különbség alapvetően csökken.

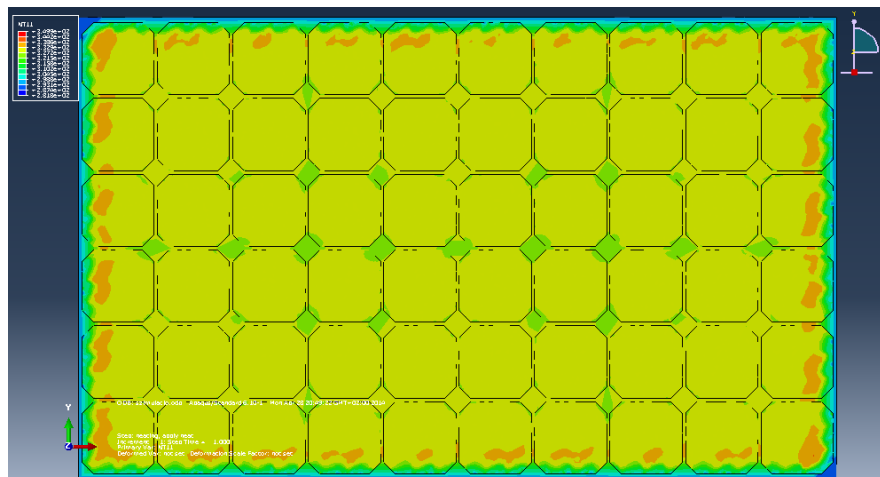
24. táblázat: A termelési adatok statisztikai feldolgozása

Mérés ideje	Szórás	Legnagyobb eltérés (Wh)	Átlagos eltérés
2012. október - 2014. december	215,87	491,5	166,5
első két év átlaga	111,01	291,45	138,8
3 év átlaga	123,21	330,1	159,5

A PVGIS számításnál a 2 éves adatok alapján a kidolgozott modell 1,95%-kal jobban közelíti az éves energiatermelést.

### 4.3. Hőáramhálózat alapú PV/T vizsgálati modell

A hőáramhálózatos (HÁH-PV) modellt kiterjesztettem a PV/T kollektorok szerkezetének megfelelően (3.5.3 pont). A PV/T kollektor esetében a működési hőmérséklet meghatározza mind a termikus hatásfokot, mind a napelemes rész hatásfokát. (A termikus kollektorok hatásfoka vizsgálható a létrehozott modellel az M5. mellékletben bemutatott módon.) Az MHP PV/T kollektort több vizsgálatnak is alávettem, hogy a működésének sajátosságait vizsgáljam. A munka szerves része volt a teljes (3D) hőtani szimuláció elvégzése (84. ábra), majd ennek összehasonlítása a hasonló körülmények között készült hőkamerás felvételekkel és a HÁH-PVT modell által szimulált adatokkal.



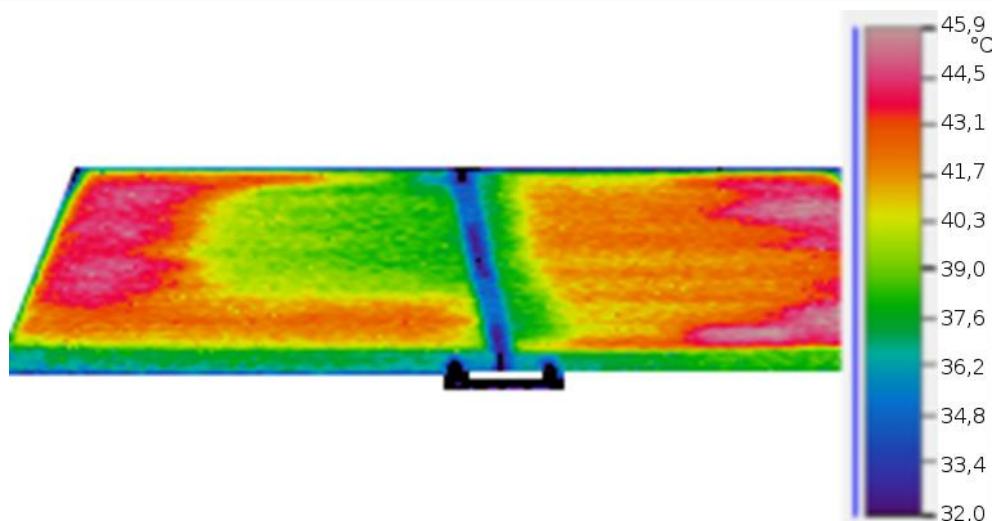
84. ábra. A termikus szimuláció eredménye

A szimuláció segítségével kimutatható – mivel itt a mérés nem valósítható meg mint egy általános PV modul esetében – a fotovillamos cellák hőmérséklete és ezáltal megadható a pontos hatásfok a hőmérsékleti együttható ismeretében.

A szimuláció során a 45 °C-os közeghőmérséklet esetén, 1000 W/m<sup>2</sup> besugárzás mellett a cellahőmérsékletre 52 °C jött ki. A hőmérsékletfüggési együttható alapján ez  $\Delta\eta_{pv} = 0,28\%/^{\circ}\text{C} \cdot 32\text{ }^{\circ}\text{C} = 8,96\%$  hatásfok csökkenést eredményez. Hűtés nélkül a hatásfok csökkenés akár háromszoros is lehetne. A szimuláció alapján a kollektor hőveszteségi tényezője:  $U_L = 8,89\text{ W/K}$ .

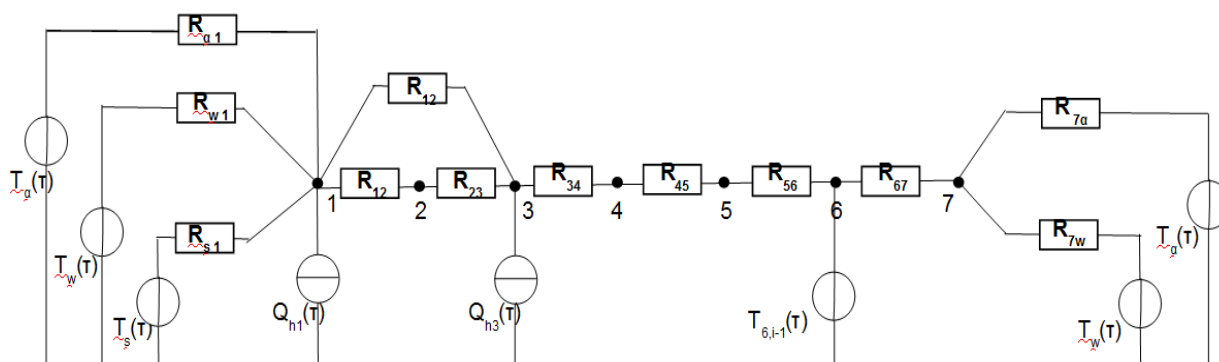
Egy 240 Wp (STC mérési körülmények mellett) teljesítményű PV/T modul esetében, 1,5 m<sup>2</sup> felülettel számolva 16%-os névleges hatásfok esetén, a hőmérsékleti együtthatóval csökkentve 14,33%. Ezen – a gyártó által megadott értékekből számolt – eredmények ellenőrizhetők méréssel. A méréseket a 3.5. pontban ismertetett módon végeztük. A mérések egyik fontos tapasztalata az, hogy bár a PV/T kollektor nem ér el olyan 50 °C-nál magasabb hőmérsékletet, mint ahogy egy PV modul esetében akár 90 °C is lehet, de a PV/T hőmérséklete 50 °C-ig mindig magasabb volt, mint a mérések alapján a referencia PV modul hőmérséklete.

A hővezetési szimuláció eredménye hőkamerás felvétellel összehasonlítható. A működés közbeni állapot, amelyről a hőkamerás felvétel készült, ellenőrzésként vehető alapul, mivel nem lehet teljesen ugyanazokat a körülményeket produkálni, mint a szimuláció esetében. A mérés során a közeghőmérséklet a vezérlés által beállított 45 °C volt, a pyranométer 970 W/m<sup>2</sup> napsugárzási értéket naplózott és így volt mérhető 85. ábra hőképe.



85. ábra. A két PV/T kollektor hőképe

A PV modulokhoz hasonlóan, a PV/T modulok szerkezete alapján meghatározott 7 csomópontos hőáramhálózatos modellel (86.ábra) is lehet számítani a cellahőmérsékletet.



86. ábra. A PV/T modul hőáramhálózatos modellje

Ehhez a hőáramhálózatos modell szerint meg kell határozni a hőátviteli paramétereket, amelyeket a hőátviteli mátrixban (25. táblázat) adtam meg. Itt a teljes hőáramhálózatos modell leképezésre kerül, az fenti ábra szerint. A HÁH-PVT modell szerinti hőkapacitások a  $\underline{C}$  mátrixban kerülnek megadásra, a csomópontok megadott helyének megfelelően.

25. táblázat: Hőátviteli mátrix ( $\underline{G}$ ) [W/K]

$50-(1/\alpha A) \Delta\tau$	0,605	1	0	0	$T_{6-5,5}$	0
0,605	0,0294	72,105	0	0	0	0
1	72,105	950	72,105	0	0	0
0	0	72,105	0	0	0	0
0	0	0	0	4,88	0	0
$T_{6-5,5}$	0	0	0	0	2,533	0,295
0	0	0	0	0	0,295	$0-(1/\alpha A) \Delta\tau$

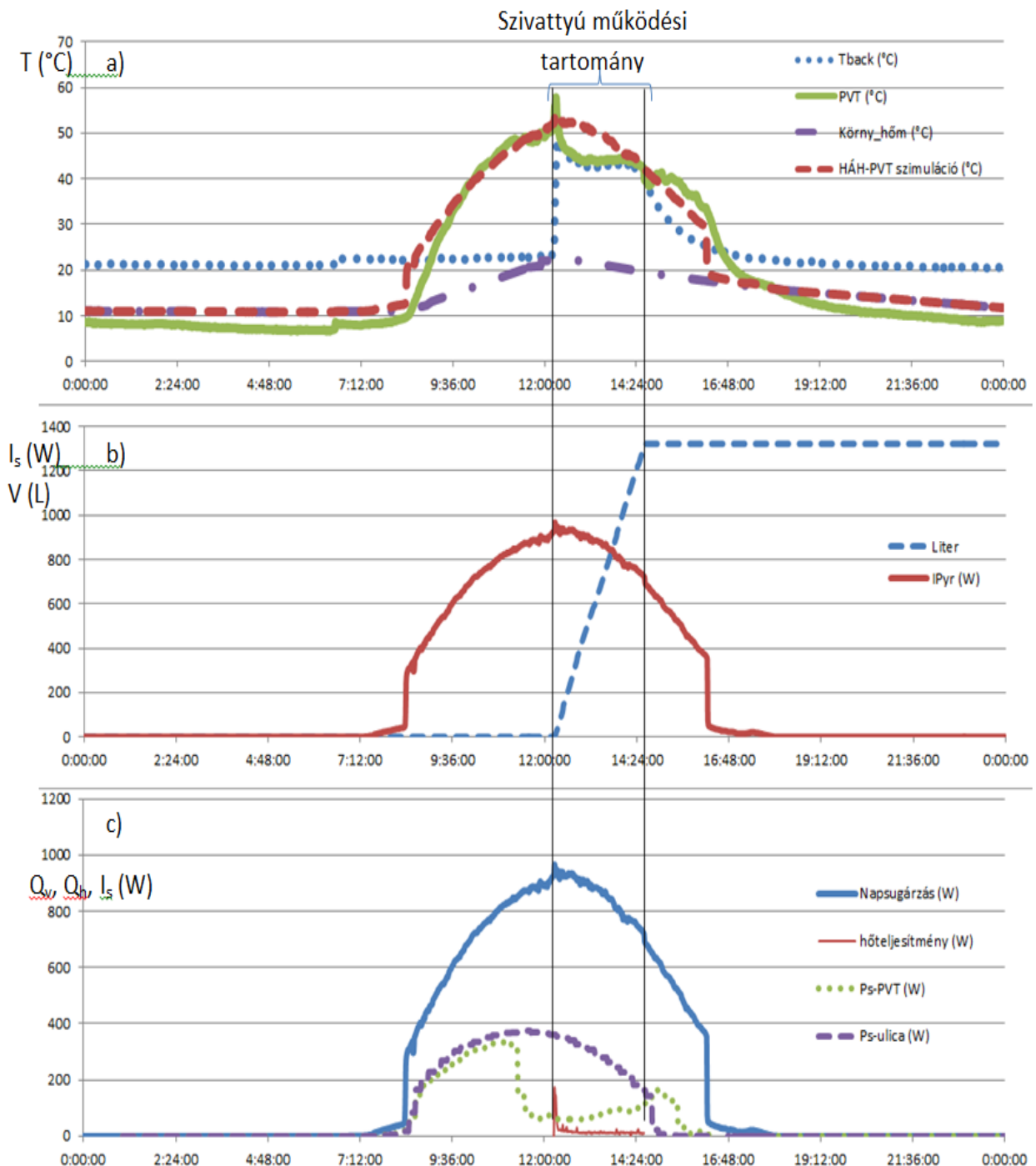
A hőátviteli mátrixban – mivel egységnyi értékekkel számoltam – a hőgyűjtő-cső felé a hőátadást a felületarányok alapján vett szorzóval szorozzuk. Mivel a gyűjtőcső 10 cm széles, a hasznos felület arányában ez 0,096 lesz. Így tudjuk az egydimenziós modellben a hőátvitelt a nem arányos felületek között számolni.



26. táblázat: Hőkapacitás mátrix ( $C$ ), [J/K]

237	0	0	0	0	0	0
0	963	0	0	0	0	0
0	0	285	0	0	0	0
0	0	0	963	0	0	0
0	0	0	0	120	0	0
0	0	0	0	0	1350	0
0	0	0	0	0	0	1377

A 87. ábra a) részén a PVT és a HÁH-PVT szimuláció mért és számított hőmérsékleteit ismertetem, míg a b) és c) diagramon a leadott pillanatnyi hőteljesítmény látható a megmozgatott térfogattal párhuzamban.



87. ábra. A PV/T rendszer mérési eredményei 2014. október 19-én



A 87. ábrán látható mérési eredményekből kiemelendő, hogy az aznapi működési időszakban (amikor a szivattyú működött) a PV/T modul termikus átlaghatásfok 46%, míg a termikus hatásfok legmagasabb pillanatnyi értéke 62% volt. Ha a termikus hatásfokot a teljes napos időszakra vonatkoztatjuk, akkor annak értéke csupán 22%. Ugyanakkor a villamos energiatermelési időszakban a PV/T villamos átlaghatásfoka meghaladta a 15%-ot, miközben az átlaghőmérséklet 32 °C volt, szemben a „kontroll” PV modulok átlaghatásfokával, amely csak 14,3% volt. A „kontroll” PV modulok pillanatnyi hőmérséklete ugyan elérte a 64 °C-ot és átlagosan csak 42 °C volt, a villamos hatásfok-csökkenés mégis jelentősebb a PV/T-nél: -11%, a 0,5 %/°C hőmérsékleti együtthatóval számolva.

A HÁH-PVT modell jóságát a 87. a) ábra szemlélteti. A mérési adatok ismeretében és azokat felhasználva a modell bemeneteként számítottam a PV/T modul hőmérsékletét. Ez egy ideális modell, amely nem veszi figyelembe a hőelvételeket, így a statisztikai ellenőrzéskor a szivattyú működési tartományát kihagytam a számításokból. Ez alapján a 27. táblázat tartalmazza a szórást, a maximális eltérést és az átlagos eltérést a három mérési időszakra vonatkozóan.

27. táblázat: A HÁH-PVT modell statisztikai adatokkal való ellenőrzése

Mérés ideje	Szórás	Legnagyobb eltérés	Átlagos eltérés
2014. október 19.	3,99	13,35	2,95
2014. október 18.	4,14	12,2	3,11
2014. október 20.	4,05	12,81	3,09

A HÁH-PV modellel összehasonlítva a nagyobb eltérések miatt vannak, hogy ebben az esetben nem vesszük figyelembe a hűtőközeg hővezetését, amely kikapcsolt szivattyú esetén is jelentős hőmennyiséget tud elvezetni a kollektorfelületről.

Összegzésként azt lehet kiemelni, hogy a PV/T modulok nagyobb energiasűrűséget produkálnak: a minta adatsorban összesen tehát 61% a hatásfok, vagy ha a hasznosítható időszakot vesszük, akkor 37%.

A mérések segítségével meghatároztam az MHP PV/T modulok  $F_R$  tényezőjét (hőelvonási faktor) (2.9 pont), amely a kollektoros rendszerek méretezéséhez nélkülözhetetlen adat. A (2.14) összefüggés alapján a számításhoz szükséges a kollektor pillanatnyi hőteljesítménye ( $Q_h$  [W]), amely a mérésekből adódik, továbbá a transzmittancia-tényező ( $\tau$ ), amely a szolár üvegezésekre jellemző, az EN410 méréseknek megfelelő, 8481R-10.26188 TÜV tanúsítvány alapján  $\tau=0,92$  érték. Szükséges továbbá az abszorpciós tényező ( $\alpha$ ) megadása is, amely az irodalom alapján a polikristályos napelemekre jellemző  $\alpha=0,9$  (Santbergen, Zolingen, 2008).

A (2.16) összefüggés alapján az  $F_R$  tényező 3 nap energiatermelési adatainak átlagolásával 0,0769 értékre jön ki, amely a rendszerméretezési számításokhoz elengedhetetlen, jelen esetben ez egy új eredmény. Példaként az M5. mellékletben végeztem el az éves termikus hatásfok kiszámítását a PV/T kollektorra vonatkozóan.

#### 4.4. A komplex fotovillamos modellező rendszer

A felállított HÁH-PVT és a HÁH-PV modellel objektíven lehet összehasonlítani a hűtött (MHP típusú) és hűtés nélküli PV modulok hatásfokának alakulását éves szinten. Ha a vizsgált rendszert vesszük alapul és annak szabályozását, akkor egy logikai „HA()” függvénnyel az 50 °C feletti részt levágjuk (mivel feltételezzük, hogy a rendszer bekapcsolásával az e feletti rész hőáramát a folyadék-levegő hőcserélőkkel eldisszipáljuk, ahogy az egyébként a mérőrendszeren is megvalósul), így a PV/T kollektor hőmérséklete ezen érték fölé nem mehet. A szimuláció eredményeként azt kapjuk, hogy míg a PV/T kollektor éves szinten 195,4 kWh villamos teljesítményt ad le (1 m<sup>2</sup> PV felületen), addig a „normál” fotovillamos modul 198,2 kWh-t. Ez mindössze 1,4%-kal több a PV modul javára. A teljes éves villamos hatásfok a PV modul esetén 14,71%, a PV/T kollektornál 14,64%, ahol az összh hatásfok jóval magasabb a termikus

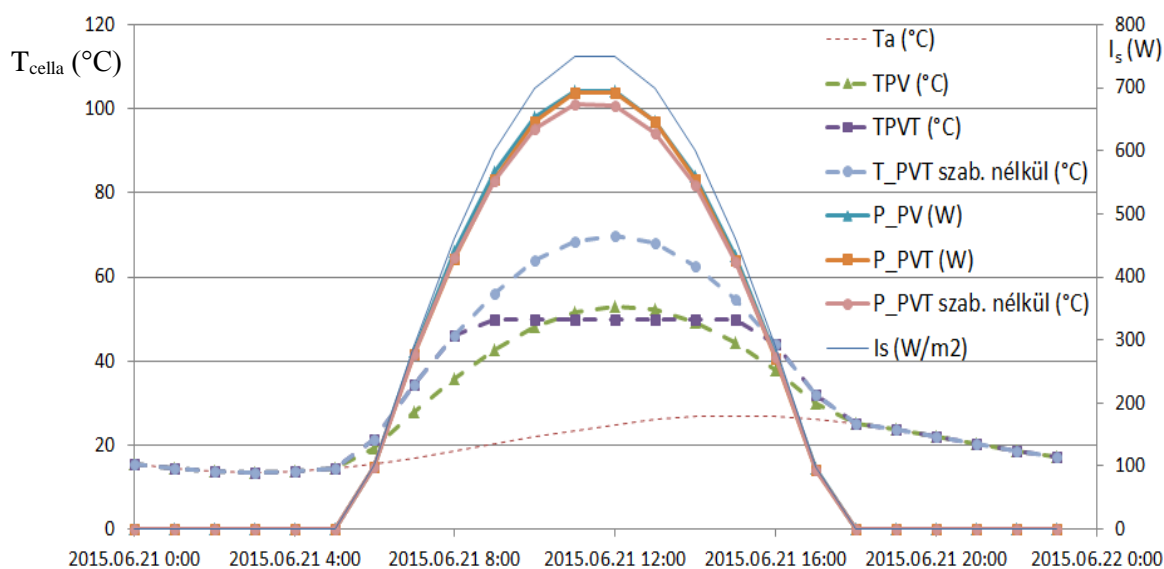
hányadnak köszönhetően.

Ha nem veszünk el hőt a PV/T kollektorról, akkor 194,7 kWh villamosenergiát tudunk egy évben megtermelni.

28. táblázat: Az összehasonlító szimuláció eredményei összefoglalva

	Éves hatásfok $\eta_a$ (%)	Éves energiatermelés $P_a$ (kWh/a)
PV	14,71	198,2
PV/T szabályozással	14,64	195,4
PV/T szabályozás nélkül	14,61	194,7

A normál PV és a PV/T modulokat összehasonlító szimulációk egy napját vizsgálva látható (88. ábra), hogy a PV/T kollektor előbb ér el magasabb hőmérsékletet, de a PV modul csúcshőmérséklete magasabb, igaz rövid ideig. A hűtés nélküli PV modul elérhetné a 70 °C-ot is, míg a környezeti hőmérséklet a június 21.-i napon még relatíve alacsony.



88. ábra. Az összehasonlító szimuláció egy napja kiemelve (június 21.)

A kutatás során a fotovillamos és termikus hibrid napkollektor modulok egyik újfajta típusát (MHP PV/T) is megvizsgáltam. A kidolgozott HÁH modell alapján összehasonlító vizsgálatot végeztünk a nem hűtött PV modulokkal. Az eredmények igazolják, hogy bár az MHP PV/T alkalmazása esetén a fotovillamos hatásfok csökken, de a teljes (fotovillamos- és termikus-együtt) hatásfok miatt nagyobb energiatermelést érhetünk el, ami abból is egyértelműen következik, hogy az éves fotovillamos hatásfok-különbség mindössze 0,07%, ami elhanyagolható, mindazonáltal kimutatható. A fotovillamos rendszer által termelt energia mennyisége alacsonyabb, de a termikus hatásfokkal együtt – a (2.19) alapján és az M5. mellékletben ismertetett módon számolva – az összh hatásfok 14,64% + 8,58%, azaz 23,22%. Ez összh hatásfokban 8,51%-kal magasabb az általános fotovillamos moduloknál és a kettős üvegezésű termikus kollektorokhoz képest is 3,72%-kal magasabb – ugyanezzel a módszerrel számolva a hatásfokot (M5. melléklet).

A 0,07% hatásfok különbség elhanyagolható, de ha az éves termelési adatokat vesszük figyelembe, akkor 1 m<sup>2</sup> felületen 2,8 kWh a hatásfok különbség, viszont a Magyarországon legkisebbként engedélyezett 1,5 kWp HMKE (háztartási méretű kiserőmű) is már 9,6 m<sup>2</sup> hasznos PV felülettel rendelkezik, így itt már 26,88 kWh a különbség. A teljes élettartamra vonatkozóan (min. 25 év) ez 672 kWh, ami már a beruházás megtérülését is befolyásolja, hiszen a jelenlegi árakkal számolva ez a bekerülési költség 5-7%-át teszi ki. (Tájékoztató számítás a

---

2015-ös rendszerárak alapján.)

Az általalam kidolgozott modell újfajta módszerrel számolja a PV modulok cellahőmérsékletét, figyelembe veszi a szél hűtő hatását és órás adatokból számolja az éves energiatermelést. Ezzel a módszerrel pontosabban lehet tervezni egy fotovillamos, vagy akár egy PV/T rendszer energiatermelését. A modell segítségével igazoltam, hogy a környezeti jellemzők 10 éves átlagával számolva az MHP PV/T kollektorok jobb összhatósfokkal rendelkeznek egy átlagos PV modulnál és egy általános felépítésű termikus-síkkollektornál.

#### 4.5. Új tudományos eredmények

A kutatómunkám során vizsgáltam az általános szerkezetű napelem modulok és a mikro hőcsöves fotovillamos-termikus (MHP-PV/T) modulok energiaviszonyait és ezek kapcsán az elért új tudományos eredmények a következők:

##### 1. Napelem modulok hőátadási tényezője

A fotovillamos modulok szélesség és szélirány függvényében változó átlagos hőátadási tényezőjének meghatározásához új összefüggéseket dolgoztam ki, a különböző telepítési módozatokra vonatkozóan:

ferde tetőre szerelt moduloknál:

$$\alpha_{\text{átl-ferde-}\dot{E}}(v) = 1,85 v + 2,93,$$

$$\alpha_{\text{átl-ferde-}D}(v) = 3,62 v + 2,93,$$

lapostetőre szerelt moduloknál:

$$\alpha_{\text{átl-lapos-}\dot{E}}(v) = 2,3 v + 2,90,$$

$$\alpha_{\text{átl-lapos-}D}(v) = 2,17 v + 2,90,$$

szabadon álló moduloknál:

$$\alpha_{\text{átl-zsabad-}\dot{E}}(v) = 4,188 v + 2,90,$$

$$\alpha_{\text{átl-zsabad-}D}(v) = 3,128 v + 2,90,$$

homlokzatra szerelt moduloknál:

$$\alpha_{\text{átl-homlokzat-}\dot{E}}(v) = 1,75 v + 3,26,$$

$$\alpha_{\text{átl-homlokzat-}D}(v) = 0,96 v + 2,85$$

és az összes esetben oldalszélre:

$$\alpha_{\text{átl-oldalszél}}(v) = 3,26 v + 2,92.$$

A CFD szimulációkat szélcsatorna mérésrel validáltam, ahol a  $C_p$  nyomástényezők egyezősége mutatja a szimuláció jóságát. A mérés és a szimulációs értékek közti maximális eltérés 0,64, az átlagos eltérés 0,23 és a szórás 0,462.

##### 2. Fotovillamos modulok hőáram-hálózat alapú modellje

Kidolgoztam a napelem modulok 5 csomópontos hőáram-hálózatos (HÁH-PV) modelljét, amely új módszer a napelem modulok Si celláinak hőmérsékletének meghatározásához. Validációs célokra kialakítottam egy mérőrendszert, amellyel ellenőrizni lehet a HÁH-PV modellt. A hőáramhálózat alapján új komplex energiatermelési modellt dolgoztam ki és hasonlítottam össze mérésekkel és szabványos számítási módszerrel. Mivel ez modell a szélesség alapján változó felületi hőátadási tényező értékével és az ASHRAE módszerrel szétválasztott direkt-, diffúz-napsugárzás komponensekkel számol, ezért a szabvány módszereknél pontosabbnak tekinthető. A referencia számításnál a 2 éves adatok alapján 1,95%-kal jobban közelíti az éves energiatermelést.

##### 3. Hőáramhálózat alapú PV/T vizsgálati modell

Új módszert dolgoztam ki, amellyel meghatározható a mikro hőcsöves típusú PV/T rendszerekben a Si cellák működési hőmérséklete, egy 7 csomópontos hőáram hálózatos modell segítségével. A modell identifikációjához szükséges mikro-hőcsöves anyag hővezetését mérés és termikus szimuláció kombinációjával adtam meg. A modellt mérésekkel igazoltam és a mérések során kimutattam, hogy az MHP rendszerű PV/T modulok éves szinten vett átlagos cellahőmérséklete magasabb, mint a hűtés nélküli napelemeké.

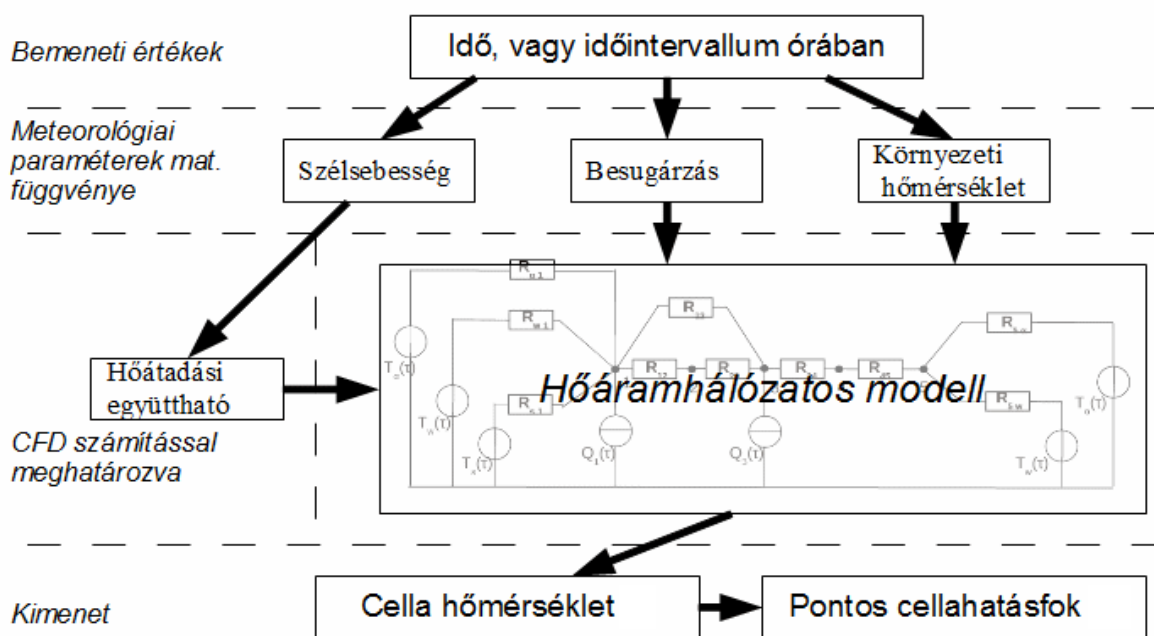
Meghatároztam a MHP PV/T modulok hőelvonási faktor ( $F_R$ ) tényezőjét, amely a mikro hőcsöves típusú kollektorokra eddig nem volt megadva, és igazoltam, hogy ez alkalmazható az éves kombinált hatásfok meghatározásához is.

#### 4. Komplex fotovillamos modellező rendszer

A hőáramhálózatos modellek, hőátadási együtthatók és meteorológiai modellek segítségével kidolgoztam egy új komplex energia-becslési rendszert, amely – mivel a PV és PV/T modulok hűtésére vonatkozóan validált adatokat dolgoz fel – alkalmazható energiatermelési adatok előrejelzésére.

A modellt mérésrel validáltam, amely a 3 éves átlagokra korrelációt mutat az éves mérésekhez képest.

Az eredmények igazolták, hogy az MHP PV/T alkalmazása esetén a fotovillamos hatásfok csökken, de a teljes (fotovillamos és termikus) hatásfok miatt nagyobb energiatermelést érhetünk el, mivel a kombinált hatásfok 23,22%.



## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az új tudományos eredményeim az eddigi legnagyobb részletességgel tárják fel a fotovillamos modulok energiaviszonyait, különös tekintettel a hőtranszport folyamatokra. A szél hűtő hatása eddig csak tapasztalati úton volt meghatározva a hatásfok-számítási modellekben, illetve konstans értékeket vettek figyelembe a hőátadási tényező meghatározásához. Az általam kidolgozott új, dinamikus HÁH-PV és HÁH-PVT modellel élőben lehet monitorozni a napelem cellák hatásfokát és ezáltal a villamos hálózat egyéb veszteségeit is minimalizálni. A modell alkalmas továbbá energia-termelési előrejelzésekhez is a meteorológiai modellek felhasználásával, amelyek paraméteridentifikációját a régióra elvégeztem és így a teljes modellt sikerrel alkalmaztam a referenciaépület napelemes rendszerének méretezésénél, amit a későbbi mérések is igazoltak. Az egyes modellekkel végzett energiatermelési szimulációkkal kimutattam, hogy a HÁH-PV alapú szimuláció és például a PV-GIS előrejelzés között éves szinten 2649,5 kWh eltérés is lehet, amely a jelenlegi energiaátvételi árakkal számolva 92700 Ft többletet mutat. Mindezek alapján megfontolandó tehát, hogy a megtérülési számításoknál az elterjedt, vagy a jelenleg ugyan kissé pesszimistának tűnő (HÁH-PV), de a PV rendszer élettartama alatt valószínűsíthetően jobban közelítő számítást alkalmazzuk, főleg egy nagy rendszer esetében, ahol ezen számok sokszorozódnak.

Az eredményeim alapján létrehozható egy teljes PV szimulációs szoftver. Ehhez el kell készíteni a meteorológiai modellek identifikációját geográfiai csomópontokra (pl. egy raszterhálóra osztva az országot és ezek csomópontjára), vagy a nagyobb városokra, illetve létre kell hozni egy eszköztárbázist, amely tartalmazza a régióban elterjedt napelemek és a szolgáltatói engedélyes inverterek fizikai tulajdonságait.

A meteorológiai modellekre alkalmazható az ASHRAE módszer, amellyel a napsugárzás direkt és diffúz komponenseit lehet szétválasztani és ezután a direkt komponenst egy adott kollektor síkra transzformálni.

Egy esetleges szoftverbe be lehet építeni az eredményeként kapott, telepítési helyzettől függő hőátadási tényezőket, és így még pontosabb előrejelzéseket lehet készíteni. A számítás által előrejelzett termelési adatok felhasználhatóak akár a villamos rendszerirányításban is, melyhez a meteorológiailag független alapadatokat szolgáltathatja.

Az eredményeim alapján javaslom a fotovillamos modulok minél körültekintőbb elhelyezését, hiszen a hőátadási tényezők vizsgálatának eredményeként a szabadon álló vagy a homlokzatra szerelt modulok rendelkeznek a legjobb körüláramlással. Ferde tetőre szerelt modulok esetén minimum 10 cm eltartással kell a tetővel párhuzamosan telepíteni a modulokat, míg lapos tetőre való telepítés esetén az épület széleitől távolabb (tehát a geometriai középpont köré) érdemes telepíteni.

Megvizsgáltam a fotovillamos és termikus kombinált modulok egyik speciális, újfajta típusát (MHP PV/T) és az erre szintén kidolgozott HÁH modell alapján objektív összehasonlító-vizsgálatot tudtam végezni a nem hűtött PV modulokkal. Az eredmények igazolják, hogy az MHP PV/T alkalmazása esetén a fotovillamos hatásfok csökken, de a teljes (fotovillamos- és termikus- együtt) hatásfok miatt nagyobb energiatermelést érhetünk el, ami abból is egyértelműen következik, hogy az éves fotovillamos hatásfok-különbség mindössze 0,07%.

Érdemes lenne az MHP PV/T modult dupla üvegezéssel tesztelni, hiszen a fotovillamos hatásfok a hűtés miatt nem romlana (csak a kettős üvegezés miatt a traszmittancia-hányados növekedésének értékével), viszont a termikus hatásfok jelentősen nőne.



## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

### FOTOVILLAMOS ÉS FOTOVILLAMOS-TERMIKUS RENSZEREK ENERGETIKAI MODELLEZÉSE

Jelen dologozatomban az általam készített összetett modellt ismertetem, amely többfelől járja körbe a fotovillamos modulok energiaviszonyai témakört. Számos paraméter, többek közt a szél általi körüláramlás minősége is fontos a fotovillamos modulok hatásfokának optimalizálása érdekében, de nem készült olyan komplex, átfogó munka, amely a konkrét hőátadási értékeket meghatározná, viszont a szakirodalomban számos kutatás található, amelyek az optimális elhelyezést vizsgálták.

Az általam kidolgozott módszer a hőátadási tényező numerikus meghatározására a fotovillamos modulok esetében egy újfajta megközelítés, amely pontos eredményeket ad a szélcsonna vizsgálatok alapján. Nincs arra lehetőség, hogy a modulokat a szimulációhoz hasonlóan ennyiféle környezeti behatásnak (szélirány, szélesség) megvizsgáljuk, illetve az erre alkalmas berendezések hozzáférhetősége korlátozott. A szimuláció által kapott eredmények pontossága megfelel a további alkalmazásokhoz, ahogy azt a szélcsonna mérésekkel való összehasonlítás mutatja.

Hőáramhálózatos modell és a Simulink – LabView modell validálása, a hozzá optimalizált mérőrendszerrel együtt hatékonyan képes számítani a cellahőmérsékletet és ezáltal a teljes napelemes rendszerre vonatkozóan alkalmazható. A komplex rendszer alkalmas arra, hogy a modellt működés közben validáljuk, tehát nem szükséges laboratóriumban, mesterségesen előállított környezet létrehozása, és így akár bármilyen meglévő vagy tervezendő rendszerrel alkalmazható, tehát általános érvényű.

A meteorológiai modellek identifikációja a régióra vonatkozóan megtörtént, amelyek alkalmasak sokféle mérnöki (épületfizikai, környezeti monitoring, megújuló energetika, passzív szolár hasznosítások, stb.) alkalmazásban való felhasználásra. Az egyes modellek (nap, szélesség, környezeti hőmérséklet) könnyedén kiterjeszthetők egyéb helyszínre a leírt módszer alapján, mivel nyílt forráskódú program lett alkalmazva az illesztéshez. Az ASHRAE módszer a direkt-diffúz napsugárzási komponensek szétválasztására az ilyen jellegű adatsorok esetében korábban nem került felhasználásra, így viszont a függvény alapú globál napsugárzási modell is transzformálható adott síkra.

A meteorológiai modell alapján számított szélesség adatból megadható a napelemek – a pillanatnyi körülményeknek megfelelő – hőátadási együtthatója. Ezt, a napsugárzást és a környezeti hőmérséklet értékeket átadva a hőáramhálózatos modellnek, alkalmas arra, hogy pontosan előrejelezze fotovillamos erőművek energiatermelését. Ez alapján – az összes magyarországi régióra feírva a meteorológiai modelleket, egy tervezők és mérnökök számára alkalmas szoftver kerülhet kifejlesztésre, mellyel a gazdasági megtérülés mértéke is ellenőrizhető. Ezt elősegíti a dolgozatban ismertetett nyílt forráskódú számítási módszer a meteorológiai adatokra való függvény illesztésekapcsán.

A kifejlesztett modell pontos eredményt ad a fotovillamos modul cellahőmérsékletének meghatározásában (ezen keresztül a mindenkori hatásfok számításához), így a tervezett fotovillamos erőművek megtérülése pontosabban számítható, ami a finanszírozás folyamán előnyökhöz juttathatja az alkalmazóját.

A modell könnyűszerrel kiterjeszthető fototermikus alkalmazások hatásfokának számításához is, ahogy az működik az MHP PV/T rendszerek esetében is a mellékletben látható példa alapján.

## 7. SUMMARY

### ENERGY MODELLING OF PHOTOVOLTAIC AND PHOTOVOLTAIC-THERMAL SYSTEMS

In this work a complex model is presented, which explores the photovoltaic modules energy properties topic from different sides. A number of parameters, including the quality of the flow around of PV modules is important in order to maximize the efficiency of photovoltaic modules, and there are no related previous and such complex and comprehensive work designed that would determine the specific heat transfer values, but several studies in the literature has been found that investigated the optimal placement of PV modules.

In my method for determining the numerical heat transfer coefficient for photovoltaic modules is a new approach that gives accurate results based on wind tunnel tests. There is no possibility to investigate so many kinds of environmental impacts (wind direction, wind speed, etc.) similar to the numerical simulations, or the availability of suitable equipment is limited. The accuracy of the results obtained by the simulation corresponds to other applications, as shown by a comparison with the wind tunnel measurements.

Heat resistant models and the validation of Simulink – LabView implementation of it, with the optimized metering system can together effectively calculate the temperature in the cell and thus can be used for the entire solar system. The complex system is adapted to validate the model, during operation, is therefore not required to create artificial environment in laboratory, and so can be applied to any existing or planned system is therefore generally applicable.

The identification of the meteorological models took place for the region, which are suitable for a wide range of engineering (building physics, environmental monitoring, renewable energy, passive solar utilization, etc) application use. The single functions for solar irradiation, wind speed and environmental temperature can easily extended for other locations through the described method, while an open source method was used for the function fitting. ASHRAE method of direct-diffuse solar radiation separation of components were not previously been used for this type of data series, however in this way the global function of solar radiation-based model can be transformed into a given plane.

Based on the meteorological model calculated wind speed data, the heat transfer coefficient – according to actual working circumstances can be defined. Giving this and the solar irradiation with the environmental temperature to the heat resistance model, makes it possible to develop a software for engineers and system planners that accurately predicts the energy output of photovoltaic power plants. The further developments of this software for wide range of locations is made possible by the open source fitting of the functions on meteorological database.

The developed model gives accurate results for the photovoltaic module cell temperature, in this way the recovery of the planned photovoltaic power plants can be calculated more precisely, which gives advantages for the applier during the financing.

The model can easily be extended for photothermal applications to calculate the junction temperatures and the efficiency through it, as it works for MHP PV/T systems too, as it is described in the appendix for flat plate collectors.

## 8. MELLÉKLETEK

**M1: Irodalomjegyzék**

1. A'ZAMI A.: Badgir in traditional Iranian architecture. Proceedings of International Conference. *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*, 2005: pp.1021-1026.
2. ANSYS INC. Fluent 6.1 User Guide. 2005.
3. BENNETT, I.J., DE JONG P.C., KLOOS M.J.H., STAM C.N.J., HENCKENS A.: Low-stress interconnection of solar cells. *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milan , 2007: pp. 2674–2678.
4. BERGENE T., LOVIK O.: Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy*, 1995, Vol. 55, pp. 453–462.
5. BLIESKE, U., DOEGE T., GAYOUT P., NEANDER M., NEUMANN D., PRAT A.: Light trapping in solar modules using extra-white textured glass. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003: pp. 188– 191.
6. BOHORQUEZ M.A.M., GÓMEZ J.M.E., MÁRQUEZ J.M.A.: A new and inexpensive temperature measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. *Solar Energy*, 2009: Vol. 83., pp. 883-890.
7. BORDIN, N., KREININ L., EISENBERG N. The use of the self-calibration method for accurate determination of silicon solar cell internal quantum efficiency. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000: Vol. 63., pp. 247-257.
8. BRETEQUE, EMMANUEL AMY. Thermal aspects of c-Si photovoltaic module energy rating. *Solar energy*, 2008: Vol. 83., pp. 1425-1433.
9. BRINKWORTH B.J.: Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts. *Solar Energy*, 2000: Vol 69, No 5, pp. 413-420.
10. BUZÁS, J., FARKAS I., BÍRÓ A., NÉMETH R.: Modelling and simulation aspect of a solar hot water system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1998: Vol. 48., pp. 33-46.
11. CARSTENSEN J.: CELLO an advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterisation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003: Vol. 76., pp. 599-611.
12. CZANDERNA A.W., PERN F.J.: Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1996: Vol. 43., pp. 101–181.
13. CSURGAY Á., SIMONYI K.: Az információtechnika fizikai alapjai. *BME-Mérnöktovábbképző intézet*, Budapest, 1997.
14. DAGHIGH, R., RUSLAN M.H., SOPIAN K.: Advances in liquid based PV/T collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011: Vol. 15., pp. 4156-4170.
15. DE JONG. P.: Achievements and challenges in crystalline silicon back-contact module technology. *Photovoltaics International*, 2010: Vol. 7.; pp. 138–144.
16. DUFFIE J. A., BECKMAN A.: *Solar engineering of thermal processes*, Wiley –New Jersey, 1998
17. EIKELBOOM, D., BULTMAN J., SCHOENECKER A., MEUWISSEN M., VAN DEN NIEUWENHOF M., MEIER D.: Conductive adhesives for low-stress interconnection of

- thin back-contact solar cells. *Proceedings of the International Conference PV in Europe*, 2011: pp. 291–294.
18. EPIA. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. *EPIA - European Photovoltaic Industry Association*, Brussels, 2014.
  19. EVANS D.L., FORSCHUETZ. L.W.: Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems. *Solar Energy*, 1977: Vol. 19., pp. 255-262.
  20. European Commission: Renewable energy progress report, [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-5180\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-5180_en.htm), Letöltve: 2015.július 1.
  21. FARBER E.A., MORRISON C. A.: Clear day design values. *Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*, 1977.
  22. FARKAS I.: Identification of flat plate solar collectors used in agriculture. *9th JFARS Symposium preprints*, 1991: Vol. 1., pp. 175.-179.
  23. FARKAS I.: Napenergia a mezőgazdaságban. *Mezőgazda*, Budapest, 2003.
  24. FARKAS I.: Számítógépes szimuláció. *SZIE*, Gödöllő, 1999.
  25. FARKAS I., RENDIK Z.: Handling of solar climatic data. *The International Journal of Ambient Energy*, 2003: Vol. 14, No. 2.
  26. FERZIGER J. H., PERIC M.: Computational Methods for Fluid Dynamics. *Springer Verlag*, Berlin, 2002.
  27. FREIBERG INSTRUMENTS GmbH, <http://www.freiberginstruments.com/technology/microwave-detected-photoconductivity-mdp.html>, Letöltve: 2014.09.01.
  28. FUENTES M. K.: A simplified thermal model for flat-plate photovoltaic arrays. *Sandia National Labs*, Albuquerque, 1985.
  29. FUJISAWA T., TANI. T.: Annual exergy evaluation on photovoltaic–thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997: Vol. 47, pp. 135–48.
  30. GAN G.: Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 2009: Vol. 83., pp. 1253–1273.
  31. GARBAI L., BÁNHIDI L.: Hőátvitel az épületgépészeti és ipari berendezésekben. *Műegyetemi Kiadó*, Budapest, 2001.
  32. GOETZBERGER A., VOß B., KNOBLOCH J.: Sonnenenergie: Photovoltaik. Physik und Tech-nologie der Solarzelle. *Teubner*, Berlin, 1997.
  33. GUIVARCH A., PEUPORTIER B.: Photovoltaic collectors efficiency accoring to their integration of building. *Solar Energy*, 2006: Vol. 80., pp. 65-77.
  34. HABER I., FARKAS I.: Analysis of the air-flow at photovoltaic modules for cooling purposes. *Pollack Periodica*, 2012: Vol. 7., pp. 113-121.
  35. HABER I., FARKAS I.: Determination of the heat transfer coefficient by pitched and flat roofs mounted PV modules. *Abstract Book of 5th PhD/DLA Symposium*, 2009: p. 25.
  36. HABER I., FARKAS I.: Épületekre szerelt fotovillamos modulok körüli levegő-áramlás vizsgálata a hőátadási tényező meghatározásához. *Proceedings of Alpok-Adria Passzívház Konferencia*, 2009.: pp. 360-362.
  37. HABER I., KISTELEGDI I., BÖTKÖS T., FARKAS I.: Modelling solar irradiation data for photovoltaic energy-yield prediction. *Pollack Periodica*, 2013: Vol. 8., pp. 27-34.
  38. HOTTEL H.C., WILLIER A.: Evaluation of flat-plate solar collector performance. *Transactions of the conference on the use of solar energy*, 1958: Vol 2., pp. 50-62.
  39. HOTTEL H.C., LIU J., JORDAN K.: A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 1976: Vol. 18.

40. ILICETO A., VIGOTTI R. The largest PV installation in Europe: Perspectives of multimegawatt PV. *Renewable Energy*, 1998: Vol 15., pp. 48-53.
41. IMRE L.: Hőátvitel összetett szerkezetekben. *Akadémiai Kiadó*, Budapest, 1983.
42. JENSEN N., RAU U., HAUSNER R.M., UPPAL S., OBERBECK M., BERGMANN R.B., WERNER J.H.: Recombination mechanisms in amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells, *Journal of Applied Physics*, 2000, Vol. 87., pp. 2639-2646.
43. JORGENSEN G.: Moisture transport, adhesion, and corrosion protection of PV module pack-aging materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010: Vol. 90(16): pp. 2739–2747.
44. KARIM R., AKHANDA M.A.R.: Study of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar systems using different ribbed surfaces opposite to absorber plate. *Journal of Engineering and Technology*, 2011, Vol. 9., pp. 17-30.
45. KAZMERSKI L.L.: Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1997: Vol. 1., pp. 71–170.
46. KEMPE M.: Evaluation of encapsulant materials for PV applications. *Photovoltaics International*, 2010: Vol. 9, pp. 170–176.
47. KEMPE M.: Design criteria for photovoltaic back-sheet and front-sheet materials. *Photovoltaics International*, 2008: Vol. 2., pp. 100–104.
48. KIM J.P., LIM H., SONG J.H., CHANG Y.J., JEON C.H.: Numerical analysis on the thermal characteristics of photovoltaic module with ambient temperature variation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011: Vol. 95., pp. 50-62.
49. KISTELEGDI I.: RATI Kft. gyárépület (személyes közlés). 2012.
50. KISTELEGDI I., BARANYAI B.: Windkanaluntersuchungen zwecks Quantifizierung und Validierung der Wirkung von Windinduktion. *Bauphysik*, 2012: Vol. 35., pp.229-237.
51. KLISE G.T., STEIN J.S.: Models used to assess the performance of photovoltaic systems. *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, 2009.
52. KOCSIS L., FARKAS I., ELSNER B.V., TANTAU H.J.: Calibration of solar radiation measuring equipment. *CD-ROM Proceedings of the 10th International Conference on Solar Energy in High Latitudes*, 2005: p. 8.
53. KONIORCZYK M., ÁDÁM P.: Bevezetés a mérési adatok számítógépes feldolgozásába. *University Press Pécs*, Pécs 2003.
54. LAJOS T.: Az áramlástan alapjai. *Műegyetemi Kiadó*, Budapest, 2004.
55. MAYFIELD R. The highs and lows of photovoltaic system calculations. *Electrical Construction and Maintenance*, 2012: pp. 12-18.
56. MÉSZÁROS CS., BUZÁS J., BÁLINT Á, FARKAS I., JANTA K. (2004): Napenergiával működő berendezések hatásfokának elméleti vizsgálata. *MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXVIII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás*. Gödöllő, 2004. jan. 20-21, 4. kötet 355-357. p.
57. MOSHFEGH B., SANDBERG M.: Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1998: Vol. 2., pp. 287-301.
58. NEANDER M., GROMBALL F., NEUMANN D., HARDER N.P., NOSITSCHKA W.A.: Anti-Reflective-Coating Tuned for Higher Solar Module Voltage. *Conference*

- Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2006: Vol. 2., pp. 2070–2072.
59. NEMCSICS Á.: A napelem és fejlesztési perspektívái. *Akadémiai Kiadó*, Budapest, 2001.
60. NORTON B.: Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 2011: Vol. 85., pp. 1629-1664.
61. PLATE E.J.: Urban Climates and Urban Climatic Modelling: An Introduction. *Nato ASI Series E: Applied Sciences*, 1993, Vol. 277, pp.23-39.
62. POULEK V., LIBRA M., JIRKA V., PERSIC I.: Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology, *Solar Energy*, 2012, Vol. 86, pp. 3103–3108.
63. PRAVETTONI M., GALLEANO R., FUCCI R., Characterization of high-efficiency c-Si CPV cells, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2011; Vol.11., pp. 898-907
64. QUAN Z., ZHAO Y., TANG X.: The experiment research for solar PV/T system based on flat plate heat pipes. *Proceedings of the 17th Chinese national HVAC&R academic conference*, 2010: pp. 51-56.
65. QUASCHNING V.: Photovoltaic systems technology fundamentals, *Renewable Energy World*, 2004, Vol. 7., pp. 81-84.
66. RADICS K., BÁTHORY J.: Természetes felszínek áramlásmódosító hatásának becslése. *HUNDEM*, 2006: 50-62.
67. RAMAPRABHA R., MATHUR B., SANTHOSH K., SATHYANARAYANAN S.: MATLAB based modelling of SPVA characterization. *Proceedings - 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 2010: pp. 334-339.
68. RICAUD A.: Photopiles solaires. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 1997: pp. 50-62.
69. ROSS R.G.: Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization. *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, 1980: 1126-1132.
70. ROSS, R.G., SMOKLER, M.I.: Flat-Plate Solar Array Project Final Report, *Engineering Sciences and Reliability*, 1986, Vol 4., pp. 26-31.
71. RUSIRAWAN D., FARKAS I.: Determination of optimum surface orientation for a 10 kWp grid-connected PV array, *Proceedings CD of International Conference on Agricultural Engineering (AgEng 2008)*, Hersonissos-Crete, Greece, June 23-25. 2008. p. 1-11.
72. SAKR R.Y., BERBISH N.S., ABD-ALZIZ A.A., HANAFI A.S.: Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer in horizontal Elliptic Annuli. *Journal of Applied Sciences Research*, 2008: Vol. 4., pp. 138-155.
73. SANDBERGEN R., VAN ZOLINGEN R.J.C.: The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, Vol. 92. pp. 432-444.
74. SERES, I., KOCSÁNY, I., FARKAS, I.: Spectral dependence of different PV module technologies, *Mechanical Engineering Letters*, Gödöllő, Hungary, 2014, Vol. 11, pp. 116-123, HU ISSN 2060-3789
75. SHARPLES S., CHARLESWORTH P. S.: Full scale measurement of wind induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, 1997: Vol. 62, No 2, pp. 69-77.



76. SKOPLAKI E., PALYVOS J.A.: On the temperature dependence of PV module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 2009: Vol. 83., pp. 614-624.
77. SZABÓ GY., TÁRKÁNYI ZS.: Napsugárzási adatok az építőipari tervezés számára. *Építéstudományi Intézet*, Budapest, 1969.
78. TÜV: Design qualifications and type approval of PV modules. *Test Centre for Energy Technologies, TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH*, Berlin, 2003.
79. YANG W.J., MA Z.Q., TANG X., FENG C.G., ZHAO W.G., SHI P.P.: Internal quantum efficiency for solar cells. *Solar Energy*, 2008: Vol. 82., pp. 106-111.
80. ZHAO Y., QUAN Z., TANG X.: Kínai szabadalom száma: CN 200820123998. 2008.
81. ZINßER B.: Jahresenergieertraege unterschiedlicher Photovoltaik-Technologien bei verschiedenen klimatischen Bedingungen. *Institut für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart*, Stuttgart, 2010.
82. ZONDAG H.A., DE VRIES D.W., VAN HELDEN W.G.J., VAN ZOLINGEN R.J.C., VAN STEENHOVEN, A.A.: The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. *Solar Energy*, 2002: Vol. 77., pp. 113-128.
83. ARIZONA STATE UNIVERSITY: PV Education – Spectral response, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/spectral-response>, Letöltve: 2015. július 1.
84. DEGERENERGIE GMBH., Napkövető rendszer működése, <http://www.degerenergie.de/en/higher-yield-how.html>, Letöltve: 2015. július 2.
85. ETSolar Ltd., Napelem modulok tulajdonságai, [www.etsolar.com/kk/upload/201503311036435665.pdf](http://www.etsolar.com/kk/upload/201503311036435665.pdf), Letöltve: 2015. augusztus. 3.
86. NAPLOPÓ Kft.: Napsugárzás térkép, <http://www.naplopo.hu/miert-napenergia/kimerithetetlen-tiszta-es-ingyenes>, Letöltve: 2015. július 1.
87. NREL – National Renewable Energies Laboratory: Research-Cell Efficiency Records, [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg), Letöltve: 2015. július 1.
88. NATIONAL SCIENCE FOUNDATION: PV quantum hatásfok, <http://www.pveducation.org/pvcdrom>, Letöltve: 2015. május 22.
89. SANDIA National Laboratories: PV system losses, [http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/modeling\\_stein\\_b.jpg](http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/modeling_stein_b.jpg), Letöltve: 2014. december 28.
90. SEMILAB Ltd.: WT-2000 LBIC measurements, [http://www.semilab.jp/products/semilab/\\_wt-2000\\_1.html](http://www.semilab.jp/products/semilab/_wt-2000_1.html), Letöltve: 2015. július 1.
91. SOLAR CHOISE Ltd, Two type of PV/T, <http://www.solarchoice.net.au/blog/solimpeks-hybrid-pv-thermal-solar-panels-in-australia/>, Letöltve: 2015. december. 26.
92. SOR Technologies Ltd., PV/T kollektorok két lehetséges megközelítése <http://www.sold-on-renewables.com/solarpvt.html>, Letöltve: 2015. május 20.
93. SZIE-FFT (Szent István Egyetem, Fizika és Folyamatirányítási Tanszék): A napelem sematikus vázlata, [http://fft.sziesz.hu/10kW/web/pvenl19\\_pvbasic.htm](http://fft.sziesz.hu/10kW/web/pvenl19_pvbasic.htm), Letöltve: 2014. július 1.

**M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk*****Lektorált cikk világnyelven***

1. **Haber, I.**, Farkas, I.: Combining CFD simulations with blockoriented heatflow-network model for prediction of photovoltaic energy-production, Journal of Physics, Vol. 268, 2011, IOP Publishing, pp. 1-7.
2. **Haber, I.**, Farkas, I.: Analysis of the air flow at photovoltaic modules for cooling purposes, Pollack Periodica, Vol 7. 2012, Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 113-121
3. **Haber, I.**, Farkas, I.: Monitoring the energy properties of photovoltaic modules, Electrotehnica, Electronica, Automatica, Vol 60. 2012, Editura Electra, Bucarest, pp. 13-19.
4. Kistelegdi, I., **Haber, I.**: Gebäudeaerodynamische Untersuchungen einer Plusenergie-Produktionsstätte mit passiven Lüftungstürmen in Sikonda (Südungarn), Bauphysik Vol. 34., Ernst & Sohn, Berlin, 2012, pp. 107-120, (IF 0,228)
5. **Haber, I.**, Bötkös, T., Farkas, I.: Modelling meteorological parameters in Pécs for photovoltaic energy simulations, Mechanical Engineering Letters, Vol. 8. 2012., pp. 68-76.
6. **Haber, I.**, Kistelegdi, I., Bötkös, T., Farkas, I.: Modelling solar irradiation data for photovoltaic energy-yield prediction, Pollack Periodica, Vol. 8. 2013., Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 27.-34.
7. **Haber, I.**, Kistelegdi, I., Farkas, I.: Investigation of the solar- and wind energy usage of a positive energy factory building, Technical Gazette Vol. 21., Osijek, 2014, pp. 1243–1248, (IF 0,579)

***Lektorált cikk magyar nyelven***

8. **Háber I.**, Farkas I.: Fotovillamos modulok körüli levegő-áramlás vizsgálata a hőátadási tényező meghatározásához, Magyar energetika, 2011, 02. sz., 28-31. o.
9. **Háber I.**, Farkas I.: Napelemes rendszerek energiaviszonyainak modellezése, Mezőgazdasági technika, 2012.07., LIII évf., 42-44. o.
10. **Háber I.**, Farkas I.: Micro heat pipe rendszerű PV/T kollektorok vizsgálata, Energiagazdálkodás, 2015, 56. évf., 5-6. sz., 30-35. o.

***Nemzetközi konferencia proceedings***

11. **Haber, I.**, Farkas, I.: Numerical determination of the heat transfer at free standing solar modules, ECT 2010 Valencia, Civil-Comp Press, Proceedings of Seventh International Conference on Engineering Computational Technology, 14-17 September 2010, Valencia, Spain, No. 132, pp. 1-13.
12. **Haber, I.**, Novak, N.: Composite alternative vehicle with solar equipment, Proceedings of the 1st Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education, 08-10. 12. 2011, Subotica, Serbia, pp. 192-200.

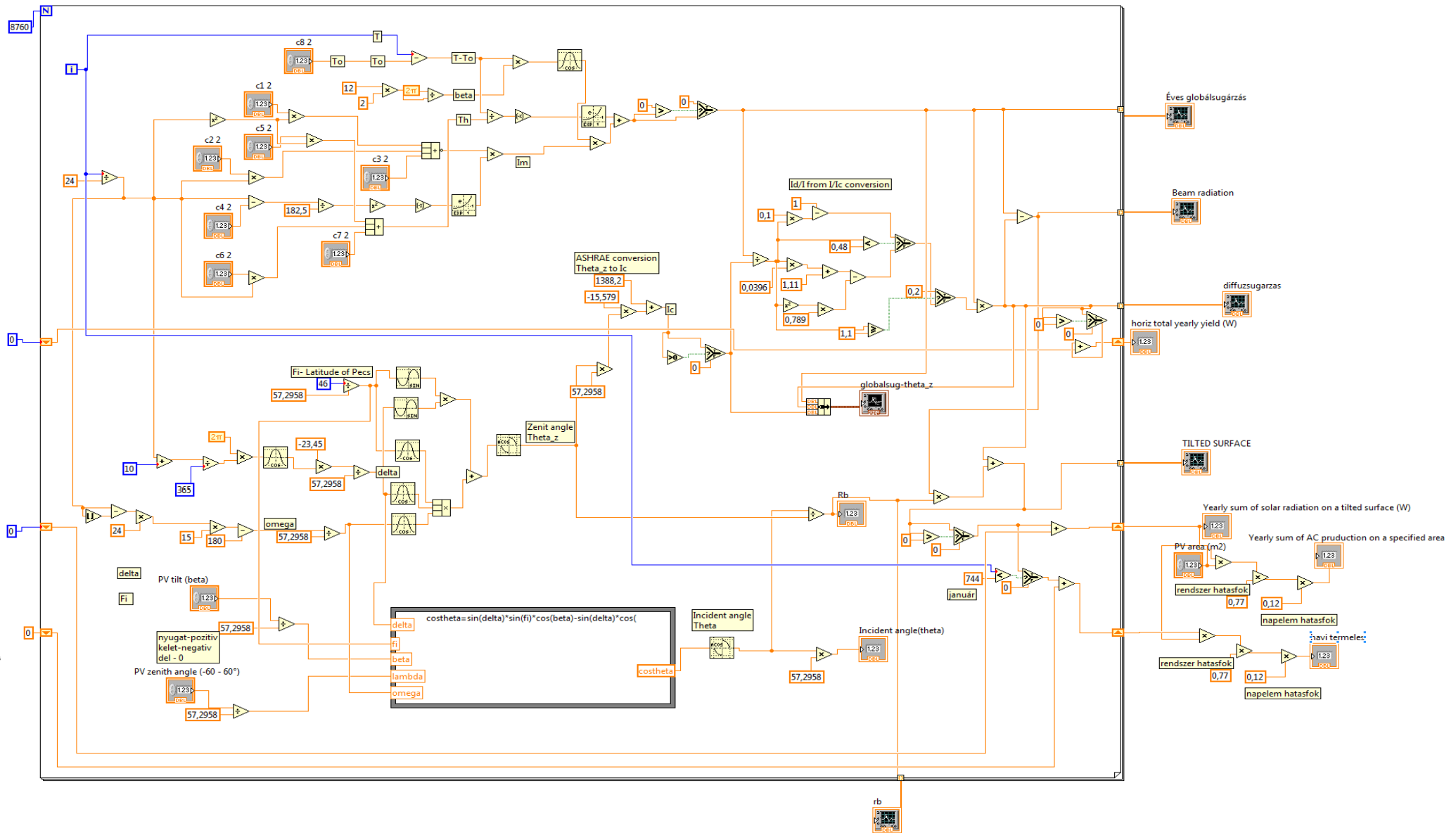
***Magyar nyelvű proceedings***

13. **Háber I.**, Farkas I.: Épületekre szerelt fotovillamos modulok körüli levegő-áramlás vizsgálata a hőátadási tényező meghatározásához, Alpok-Adria Passzívház Konferencia, Pécs, 2009. szept. 4.-5., Konferenciakötet, 360-362. o.
14. **Háber I.**, Farkas I.: Fotovillamos modulok energia-viszonyainak monitorozása, II. Környezet és Energia Konferencia, Debrecen, 2011. nov. 25.-26., Konferenciakötet, 208-212. o.

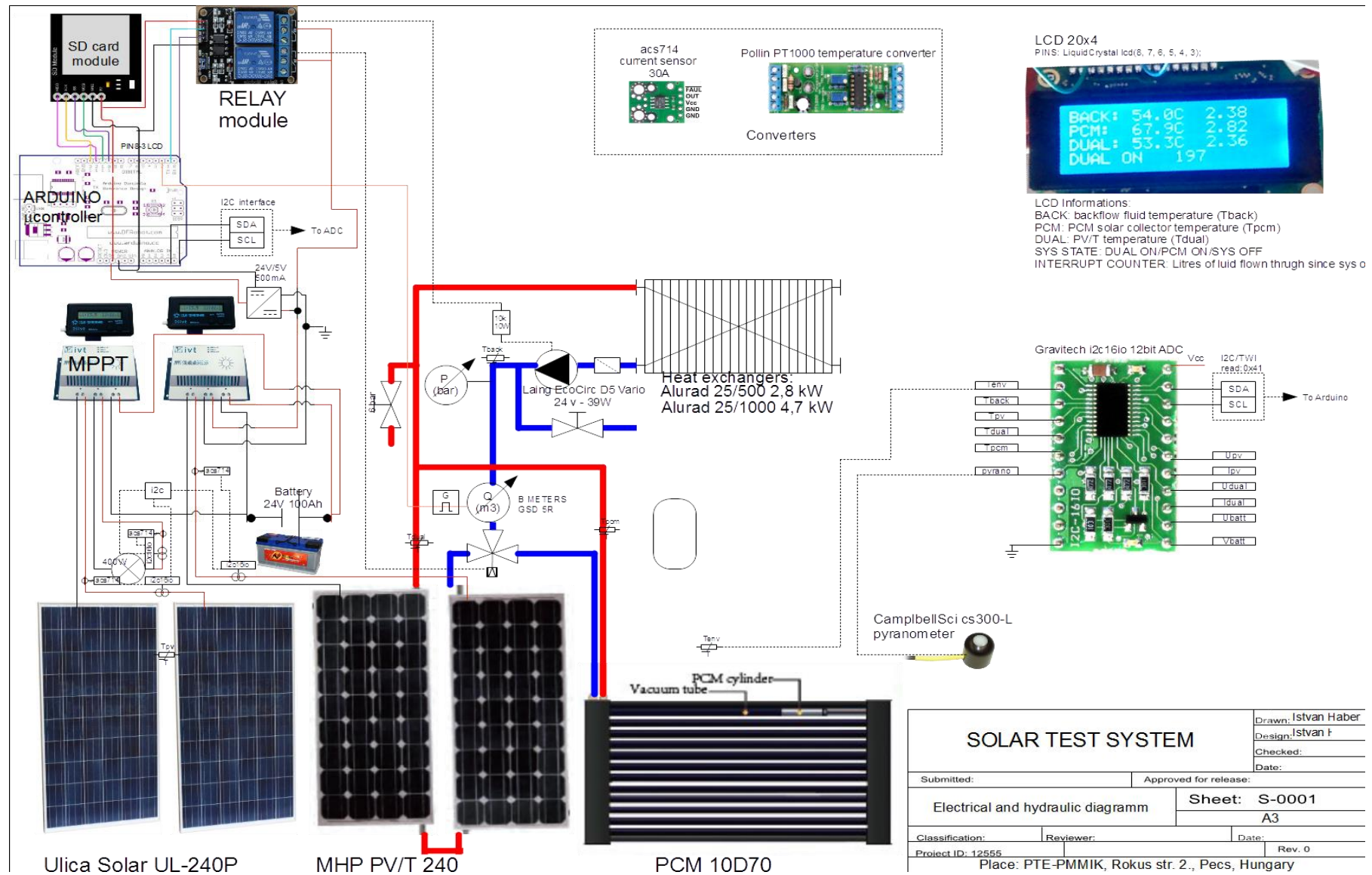
*Nemzetközi konferencia abstract*

15. **Haber, I.**, Farkas, I.: Mathematical modelling of the efficiency changing of photovoltaic modules in relation to the operating temperature, 4th PhD Symposium, Pécs, 16.10.2008, pp. 22.-23.
16. **Haber, I.**, Farkas, I.: Determination of the heat transfer coefficient by pitched and flat roofs mounted PV modules, 5th PhD/DLA Symposium, Pécs, 2009. okt. 19., p. 25.
17. **Haber, I.**, Farkas, I.: Numerical method for calculating heat losses by mounted PV modules, 15th Workshop on Energy and Environment, November 5-6, 2009., Gödöllő, Hungary, p. 13.
18. **Haber, I.**, Farkas, I.: Measuring and modeling of meteorological parameters for PV efficiency calculations, 16th Workshop on Energy and Environment, November 11-12, 2010., Gödöllő, Hungary, p. 18.
19. **Haber, I.**, Farkas, I.: Performance optimization of a large scale solar array, 17th Workshop on Energy and Environment, December 1-2, 2011., Gödöllő, Hungary, p. 12.
20. **Haber, I.**, Kistelegdi, I., Farkas, I.: Determination of PV efficiency losses at zero-energy factory building: a case study, 8th PhD/DLA Symposium, Pécs, 2012. okt. 20., p. 34.
21. **Haber, I.**: Pollack 21kW PV system: experiences and tasks, 10th PhD/DLA Symposium, Pécs, 2014, p. 31.

M3. A HÁH modellen alapuló program blokkdiagrammja



M4. A PV/T mérés kapcsolási rajza



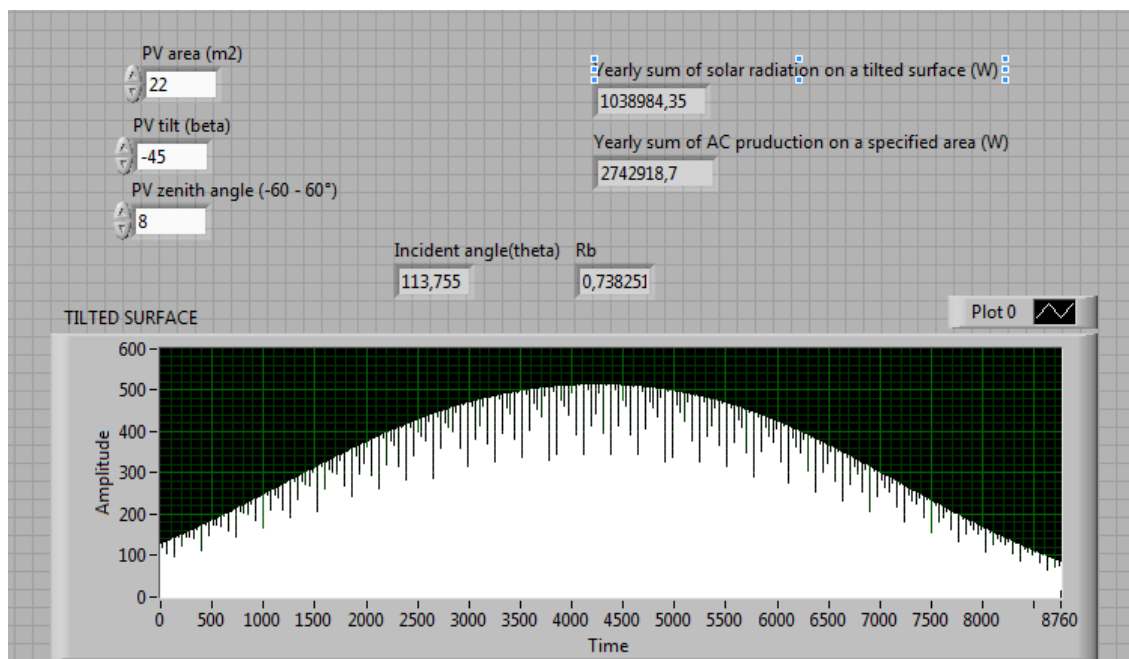
### M5. A napsugárzás modell felhasználása az épületenergetikában – a szoláris nyereségek számítása

A Rati Kft. gyárépületén 10 db Rehau Solect gyártmányú napkollektor is helyet kapott. Ezek összes hasznos abszorber felülete 22 m<sup>2</sup>, az adatlapja szerint.



M5.1. ábra. A napkollektor mező

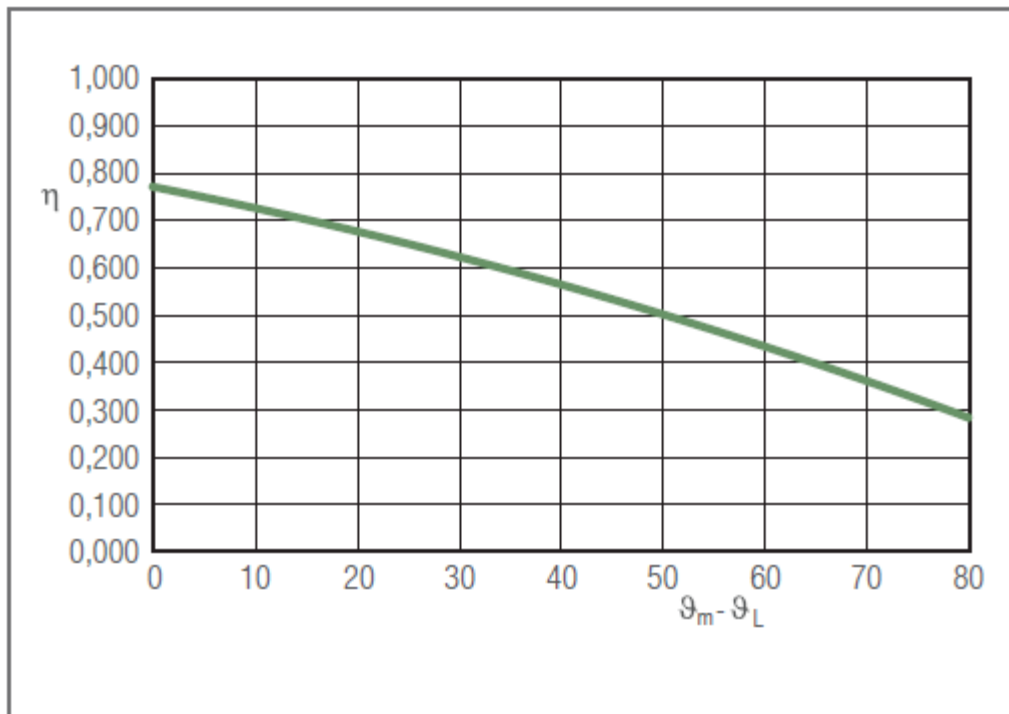
Nézzük meg először is, hogy mekkora sugárzás éri a kollektorok felületét. Ezt a fotovillamos rendszernél használt számítási módszerrel megtehetjük, a LabView-ban.



M5.2. ábra. A Rehau Solect kollektorok felületére eső sugárzás számítása

A számítás alapján a kollektorok felületét érő éves napenergia nagysága 2742918 Wh/a, azaz 2742,9 kWh/a. Ez igen nagy mennyiség mert ha megfigyeljük a Rehau Solect hatásfok görbét (M5.3. ábra), a hasznosított mennyiség akár 77% is lehet, de csak a legideálisabb körülmények között.





M5.3. ábra. A Rehau Solect síkkollektor hatásfok görbéje ( $E_g = 800 \text{ W/m}^2$ )

A kollektor hatásfok-jelleggörbéje a következő képlettel határozható meg:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1(\vartheta_m - \vartheta_L)}{E_g} - \frac{k_2(\vartheta_m - \vartheta_L)^2}{E_g}, \quad (\text{M5.1})$$

ahol  $\vartheta_m$  a hőhordozó közeg közepes hőmérséklete a kollektorban,  $\vartheta_L$  a környezeti levegő hőmérséklete,  $E_g$  a globálsugárzás és a konstansok ( $\text{W/m}^2$ ):

$$\begin{aligned} k_1 &= 3,494 \text{ W/m}^2\text{K} \\ k_2 &= 0,017 \text{ W/m}^2\text{K}^2 \\ \eta_0 &= 0,77 \end{aligned}$$

Ezek alapján, ahhoz, hogy számítani tudjuk a kollektor aktuális üzemeltetési paramétereinek hatásfokát, egy többváltozós függvényt kell megoldanunk, ahol a kollektorkör hőhordozó közegének hőmérséklete a legnehezebben meghatározható paraméter.

Jelen esetben olyan egyszerűsítéssel élünk, hogy a kollektorkör hőmérsékletét konstans  $45^\circ\text{C}$  fokban határozzuk meg, hogy az egy közelítő számítást tudjunk végezni. A napsugárzás számítása a PV rendszer esetében használt módszerrel történik, míg a környezeti hőmérsékletet egy korábbi munka alapján modellezzük (Haber, Farkas, 2011), ahol az alábbi függvény jó közelítéssel leírja a környezeti hőmérséklet változását Pécsre vonatkozóan.

$$t_w(\tau) = t_m \cos[\alpha(\tau - \tau_0)] + t_a, \quad (\text{M5.2})$$

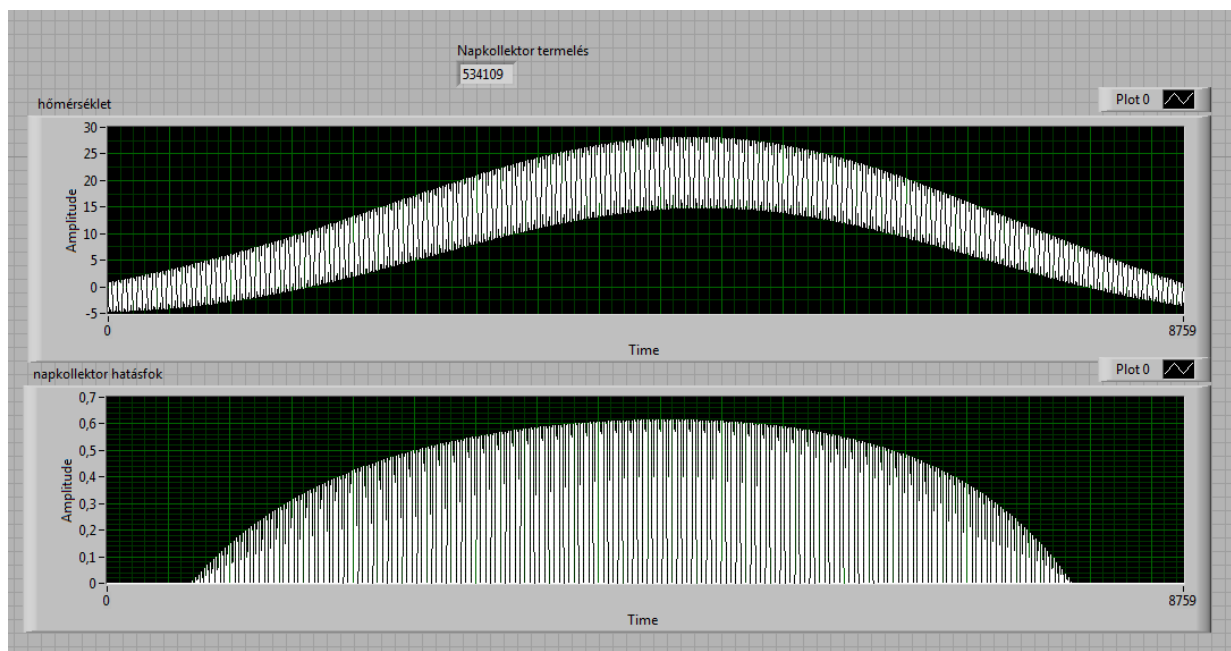
ahol  $\alpha = 2\pi/24$ ,  $\tau_0 = a_8$  és  $t_m$  (a koszinusz függvény amplitúdója):

$$t_m = [a_1 N_{day}^2 + a_2 N_{day} + a_3] \quad (\text{M6.2})$$

A paraméterek szintén a Marquart-Levenberg algoritmussal lettek meghatározva, több éves átlagértékekre való illesztéssel:

$$a_1 = -0.0001298, a_2 = 0.04555, a_3 = 2.689, a_4 = -0.000804383, a_5 = 0.305511, a_6 = -7.31937, a_7 = 212.189, a_8 = 14.0.$$

A következő ábrán láthatjuk a hőmérséklet és a kollektor hatásfokának változását.



M5.4. ábra. A hőmérséklet és a napkollektor hatásfokának változása

Láthatjuk, hogy a téli időszakban az egyszerűsített modell alapján a napkollektor éves energiatermelése a hatásfok változását is számítva 534,1 kWh/a, így az éves hatásfok 19,5%. Az ábrából jól látszik az is, hogy a téli hónapokban a modell alapján a hatásfok közelít a nullához, mivel itt a fényintenzitás értéke nem éri el a szükséges minimumot. Ehhez kapcsolódóan meg kell jegyezni, hogy a napsugárzás-modell a mérések átlagértékén alapul, így az időjárás változását nem veszi figyelembe (tehát a téli ritka napsütöses órákat), viszont tavasztól ősziig is sokéves átlagot ad, így az éves termelés kiegyenlítődhét.

Ezt a modellt még ki kellene egészíteni a kollektor hűtőfolyadék hőmérsékletének számításával, de ez főleg vezérlés kérdése, ami eme dolgozatnak nem tárgya.

Egy másik mód a termikus kollektorok hatásfokának meghatározására a (2.19) összefüggés szerint lehetséges. Az MHP PV/T kollektoroknak meghatároztuk az  $F_R$  tényezőjét (hőelvonási faktor) és a hőveszteségi tényezőt ( $U_L$ ), a  $\tau$  és  $\alpha$  ismert, a napsugárzás

$$\eta_t = \frac{F_R [I\tau\alpha - U_L(T_{be} - T_w)]}{I}$$

Vagy, ami a számítási módszer (LabView szimuláció) alapján még egyszerűbb, hogy kiszámoljuk a napkollektor felületre eső éves napenergia értékét, majd ezzel elosztjuk a kollektor által termelt energiát, amely a (2.15) összefüggéssel számolható:

$$Q_h = F_R A_k [I(\tau\alpha) - U_L(t_{be} - t_w)]$$

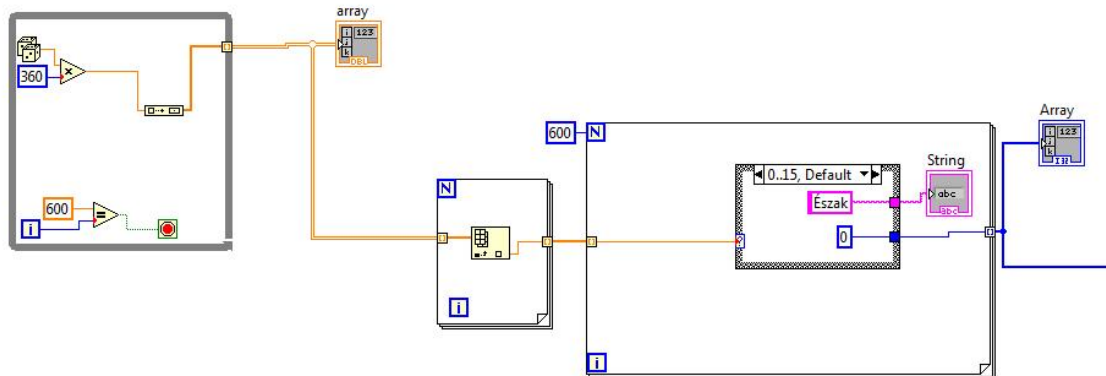
A módszer alapján az MHP PV/T kollektor éves termikus hatásfoka 8,58 %.

### M6. Szélirány naplózásának programozástechnikai sajátosságai

A meteorológiai mérőrendszer tartalmaz egy széliránymérőt, melynek segítségével a szél mozgását tudjuk nyomon követni. A műszer 0-tól 360 fokos mérési tartományban működik, ha ezeket az értékeket ki szeretnénk értékelni az eléggé nehézkes. Vegyünk egy egyszerű példát. Van egy 90°-os keleti értékünk és egy 270°-os nyugati értékünk és átlagolni szeretnénk akkor kijön egy 180°-os déli érték, pedig a vizsgált időintervallumban nem is volt déli szél.

A megoldás, hogy a 360°-os kört felosztjuk 12 cikkre (amelyeket elnevezhetünk az égtájak szerint), minden cikk 30°. A rendszer másodpercenként vesz mintát így 10 perc alatt 600 minta lesz. Figyeljük a beérkező minták gyakoriságát, számoljuk melyik égtáj hányszor fordult elő és a legnagyobbat írjuk ki a report fájlba.

A programot részenként elemezzük.



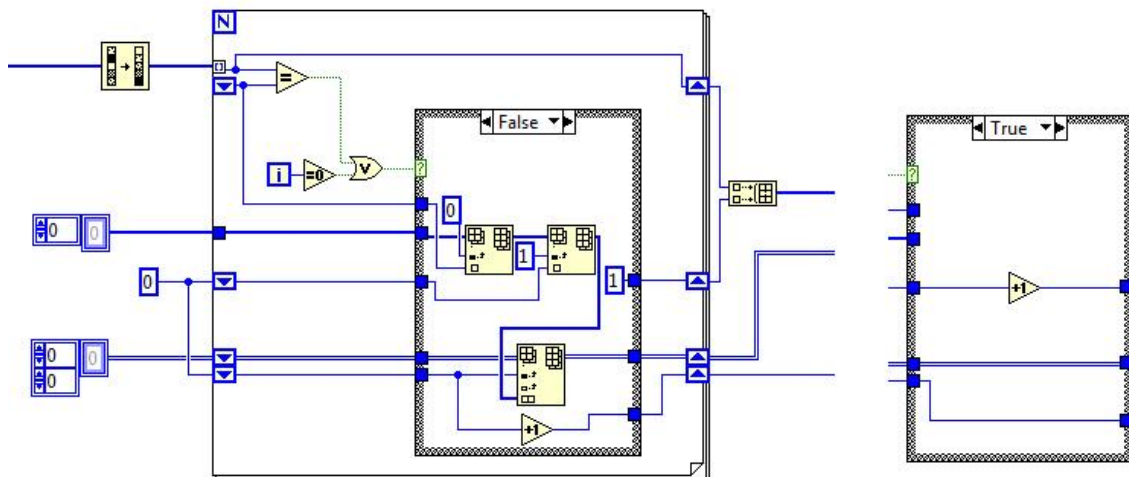
M6.1. ábra. Minta generálás és az égtájak

A próba során egy külön vi fájlban lett megoldva a feladat a tesztelhetőség és a könnyebb feladatmegoldás érdekében. A mintákat véletlenszám generátor segítségével állítottam elő.

Először is van egy while ciklus amiben generáljuk a mintákat az égtájakhoz és a ciklus addig fut amíg el nem érjük a 600 értéket. A mintákat egy tömbben tároljuk és az Index Array segítségével felindexelődnek. Az értékeink bemennek egy for ciklusba ami 600-szor fut le. A for cikluson belül látható egy case struktúra ahol megadjuk az égtájaknak megfelelő fokok intervallumát, a megnevezéseket és a konstans értéket. Az égtájakhoz tartozó intervallumok a következő képen néznek ki:

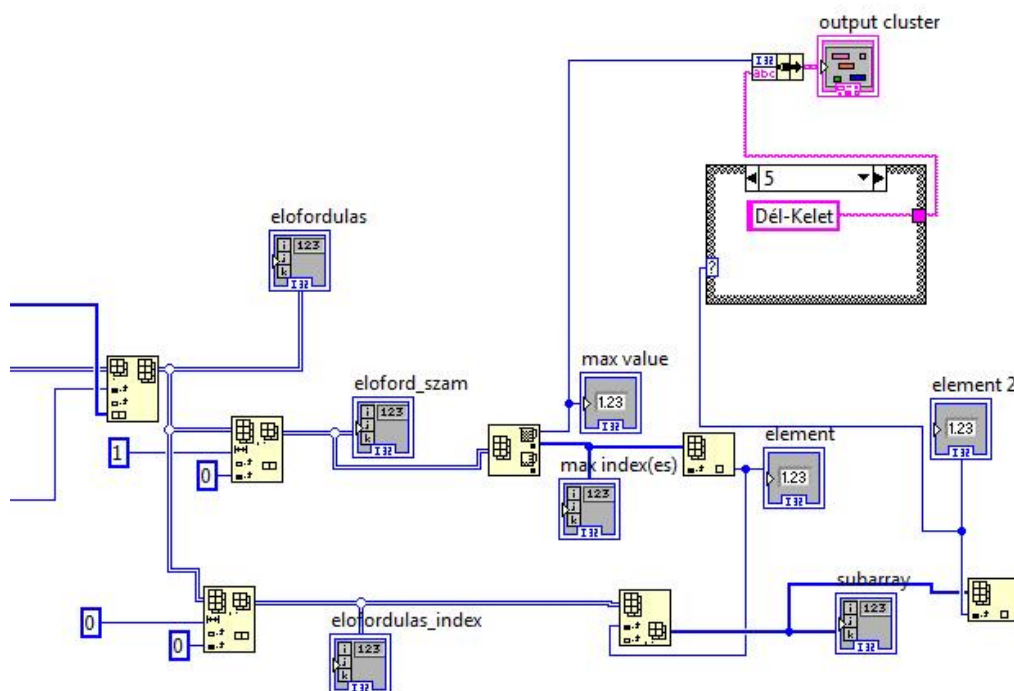
- Észak  $346^\circ - 15^\circ$
- Észak - Kelet  $16^\circ - 45^\circ$
- Kelet - Észak  $46^\circ - 75^\circ$
- Kelet  $76^\circ - 105^\circ$
- Kelet - Dél  $106^\circ - 135^\circ$
- Dél - Kelet  $136^\circ - 165^\circ$
- Dél  $166^\circ - 195^\circ$
- Dél - Nyugat  $196^\circ - 225^\circ$
- Nyugat - Dél  $226^\circ - 255^\circ$
- Nyugat  $256^\circ - 285^\circ$
- Nyugat - Észak  $286^\circ - 315^\circ$
- Észak - Nyugat  $316^\circ - 345^\circ$

Az égtájakhoz tartozó konstans értékek egy tömbben tárolódnak.



M6.2. ábra. Előfordulások vizsgálata

Az előfordulásokhoz társítunk egy referencia számot, ahol az adott szám megfelel egy égtájnak. Az első alkalommal mikor bejön egy égtáj azt letároljuk és adunk neki egy értéket. Ha már a bejött égtáj létezik akkor az előfordulását 1-el növeljük.

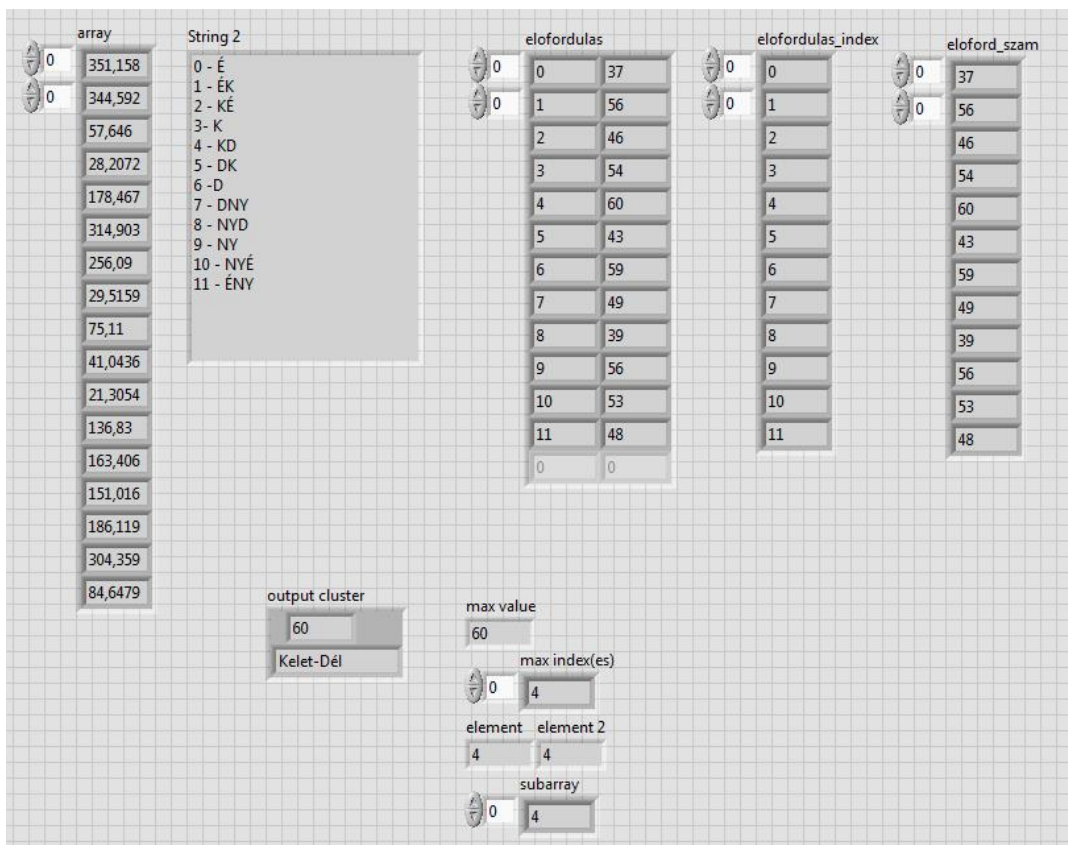


M6.3. ábra. A legnagyobb érték kiírása

Miután megtörtént az előfordulások vizsgálata, a legnagyobb érték megkeresése szükséges. A for cikusból kijövő érték keresztül megy egy Insert Into Array-en ami beszűr egy elemet az n-dimenziós tömbbe annál a pontnál ahol az indexben megadásra került. Így megadható az égtájak előfordulásának gyakoriságai. Ahhoz, hogy ezt vizsgálni tudjuk, az előfordulást szét kell választani "előfordulás számára" és "előfordulás indexére", ebben a Delete From Array van segítségünkre. Az előfordulás számánál az Array Max & Min alkalmazásával választjuk ki a legnagyobb értéket. A subarray arra szolgál, hogy megszámolja miből van a legtöbb majd az megad egy indexet és ha a generálásnál megfelelő az index, ezért a referenciaszámok közül azt az indexet vesszük ki. A végén még látható egy case struktúra ahol az égtájakhoz tartozik egy esetszám. Ezek a következők:

- Észak 0
- Észak - Kelet 1
- Kelet - Észak 2
- Kelet 3
- Kelet - Dél 4
- Dél - Kelet 5
- Dél 6
- Dél - Nyugat 7
- Nyugat - Dél 8
- Nyugat 9
- Nyugat - Észak 10
- Észak - Nyugat 11

Végezetül a maximum érték és az égtáj össze van fűzve egy Bundle-ben és az eredmény az Ourput Cluster-en jelenik meg.

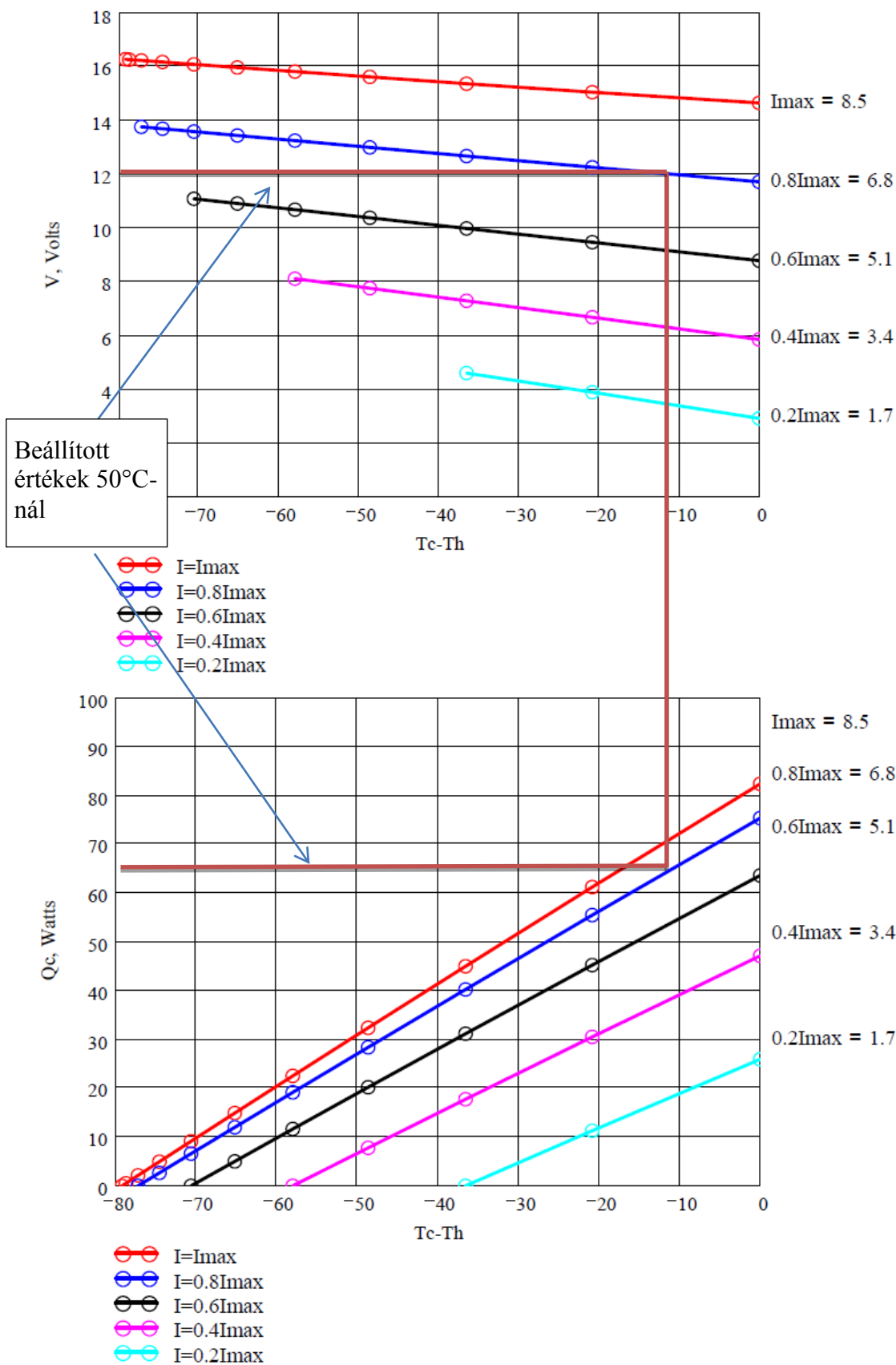


M6.4. ábra Égtáj program futás közben

Bal oldalt a tömbben láthatjuk a generált mintákat és mellette egy jelmagyarázat táblázatot. Az előfordulás tömbben látható, hogy a 4-es indexű elem (Kelet - Dél) hatvanszor fordult elő, így a vizsgálatot követően kiderült, hogy a max value a 60 és a max index(es) pedig a 4. A végeredmény jól látható az Output Cluster-ben.

**M7. Melléklet: Peltier elem hőmérsékletének beállítása**

TM-127-1.4-8.5 típusú Peltier-elem karakterisztika görbéi,  $T_h=50^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  környezeti hőmérsékletnél





## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Farkas István professzor úrnak a kutatómunkám végzéséhez szükséges feltételek, valamint a megfelelő tudományos fórumokon való publikálási lehetőségek biztosítását. Emellett köszönöm a SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék munkatársainak is a segítséget, Dr. Seres Istvánnak, Dr. Buzás Jánosnak, Gécziné Dr. Víg Piroskának.

Köszönöm a segítséget tanszéki kollégáimnak (PTE-MIK, Műszaki Informatika Tsz.), akikhez bármikor fordulhattam segítségért, és kiemelten a technikai megvalósításhoz szükséges segítséget Kürtös Juliannának és Boros Gábor korábbi hallgatónak.

Köszönöm a Bötkös Tamás (OMSZ) segítségét a meteorológiai adatok feldolgozásában.

Köszönöm Prof. Dr. Kistelegdi Istvánnak és Dr. Baranyai Bálintnak, hogy kapcsolódó projekteken résztvehettem.

Köszönöm a támogatását Dr. Szakonyi Lajosnak korábbi tanszékvezetőmnek és Dr. Iványi Amália professzorasszonynak a biztatását és támogatását.

Nagy segítségemre volt az előrehaladásban, hogy a vezetésemmel szerveződött hallgatói csoportra, a Pollack Eco Team-re, bármikor számíthattam akár kivitelezésben, akár a technikai háttér biztosításáról volt szó.

Kiemelten köszönöm családom támogatását és mindenkori segítségét, továbbá kislányom Háber Dorottya türelmét.

Köszönetemet fejezem ki mindazok felé, akiket név szerint ugyan nem tudtam itt megemlíteni, de valamilyen módon hozzájárultak e munka létrejöttéhez.

Pécs, 2016. április 1.

Háber István