

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Autori:

Laurențiu Fara (coordonator și editor), **Mihai Răzvan Mitroi** (editor), **Corneliu Cincu**, **Cătălin Zaharia**, **Silvian Fara**, **Dumitru Finta**, **Dragoș Comăneci**, **Mihai Iancu**

Fizica și tehnologia celulelor solare și sistemelor fotovoltaice, București: Editura Academiei Oamenilor Știință din România, 2009

ISBN 978-606-92161-1-8

Referenți științifici:

Prof. Univ. Dr. Paul Sterian

Prof. Univ. Dr. Constantin Roșu

Conf. Univ. Dr. Emil Petrescu

Director Editura AOȘ-R: Liviu Mihai Sima

Editori: Laurențiu Fara, Mihai Răzvan Mitroi

Procesare text: Dragoș Comăneci

Coperta: Dragoș Comăneci

© Copyright 2009

Toate drepturile prezentei ediții sunt rezervate autorilor. Nici o parte din această lucrare nu poate fi reprodusă, stocată sau transmisă sub indiferent ce formă fără acordul prealabil scris al autorilor.

Tipografia ECAS:

Adresa: Șos. Mihai Bravu nr. 108, București, România,
TEL: +40-21-2527518, FAX: +40-21-2527519

ACADEMY OF ROMANIAN SCIENTISTS



Laurențiu Fara
coordonator și editor

Mihai Răzvan Mitroi
editor

Corneliu Cincu

Vladimir Iancu

Cătălin Zaharia

Silvian Fara

Dumitru Finta

Dragoș Comănechi

Mihai Iancu

**FIZICA ȘI TEHNOLOGIA CELULELOR
SOLARE ȘI SISTEMELOR
FOTOVOLTAICE**

**Editura
ACADEMIEI OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA
București, 2009**

Contribuția autorilor la elaborarea cărții a fost următoarea:

CAP. 1 Radiația solară

Prof. Univ. Dr. Laurențiu Fara: 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5

Conf. Univ. Dr. Mihai Răzvan Mitroi: 1.4, 1.5

Dragoș Comănești: 1.3, 1.5

CAP. 2 Fizica conversiei fotovoltaice

Prof. Univ. Dr. Laurențiu Fara: 2.1

Șef Lucr. Univ. Dr. Vladimir Iancu: 2.2

CAP. 3 Tehnologii ale celulelor solare convenționale și nanostructurate

Conf. Univ. Dr. Mihai Răzvan Mitroi: 3.1, 3.2, 3.3

Șef Lucr. Univ. Dr. Vladimir Iancu: 3.1, 3.2

Prof. Univ. Dr. Corneliu Cincu: 3.4, 3.5

Șef Lucr. Univ. Dr. Cătălin Zaharia: 3.4, 3.5

CAP. 4 Componente fotovoltaice

Ing. Silvian Fara: 4.1, 4.2

Ing. Mihai Iancu: 4.1, 4.2

CAP. 5 Sisteme fotovoltaice

Prof. Univ. Dr. Laurențiu Fara: 5.1, 5.2, 5.3, 5.4

Conf. Univ. Dr. Mihai Răzvan Mitroi: 5.3, 5.4

Dragoș Comănești: 5.4

CAP. 6 Testarea și monitorizarea sistemelor fotovoltaice

Ing. Silvian Fara: 6.1, 6.2, 6.3

Ing. Mihai Iancu: 6.1, 6.2, 6.3

CAP. 7 Utilizarea sistemelor fotovoltaice

Prof. Univ. Dr. Laurențiu Fara: 7.1

Ing. Silvian Fara: 7.2

Ing. Mihai Iancu: 7.2

CAP. 8 Analiza economică și de mediu

Ing. Dumitru Finta: 8.1, 8.2, 8.3

CUPRINS

PREFATĂ	11
CAP. 1 RADIATIA SOLARĂ	15
1.1 Caracteristicile radiației solare	15
1.1.1 Radiația corpului negru	15
1.1.2 Radiația solară globală, directă și difuză	17
1.2 Mișcarea aparentă a soarelui și relațiile pentru calculul poziției soarelui	21
1.3 Modelarea radiației solare	23
1.3.1 Modele de transpoziție	24
1.3.2 Modele meteorologice	30
1.3.3 Modele de satelit	32
1.3.4 Modele stocastice	36
1.4 Simularea radiației solare	38
Bibliografie	40
CAP. 2 FIZICA CONVERSIEI FOTOVOLTAICE	47
2.1 Fizica celulei solare	47
2.1.1 Parametrii celulei solare	50
2.1.2 Răspunsul spectral al celulei solare	51
2.1.3 Efectul de temperatură	53
2.1.4 Efectul rezistențelor parazite	55
2.1.5 Pierderile optice ale celulei solare	57
2.1.6 Pierderi prin recombinare	60
2.2 Limitări fizice ale conversiei fotovoltaice	61
2.2.1 Limitări termodinamice	62
2.2.2 Corecțiile introduse de atmosferă	64
2.2.3 Balanța energetică detaliată	66
2.2.4 Factori suplimentari de limitare a randamentului de conversie	70
2.2.5 Modalități de ameliorare a randamentului de conversie	73

Bibliografie	77
--------------------	----

CAP. 3 TEHNOLOGII ALE CELULELOR SOLARE CONVENȚIONALE ȘI NANOSTRUCTURATE 80

3.1 Tehnologia celulelor solare convenționale cu siliciu mono și policristalin.....	80
3.1.1 Stadiul actual	80
3.1.2 Celule solare pe bază de siliciu monocristalin	81
3.1.3 Celule solare moderne pe bază de siliciu monocristalin.....	85
3.1.4 Celule solare cu strat subțire de siliciu cristalin..	91
3.2 Tehnologia celulelor solare convenționale, cu siliciu amorf	102
3.2.1 Metode de depunere	104
3.2.2 Celule unijonțiune.....	113
3.2.3 Module și producție industrială	115
Bibliografie	116
3.3 Tehnologia celulelor solare nanostructurate cu straturi subțiri (multistrat).....	122
3.3.1 Aspecte fundamentale privind celulele solare nanostructurate	122
3.3.2 Celule solare nanostructurate CdS/CdTe – CIS	124
3.3.3 Caracterizarea stratului nanostructurat și a celulei solare	128
3.3.4 Heterojonțiuni și diode Schottky în membrane nanoporoase	132
Bibliografie	137
3.4 Tehnologia celulelor solare cu coloranți organici	139
3.4.1 Aspecte generale.....	139
3.4.2 Celule solare cu electrod de TiO ₂ (DSSC-TiO ₂)	142
3.4.3 Celule solare cu electrod ZnO (DSSC-ZnO).....	157
3.4.4 Perspectivele celulelor solare cu coloranți organici	167

3.5	Tehnologia celulelor solare cu polimeri.....	168
3.5.1	Aspecte generale	168
3.5.2	Celule solare în tandem pe baza de polimeri	170
3.5.3	Celule solare polimerice cu suprafață mare obținute prin imprimare cu matase (prototip aplicabil industrial).....	176
3.5.4	Celule solare biodegradabile.....	180
	Bibliografie	189
CAP. 4	COMPONENTE FOTOVOLTAICE	194
4.1	Module și panouri fotovoltaice - caracterizare și tehnologie.....	194
4.1.1	Introducere	194
4.1.2	Caracteristicile modulelor fotovoltaice.....	198
4.1.3	Amplasamente/poziționare.....	207
4.1.4	Instalarea panourilor fotovoltaice	211
4.1.5	Module PV integrate în clădiri (BIPV).....	215
4.2	Componente BOS (regulatoare, baterii de stocare, invertoare și altele) –caracterizare și tehnologie.....	217
4.2.1	Regulatoare de încărcare	217
4.2.2	Sisteme de stocare a energiei	223
4.2.3	Invertoarele	233
4.2.4	Redresoarele.....	243
4.2.5	Convertoare rotative.....	244
4.2.6	Circuite de conversie c.c.- c.c.	245
	Bibliografie	246
CAP. 5	SISTEME FOTOVOLTAICE	250
5.1	Sisteme fotovoltaice (PV) autonome.....	250
5.1.1	Structura unui sistem fotovoltaic autonom	250
5.1.2	Probleme ale dimensionării sistemelor fotovoltaice autonome.....	253
5.2	Sisteme fotovoltaice PV conectate la rețea	259

5.2.1	Structura unui sistem fotovoltaic conectat la rețea.	259
5.2.2	Probleme ale dimensionării unui sistem PV conectat la rețea.....	260
5.3	Modelarea și simularea panourilor fotovoltaice.	261
5.3.1	Modelul celor 5 parametri	262
5.3.2	Modelul King.....	265
5.3.3	Modelul Luft.....	268
5.3.4	Modelul lui A. Hadj Arab.....	270
5.3.5	Compararea celor patru modele	272
5.4	Simularea sistemelor fotovoltaice	274
5.4.1	Programe de simulare specializate	274
5.4.2	Studiu de caz: Programul HOMER.....	281
5.4.3	Simularea sistemelor fotovoltaice prin utilizarea PSpice și Matlab.....	285
	Bibliografie	288

CAP. 6 TESTAREA, MONITORIZAREA ȘI ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII SISTEMELOR FOTOVOLTAICE 292

6.1	Testarea sistemelor fotovoltaice.....	292
6.1.1	Performanțele instalațiilor de măsură la sistemele fotovoltaice.....	292
6.1.2	Măsurători de diagnosticare	304
6.1.3	Fiabilitatea modulelor și testul de calificare.....	305
6.2	Monitorizarea sistemelor fotovoltaice.....	314
6.2.1	Echipamente de monitorizare	319
6.2.2	Calibrarea sistemelor fotovoltaice.....	322
6.2.3	Stocarea și transmisia datelor	322
6.2.4	Regimuri de monitorizare.....	326
6.3	Îmbunătățirea performanțelor sistemelor fotovoltaice	331
6.3.1	Tehnologii de condiționare a puterii	331
6.3.2	Pierderi de energie la sistemele PV	335

Bibliografie	339
CAP. 7 UTILIZAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE	344
7.1 Arhitectura solara fotovoltaica. Sisteme BIPV ..	344
7.1.1 Aspecte conceptuale și de piață privind sistemele BIPV	344
7.1.2 Elemente tehnologice inovatoare în sistemele BIPV	347
7.1.3 Studii de caz: sisteme BIPV realizate în Uniunea Europeană	349
7.1.4 Realizarea unui sistem BIPV demonstrativ integrat la Universitatea Politehnica din București (UPB).	356
Bibliografie	364
7.2 Sisteme PV hibride.....	366
7.2.1 Aspecte de bază referitoare la sistemele hibride de producere a energiei electrice	366
7.2.2 Tipuri de sisteme PV hibride (HPS)	373
7.2.3 Reguli pentru proiectarea unui sistem PV hibrid.....	376
7.2.4 Sisteme hibride legate la rețea	377
7.2.5 Sisteme PV hibride pentru locuri izolate	379
Bibliografie	382
CAP. 8 ANALIZA ECONOMICĂ ȘI DE MEDIU A SISTEMELOR FOTOVOLTAICE	384
8.1 Analiza economică	384
8.1.1 Perioada de recuperare (amortizare)	385
8.1.2 Calculul costului ciclului de viață.....	386
8.1.3 Factorul de valoare actuală	386
8.1.4 Evaluarea economică a diferitelor soluții tehnice de alimentare cu energie electrică a unui consumator dintr-un site izolat.....	388

8.1.5	Tendințe actuale în evoluția prețurilor pentru principalele componente ale unui sistem PV	396
8.2	Analiza de mediu.....	401
8.2.1	Aspecte generale.....	401
8.2.2	Impactul sistemelor PV asupra mediului.....	402
8.3	Perspective de dezvoltare a sistemelor fotovoltaice în România	405
	Bibliografie	408

PREFAȚĂ

Conversia fotovoltaică a energiei solare reprezintă una dintre cele mai atractive și dinamice opțiuni de utilizare a surselor regenerabile de energie, pentru producerea de energie electrică.

În ultimii 10 ani, piața fotovoltaică (PV) a cunoscut o creștere spectaculoasă. La sfârșitul anului 2008, capacitatea PV instalată pe plan mondial a atins valoarea de 15 GW. Uniunea Europeană își păstrează poziția de lider, deținând 65% din capacitatea globală instalată (9 GW), fiind urmată de Japonia (15 %) și de SUA (8%). În 2008, producția totală estimată de energie electrică bazată pe PV a atins valoarea de 16,5 TWh. Este de remarcat saltul spectaculos înregistrat de piața fotovoltaică din Spania, de la o capacitate instalată în 2007 de 560 MW, la o capacitate instalată în 2008 de aproximativ 2,5 GW. A doua țară europeană cu o contribuție de excepție în domeniul capacității PV instalate, este Germania, cu 1,5 GW.

În ceea ce privește producția de celule solare, în ultimul an s-a înregistrat o creștere remarcabilă a volumului producției, de la 4,3 GW în 2007, la 7,9 GW în 2008. Compania germană *Q-Cells SE* s-a definit drept compania conducătoare pe plan mondial în domeniul tehnologiilor fotovoltaice, producând 0,58 GW în 2008. Tehnologiile PV ce utilizează celule solare cu siliciu monocristalin și policristalin contribuie cu 88% la producția de module PV în 2008. Totodată,

modulele PV cu straturi subțiri joacă un rol din ce în ce mai mare, această tehnologie fiind dezvoltată de *First Solar Inc.* (cel mai mare producător pe plan mondial). O altă tehnologie în plină ascensiune este tehnologia fotovoltaică cu concentrare. Este de remarcă poziția de lider mondial în domeniul fotovoltaic a Chinei, cu o capacitate de producție de celule solare de 2,6 GW. Pe locul 2 se situează Germania cu o producție de 1.5 GW, urmată de Japonia cu 1,2 GW.

Prezenta monografie științifică reprezintă al III-lea volum al seriei monografice *Nanotehnologiile și provocările dezvoltării durabile*, care a fost publicată în ultimii 3 ani. Celelalte două volume au fost: ***Bazele fizice ale nanotehnologiilor. Aplicații și perspective*** (2007) și ***Modelarea și simularea numerică a celulelor solare nanostructurate*** (2008). Cartea este structurată pe 8 capitole. Sunt prezentate atât rezultate originale ale autorilor, cât și probleme sintetice esențiale, prelucrate pe baza literaturii de specialitate, privind modelarea și tehnologia celulelor solare și sistemelor fotovoltaice.

În primul capitol sunt discutate aspectele de bază ale radiației solare, fiind discutate apoi principalele categorii de modele ale radiației solare (de transpoziție, meteorologice, de satelit și stocastice); în continuare este analizat un exemplu de simulare, programat în Java. Capitolul al doilea - Fizica conversiei fotovoltaice - abordează două probleme cheie, respectiv: 1) fizica celulei solare (fiind prezentați parametrii celulei solare, răspunsul spectral, efectul de temperatură, efectul rezistentelor parazite, precum și pierderile optice și prin recombinare) și 2) limitări fizice ale conversiei PV, care

permit indicarea unor modalități de ameliorare a randamentului de conversie. Capitolul al treilea este dedicat tehnologiilor celulelor solare convenționale și nanostructurate, fiind discutate cele trei generații esențiale de celule solare ; acest capitol este extrem de util pentru înțelegerea aspectelor de bază ale tehnologiilor fotovoltaice, ce utilizează atât siliciu monocristalin, policristalin sau amorf, cât și nanostructuri cu straturi subțiri, coloranți organici sau polimeri. Capitolul al patrulea este dedicat diferitelor componente fotovoltaice (module și panouri PV, respectiv componente BOS – reglatoare, baterii de stocare, invertoare, etc.) . Capitolul 5 abordează sistemele fotovoltaice (autonome, respectiv conectate la rețea), fiind discutate probleme ale modelării și simulării panourilor PV, respectiv ale sistemelor PV. Capitolul 6 analizează problemele de bază privind testarea, monitorizarea și îmbunătățirea calității sistemelor fotovoltaice . În Capitolul 7 sunt prezentate două clase foarte importante de utilizări ale sistemelor PV: sistemele BIPV și sistemele PV hibride. Ultimul capitol este dedicat analizei economice și de mediu a sistemelor fotovoltaice; în acest capitol sunt prezentate tendințele actuale în evoluția prețurilor componentelor sistemelor PV și sunt evocate perspectivele de dezvoltare a sistemelor fotovoltaice în România.

Cartea este destinată atât specialiștilor din universități și institute de cercetare (ingineri, fizicieni, chimiști), cât și tinerilor (ingineri, fizicieni, chimiști, doctoranzi, masteranzi, studenți în anii terminali)

interesați de abordarea diferitelor probleme ale conversiei fotovoltaice ale energiei solare.

Mai multe din capitolele acestei cărți sunt utilizate în cadrul cursului de “*Fizica și tehnologia surselor de energie regenerabilă*”, predat studenților anului IV, secția de inginerie fizică a Facultății de Științe Aplicate, din Universitatea Politehnica București.

Autorii doresc să mulțumească **Prezidiului Academiei Oamenilor de Știință din România (AOȘ-R)** și în special, **Domnului Președinte Prof. Univ. Dr. Vasile Cîndea**, pentru acordul de publicare a acestei cărți în Editura AOȘ-R.

Publicarea cărții a fost realizată în cadrul contractului de parteneriat PN2 nr. 21039 /2007 “*Cercetări privind elaborarea și promovarea sistemelor de arhitectură solară pentru sisteme PV integrate în clădiri*”, aflat în prezent în faza a III-a.

Prof.univ.dr. Laurențiu Fara

București, 23 iulie 2009

Membru titular

al Academiei Oamenilor de Știință din România

CAP. 1 RADIȚIA SOLARĂ

1.1 Caracteristicile radiației solare

1.1.1 *Radiația corpului negru*

Corpul negru este un absorbant/emițător ideal de radiație. Atunci când acesta este încălzit va emite radiație electromagnetică. Un exemplu uzual este reprezentat de un metal încălzit.

Cu cât acesta este mai fierbinte, cu atât lungimea de undă a luminii emise este mai scurtă și strălucirea inițial roșie devine în mod gradat albă.

Este cunoscut faptul că repartitia spectrală a luminii emise de un astfel de obiect încălzit a putut fi explicată satisfăcător de modelul cuantic dezvoltat de Planck. Emitanța spectrală a corpului negru este reprezentată de repartitia spectrală a lui Planck și are expresia (Wenham S.R., Green M. A. et. al 2008):

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/(\lambda kT)) - 1]} \quad (1.1)$$

Emitanța spectrală are dimensiunile puterii pe unitatea de arie și unitatea de lungime de undă. Emitanța totală se obține prin integrarea

ecuației (1.1) peste orice λ , cu valori de la 0 la ∞ , ceea ce conduce la relația :

$$E = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

unde σ este constanta Stefan-Boltzmann.

În Fig. 1.1 este prezentată emitanța spectrală, pentru diferite temperaturi ale corpului negru, observate la suprafața acestuia.

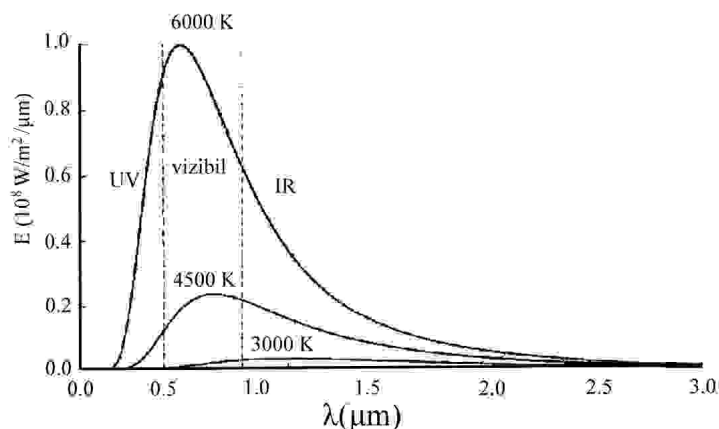


Fig. 1.1: Repartiția emitanței spectrale a radiației corpului negru (cazul ideal) pentru 3 temperaturi diferite: 3000 K, 4500 K, 6000 K.

Soarele este o sferă fierbinte de gaze încălzite prin reacții de fuziune nucleară. Temperatura internă a soarelui atinge valoarea de $20 \cdot 10^6$ K. Radiația intensă din interior este absorbită de un strat de ioni de hidrogen apropiați de suprafața Soarelui. Energia este transferată prin convecție prin această barieră optică și apoi reradiată de fotosferă (suprafața externă a Soarelui). Aceasta emite radiație, aproximând radiația emisă de un corp negru cu temperatura de 6000 K. În Fig. 1.2 este prezentată iradianța spectrală provenită de la

un corp negru cu temperatura de 6000 K.

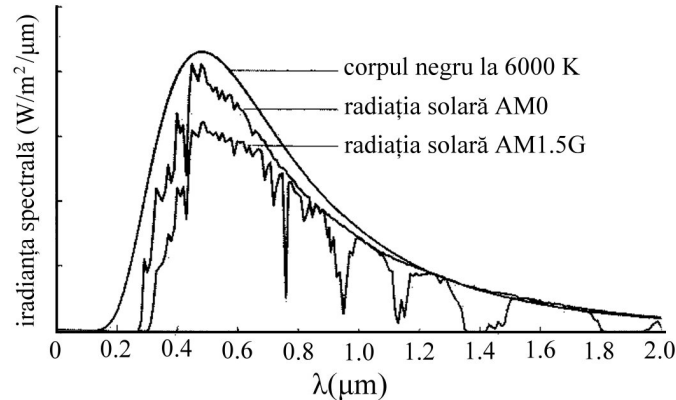


Fig. 1.2: Iradianța spectrală în următoarele cazuri: a. de la un corp negru aflat la temperatura de 6000 K b. de la fotosfera Soarelui observată în exteriorul atmosferei pământului (AM0) c. de la fotosfera Soarelui după ce a trecut prin 1,5 x grosimea atmosferei terestre (AM1.5G)

1.1.2 Radiația solară globală, directă și difuză

Deși radiația provenită de la suprafața Soarelui este constantă, ea ajunge la suprafața pământului foarte distorsionată datorită absorbției și împrăștierei în atmosfera terestră.

Atunci când cerul este senin, radiația maximă care ajunge la suprafața pământului se obține când Soarele este perpendicular pe suprafața terestră și lumina solară are cel mai scurt drum în atmosferă. Acest drum denumit **masă de aer (AM)** prin care radiația solară trebuie să treacă pentru a ajunge la suprafața pământului are expresia:

$$AM = \frac{1}{\cos \varphi} \quad (1.3)$$

În relația (1.3), φ este unghiul dintre direcția Soarelui la un moment

dat și o direcție perpendiculară pe suprafața terestră (Fig. 1.3).

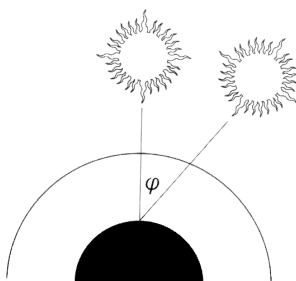


Fig. 1.3: Masa de aer prin care radiația solară trebuie să treacă pentru a ajunge la suprafața pământului; aceasta depinde de poziția Soarelui

Atunci când $\varphi = 0^\circ$, masa de aer este egală cu 1 (radiația AM1 este recepționată). Când $\varphi = 60^\circ$, masa de aer este egală cu 2 (și în acest caz radiația AM2 este recepționată). Când $\varphi = 48,2^\circ$, masa de aer este egală cu 1,5 și este recepționată radiația AM1,5. Aceasta este radiația uzuală în cazul conversiei fotovoltaice a energiei solare. O relație mai precisă a masei de aer pentru o anumită locație se obține din relația (1.4):

$$AM = \sqrt{1 + (s/h)^2} \quad (1.4)$$

În relația (1.4) s reprezintă lungimea umbrei aruncate de un post vertical de înălțime h (Fig. 1.4)

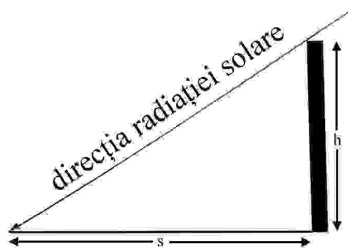


Fig. 1.4: Calculul masei de aer utilizând umbra unui obiect de înălțime dată

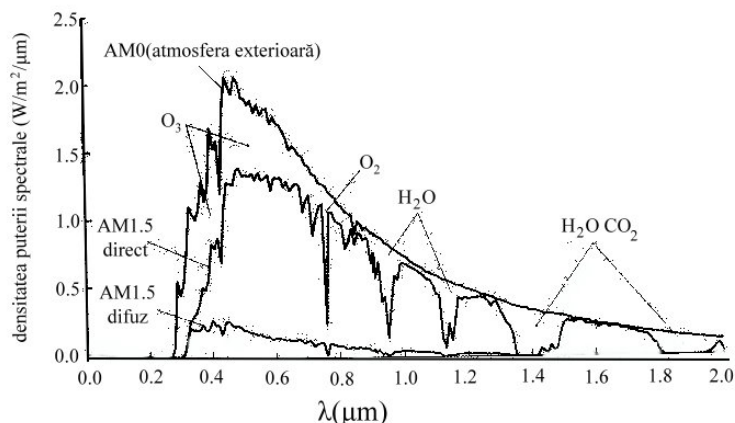


Fig. 1.5: Densitatea de putere spectrală a radiației solare în următoarele cazuri: a) în exteriorul atmosferei (AM0) b) la suprafața pământului (AM1,5 radiația directă) c) la suprafața pământului (AM1,5 radiația difuză). Este indicată absorbția de la diferite componente din atmosferă.

Distribuția spectrală a radiației solare în afara atmosferei (AM0) și la suprafața pământului (AM1,5) sunt prezentate în Fig. 1.5.

Densitatea de putere totală a radiației solare AM0 integrată pe tot spectrul reprezintă **constantă solară** și are valoarea $\gamma = 13661 \text{ W/m}^2$ (Gueymand C.A., 2004, www.astm.org).

Se disting:

- *Radiația solară directă* (provine direct de la discul solar);
- *Radiația solară difuză* (obținută în condiții de înnorare a cerului);
- *Radiația solară globală* (reprezintă suma celor două componente menționate anterior);

Principalele efecte care determină apariția radiației solare difuze sunt:

- împrăștierea Rayleigh de molecule în atmosferă, în special la lungimi de undă mici;

- împrăștierea de aerosoli și particule de praf;

- absorbția de către gazele atmosferice ca oxigenul, ozonul, vaporii de apă și dioxidul de carbon (CO₂).

Înnorarea reprezintă un motiv semnificativ al atenuării și împrăștierii radiației (norii Cumulus produși la altitudine joasă sunt responsabili pentru blocarea luminii solare).

Totuși, aproximativ jumătate din radiația directă blocată de norii Cumulus este recuperată sub forma radiației difuze. Norii Cirrus de altitudine înaltă nu au un efect atât de mare în blocarea luminii solare și aproximativ două treimi din radiația directă blocată este convertită în radiație difuză. Într-o zi complet înnorată, fără însorire, cea mai mare parte din radiația ce ajunge la suprafața pământului va fi difuză (Liu & Jordan, 1960).

Efectul de seră

Pentru a menține constantă temperatura pământului, energia incidentă pe pământ de la Soare trebuie să fie egală cu energia radiată de pământ în exterior.

Activitățile umane eliberează din ce în ce mai multe gaze antropogenice în atmosferă ce absorb în domeniul 7-13 μm , în special CO₂, metan, ozon, oxizi azotoși, și clorofluorocarbonați. Aceste gaze împiedică disiparea normală a energiei și sunt acceptați ca fiind principalele cauze observate în creșterea temperaturii terestre medii. S-a arătat (McCarthy et. al, 2001) că temperatura medie la suprafața

pământului a crescut cu $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ în cursul secolului trecut. Totodată, în conformitate cu anumite modele proiectate, temperatura medie globală a aerului la suprafața pământului va crește în intervalul $1990 \div 2100$ cu $1,4 \div 5,8^{\circ}\text{C}$. Proiecțiile indică că încălzirea globală va varia în funcție de regiune și va fi însoțită de creșteri și scăderi ale precipitațiilor. De asemenea, vor exista schimbări în variabilitatea climei și schimbări în frecvența și intensitatea unor fenomene climatice extreme.

Se preconizează că efectele secundare vor fi devastatoare în viitoare decade, iar tehnologiile cu un impact scăzut asupra mediului și emisii de gaze de seră reduse vor crește în importanță. Acesta este motivul pentru care tehnologii cum este tehnologia fotovoltaică care pot înlocui combustibili fosili vor fi utilizate pe scară din ce în ce mai mare.

1.2 Mișcarea aparentă a soarelui și relațiile pentru calculul poziției soarelui

Mișcarea aparentă a soarelui și poziția sa la 12:00 p.m. față de un observator fix la latitudinea de 44-45 grade nord este prezentată în Fig. 1.6. Drumul soarelui variază în cursul anului și este arătat atât în pozițiile extreme (solstițiu de vară și solstițiu de iarnă) cât și la echinocțiu (echinocțiu de primăvară și de toamnă), când soarele răsare dinspre est și apune spre vest.

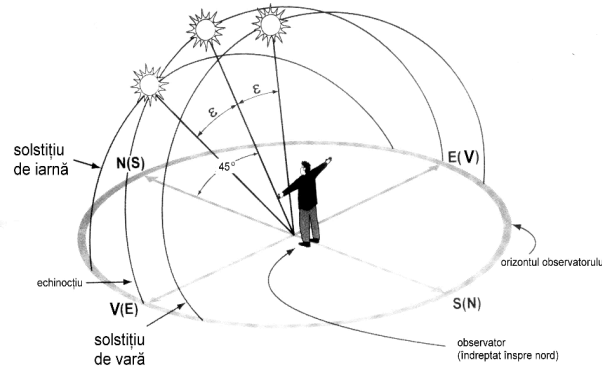


Fig. 1.6: Mișcarea aparentă a soarelui pentru un observator la 45 grade nord unde ε este înclinarea axei de rotație a pământului față de planul său de evoluție în jurul soarelui (aprox. 23,45°)

Relațiile care permit calcularea poziției soarelui sunt următoarele (Duffie & Beckman, 1991):

$$\left. \begin{aligned}
 DEC &= 23.45^\circ \sin \left[\frac{2\pi}{365} (284 + NDY) \right] \\
 DEC &= 0.33281 - 22.984 \cos N + 3.7372 \sin N - 0.3499 \cos(2N) + \\
 &\quad + 0.03205 \sin(2N) - 0.1398 \cos(3N) \\
 N &= \frac{360^\circ}{365} NDY \\
 HRA &= 15^\circ (ora - 12) \\
 ALT &= \arcsin[\sin DEC \sin LAT + \cos DEC \cos LAT \cos HRA] \\
 AZI' &= \arccos \left[\frac{\cos LAT \sin DEC - \cos DEC \sin LAT \cos HRA}{\cos ALT} \right] \\
 AZI &= \begin{cases} AZI', & \text{pentru } HRA < 0 (AM) \\ 360^\circ - AZI', & \text{pentru } HRA > 0 (PM) \end{cases} \\
 HSA &= AZI - ORI \\
 VSA &= \arctg \left[\frac{tgALT}{\cos HRA} \right] \\
 INC &= \arccos[\sin ALT \cos TIL + \cos ALT \sin TIL \cos HSA] \\
 &= \begin{cases} \arccos[\cos ALT \cos HSA], & \text{pentru } su \text{ prafete verticale} \\ ZEN = 90^\circ - ALT, & \text{pentru } su \text{ prafete orizontale} \end{cases} \\
 SRA &= \arccos[\cos LAT \sin DEC + tgLATtgDEC \sin LAT \cos DEC] \\
 SRT &= 12 - \frac{\arccos(-tgLATtgDEC)}{15^\circ}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

În relațiile (1.5) intervin următoarele notații:

AZI = unghiul de azimut solar ($0-360^{\circ}$);

ALT= unghiul de altitudine solară, raportat la orizont (zenit = 90°);

ZEN = unghiul de ZENIT raportat la verticală ($90 - ALT$);

ORI = orientarea normalei la suprafață față de azimut;

HSA = unghiul de umbrire orizontală;

VSA = unghiul de umbrire verticală pe planul normal perpendicular;

INC = unghiul de incidență față de normala la suprafață;

LAT = ϕ = latitudinea geografică a locului;

DEC = δ = declinarea între linia soare-pământ și planul ecuatorial;

HRA = ω = unghiul orar de la amiază (15° pe oră);

SRA = unghiul de azimut la răsăritul soarelui;

SRT = durata răsăritului soarelui;

NDY = numărul zilei din an;

N = unghiul zilei;

TIL = unghiul de înclinare al suprafeței față de orizontală.

1.3 Modelarea radiației solare

Modelele radiației solare reprezintă algoritmi concepuți pentru a genera o componentă solară dorită dintr-un set de date de intrare care includ alte componente ale radiației solare sau legate de radiația solară, precum și informații asupra timpului și poziției.

Primele modele au fost concepute pentru a prevedea iradianța globală, pe atunci rar evaluată din alte mărimi disponibile uzual, cum

sunt acoperirea cu nori și durata de însorire în cadrul modelelor Ångström (Ångström A., 1924) și Kimball (Kimball H. H., 1919). Un model important a fost elaborat în 1960 de Liu și Jordan (Liu B. Y., Jordan R. C., 1960) pentru a corela valorile medii lunare ale radiației globale și celei difuze. În momentul de față se consideră 4 categorii importante de modele:

- *modele de transpoziție* care leagă o componentă a radiației solare de o altă componentă;
- *modelele meteorologice* care convertesc datele meteorologice standard în parametri ai radiației solare;
- *modele de satelit* care convertesc imaginile din satelit în parametri radiației solare;
- *modele stocastice* care generează fluxuri de date sintetice privind radiația solară dintr-un număr limitat de parametri.

1.3.1 Modele de transpoziție

A. Modele bazate pe durata de însorire.

Aceste modele au fost dezvoltate de mai mulți cercetători. (Kimball, 1919; Ångström, 1924; Spencer, 1971; Neuwirth, 1980; Gopinathan, 1988; Dogniaux, Lemoine, 1983; Martinez-Lozano et. al., 1984; Hussain, 1984).

În absența atmosferei, în ziua Juliană j , *iradianța solară extraterestră*, sau *densitatea fluxului solar*, se calculează cu relația (1.6) (Spencer, 1971):

$$G_j^0 = \gamma (1,00011 + 0,034221 \cdot \cos \theta_j + 0,00128 \cdot \sin \theta_j - 0,000719 \cdot \cos 2\theta_j + 0,000077 \cdot \sin 2\theta_j) \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.6)$$

unde $\theta_j = \frac{2\pi(j-1)}{365}$.

La nivelul solului densitatea fluxului solar incident pe o suprafață orizontală este dată de relația:

$$G = G^0 \sin h \quad (1.7)$$

unde h este unghiul de înălțare al Soarelui, dat de relația:

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1.8)$$

În funcție de ziua Juliană j , unghiul de declinație se calculează cu relația (Spencer W., 1971):

$$\begin{aligned} \delta_j = & 0,006918 + 0,399912 \cdot \cos \theta_j + 0,70257 \cdot \sin \theta_j - \\ & - 0,006759 \cdot \cos 2\theta_j + 0,000907 \cdot \sin 2\theta_j + \\ & + 0,00148 \cdot \sin 3\theta_j - 0,002697 \cdot \cos 3\theta_j \end{aligned} \quad (\text{rad}) \quad (1.9)$$

Unghiul orar este dat de relația:

$$\omega = \frac{2\pi}{24}(t-12) \quad (1.10)$$

unde t este *timpul solar adevărat*, dat de relația:

$$t = t_{\text{legal}} - c + \frac{LS - L}{15} + ET \quad (1.11)$$

cu: LS - meridianul standard al locului, L – meridianul local, iar ET , *ecuația timpului*, modelează neuniformitățile mișcării pământului și este dat de relația (Bădescu V., 1997):

$$ET_j = 0,000075 + 0,001868 \cdot \cos \theta_j - 0,032077 \cdot \sin \theta_j - 0,14615 \cdot \cos 2\theta_j - 0,04084 \cdot \sin 2\theta_j \quad (1.12)$$

În prezența atmosferei standard^{*)} densitatea fluxului solar incident la nivelul solului este dată de relația:

$$G = G^0(\lambda) \exp \left\{ - [K_a(\lambda) + K_d(\lambda)] \frac{x p}{H p_0} \right\} \quad (1.13)$$

unde $K_a(\lambda)$ modelează fenomenele de absorbție, $K_d(\lambda)$ modelează fenomenele de difuzie, p este presiunea la altitudinea x în atmosfera standard iar p_0 este presiunea normală.

Iradieră solară extraterestră, în ziua juliană j , se calculează prin integrarea relației (1.7):

$$H_j^0 = G^0 \int_{\omega_2}^{\omega_1} \sin h \frac{dt}{d\omega} d\omega \quad (\text{J/m}^2) \quad (1.14)$$

unde $\frac{dt}{d\omega} = \frac{24 \cdot 3600}{2\pi}$.

Modelul Prescott-Page (Prescott J. A., 1940) bazat pe modelele anterioare, poate fi pus în forma:

^{*)} Atmosfera standar înlocuiește atmosfera reală cu un strat omogen de gaz având aceeași compoziție dar presiunea se consideră uniformă. În condiții de presiune normală înălțimea atmosferei standar este $x_{\max} = H = 8 \text{ km}$.

$$\frac{H}{H_0} = a + \frac{bn}{N} \quad (1.15)$$

unde H reprezintă iradierea globală zilnică mediată lunar, H_0 reprezintă iradianța extraterestră zilnică, n reprezintă numărul de ore de însorire zilnic mediat lunar, N durata zilei, iar a și b sunt coeficienți care depinde de locație. S-a încercat utilizarea parametrilor de intrare meteorologici pentru a obține coeficienți de regresie locali (a și b) când nu există măsurători directe ale iradianței globale.

B. Modele bazate pe iradiația globală directă sau difuză

Iradiația solară globală este suma dintre componenta directă, G_D , și iradiația solară difuză, G_d :

$$G = G_D + G_d \quad (1.16)$$

G_D și G_d sunt de forma:

$$\begin{cases} G_D = G^0 \bar{\tau}_O \bar{\tau}_a \bar{\tau}_w \bar{\tau}_R \bar{\tau}_g \sin h \\ G_d = \beta G^0 (1 - \bar{\tau}_a \bar{\tau}_R) \bar{\tau}_O \bar{\tau}_w \bar{\tau}_g \sin h \end{cases} \quad (1.17)$$

unde $\bar{\tau}_i$ sunt transmitanțele atmosferice medii de forma:

$$\bar{\tau}_i(\omega) = \frac{\int_{0.2}^4 \tau(\lambda, \omega) G^0(\lambda) d\lambda}{\int_{0.2}^4 G^0(\lambda) d\lambda} \quad (1.18)$$

cu $G^0(\lambda)$ densitatea spectrală a fluxului solar la nivelul terestru, pentru ozon ($\bar{\tau}_O$), aerosoli ($\bar{\tau}_a$), absorbția vaporii de apă ($\bar{\tau}_w$), difuzia

Rayleigh ($\bar{\tau}_R$) și amestecul de gaze atmosferice ($\bar{\tau}_g$), iar β este un coeficient.

Au fost dezvoltate modele bazate pe radiația difuză pentru care timpii de mediere se află în intervalul de o lună, o oră sau chiar mai puțin. Datorită unor efecte neliniare pronunțate, astfel de modele depind puternic de timpul de mediere și ar trebui să nu se aplice pentru scale de timp diferite de acelea pentru care ele au fost dezvoltate (acest lucru este valabil atât la domeniul spectral cât și la domeniul radiației solare pentru toate lungimile de undă).

S-au dezvoltat (Liu B. Y., Jordan R.C. 1960; Page J. K. 1961) modele care corelează fracția de radiație difuză lunar și indicele de claritate.

S-a demonstrat (Orgill J.F., Hollands K.G., 1977) neliniaritatea relației între fracția de radiație difuză orară și indicele de claritate. S-a demonstrat de asemenea că (Garrison J.D., 1985) dependența fracției din radiația difuză orară de iradianța globală, unghiul de înălțare solar, cantitatea de vapori de apă din precipitațiile atmosferice și turbiditatea atmosferică.

S-a arătat (Davies J. A. et. al., 1988) că modelul orar al lui Erbs (Erbs D. G. et. al. 1982) se comportă cel mai bine dintr-un număr de modele. De asemenea, modelul cvasi-fizic al lui Maxwell (Maxwell E.L., 1987) (care cere indicele de claritate și unghiul de înălțare solar) se comportă mai bine decât modelul Erbs (Perez R. et. al., 1990). Este esențial de remarcat că modelele care prevăd fracția de radiație difuză medie dintr-un număr de parametri de intrare dat tind să producă

distribuții ale fracției de radiație difuză care sunt mai înguste decât acelea observate.

C. Modele de eficacitate luminoasă

Modelele de conversie a iradianței în iluminare implică multiplicarea iradianței măsurate în W/m^2 cu eficacitatea luminoasă măsurată în lm/W pentru a se obține iluminarea diurnă măsurată în lux.

Acestea utilizează calculele de radiație solară care sunt modificate pentru a se obține mărimile de iluminare diurnă. Eficacitatea luminoasă depinde de repartiția spectrală a iradianței. Procesele de împrăștiere și de absorbție în atmosferă afectează eficacitatea luminoasă.

Au fost dezvoltate modele de eficacitate luminoasă care folosesc fie radiația directă (Iqball M. 1983; Littlefair P.J. 1985; Molineaux B. et. al. 1995; Gueymard C. 1995; Perez R. et. al. 1990), fie radiația difuză (Little Fair P.J. 1985-1988, Perraudau M. 1986, Perez R. et. al. 1990, Gueymard C. 1995) sau radiația globală (Littlefair P. J. 1985, Gueymard C. 1995).

D. Modele spectrale

Datele privind iradianța solară spectrală și modele aferente sunt extrem de utile pentru analizarea răspunsului energetic în funcție de condițiile de mediu pentru: sisteme fotovoltaice, sticle de înaltă performanță, acoperiri selective și aplicații ale iluminării diurne. Au fost identificate 12 posibilități de utilizare a modelelor de radiație

spectrală pentru sistemele fotovoltaice și aplicațiile în construcții (Nann S., Bakenfelder A., 1993).

Modelul elaborat de Nann și Riordan (Nann S., Riordan C., 1991) este singurul care poate fi utilizat pentru prevederea spectrelor atât în condiții de cer noros cât și de cer senin dar nu rezolvă componentele directe și difuză în condiții de cer noros. Acest model se obține prin combinarea modelului de cer senin al lui Bird și Riordan (Bird R. E., Riordan C., 1986) de setul de date de măsurători spectro-radiometrice. S-a arătat (Nann S. et. al. 1991) că acest model poate prezice iradianța globală pe plane înclinate cu o precizie acceptabilă.

1.3.2 *Modele meteorologice*

Spre deosebire de modelele de transpoziție, datele de intrare la modelele meteorologice nu includ măsurători ale intensității radiației solare directe sau difuze. Aceste modele sunt în esență similare cu modelele de durată de însorire deoarece durata de însorire este utilizată ca o măsură a înnorării și deoarece modelele de durată de însorire utilizează adeseori aceleași mărimi meteorologice ca date de intrare.

Modelele meteorologice își propun să evalueze mărimile ce definesc radiația solară pe baza informațiilor furnizate de stațiile meteo. Această abordare este atractivă deoarece locurile de măsurare a radiației solare sunt mult mai puține decât locurile de măsurare a parametrilor meteorologici. Totuși, majoritatea parametrilor meteorologici, respectiv: temperatura, umiditatea, presiunea

atmosferică, viteza și direcția vântului sunt puțin utile pentru evaluarea radiației solare. Cele mai utile informații meteorologice privesc nebulozitatea, turbiditatea și albedoul terestru.

Este interesant de remarcat că atunci când NREL SUA (National Renewable Energy Laboratory) a dezvoltat, în perioada 1961-1990, baza de date națională privind radiația solară (NSRDB, 1995), a fost necesar un model meteorologic care să producă valori reprezentative ale radiației solare orare în orice loc din SUA. Soluția adoptată la NREL a fost să se producă un modificador statistic al iradianțelor modelate medii. Acest model statistic meteorologic denumit METSTAT dă o reprezentare adecvată a distribuției tipice a valorilor iradianței solare orare așteptate timp de o lună. Un defect al acestui model îl constituie faptul că nu produce corelații bune ale măsurătorilor orare a iradianței solare.

Dezvoltarea modelelor de nebulozitate este foarte actuală. Astfel, s-a introdus (Muneer T. et. al. 1997) modelul de radiației meteorologic (MRM) care necesită date privind durata de însorire orară, temperatura în stare uscată și temperatura în stare umedă. De asemenea, a fost elaborat modelul de radiație pe baza nebulozității (CRM) care necesită numai nebulozitatea. Desigur, aceste modele trebuie testate pe baza datelor internaționale meteorologice în diferite zone climatologice solare înainte de a fi acceptate la nivel mondial.

Forma clasică de corelare a iradierii solare cu nebulozitatea este de tip putere (exemplu Kasten F., Czeplack G., 1979):

$$\frac{H}{H_0} = 1 - 0,72 \cdot N^{\frac{3}{2}} \quad (1.19)$$

unde N este nebulozitatea.

Un mare neajuns al acestui tip de corelație constă în faptul că nebulozitatea nu ține cont de poziția relativă a soarelui și a norilor, și nu indică dacă soarele strălucește sau nu pe cer.

Iradieră solară poate fi calculată folosind temperatura aerului (modelul Donatelli-Bellocchi, 2001):

$$\frac{H}{H_0} = \tau \left[1 + c_1 \cdot \sin \left(j \frac{\pi}{180} c_2 \right) \right] \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{b \Delta t^2}{\Delta t_w} \right) \right] \quad (1.20)$$

unde τ , c_1 , c_2 , b sunt constante empirice, $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$, $t_{\max}$ = temperatura maximă, $t_{\min}$ = temperatura minimă, iar Δt_w este diferența de temperatură săptămânală.

1.3.3 Modele de satelit

Una dintre cele mai importante funcții ale sateliților meteorologici o constituie detectarea câmpurilor de nori și monitorizarea evoluției temporare a acestora pe regiuni extinse ale pământului.

Având în vedere că norii reprezintă principalul modulator al iradianței solare diurne și orare este evident că măsurătorile de radianță din spațiu sunt o sursă de date unice pentru evaluarea continuă a radiației solare la nivelul suprafeței terestre.

Există o anumită relație între semnalul înregistrat de un radiometru în spațiu, și acela obținut de un piranometru aflat la nivelul solului. S-a constatat că cu cât este mai mare semnalul în spațiu, cu atât este mai slab semnalul pe pământ, datorită faptului că fracția din fluxul de radiație solară incidentă retroîmprăștiată în spațiu reduce fluxul care se propagă către suprafața pământului.

Ecuția de bilanț a fluxurilor (Fritz S. et. al., 1964) exprimă faptul că în domeniul spectral al undelor ultra-scurte fluxul net în partea superioară a atmosferei F_{TOA} este egal cu fluxul net la suprafața pământului F_G la care se adaugă fluxul absorbit de atmosferă F_A .

$$F_{TOA}^+ - F_{TOA}^- = F_G^+(1 - \alpha_G) + F_A \quad (1.21)$$

unde F_{TOA}^+ este fluxul incident, F_{TOA}^- este fluxul emergent care este funcție de semnalul de la satelit iar α_G reprezintă albedoul terestru.

Diferitele soluții ale acestei ecuații pentru F_G^+ (măsurată de piranometru) depind de modul de evaluare a lui F_A și a relației dintre F_{TOA}^- și pulsările digitale măsurate de radiometrul de pe satelit.

Această evaluare este relativ complexă. F_{TOA}^- este un flux emergent și numărul de pulsuri digitale reprezintă o funcție de intensitatea fasciculului ce părăsește stratul superior al atmosferei (TOA) în direcția satelitului și care este filtrat spectral de un senzor aflat la bordul acestuia. Din acest motiv există un număr relativ mare de soluții posibile. La un capăt se găsește integrarea completă a ecuației de transfer radiativ preținând caracterizarea fizică completă atât ale

structurii noroase verticale și orizontale a atmosferei cât și a proprietăților spectrale ale solului și ale senzorilor de pe bordul satelitului. La celălalt capăt se găsesc modelele condensate care se bazează pe presupuneri simplificatoare sau aproximații empirice ale relației descrise mai sus.

Cu toate că se obține o bună precizie în ceea ce privește modelele care transformă șiruri de date privind iradierea orară în componente, totuși există o anumită confuzie în ceea ce privește precizia estimărilor folosind date furnizate de satelit. Comparații directe ale estimărilor orare cu observații făcute la nivelul solului au condus la imprecizii de $20 \div 25 \%$, acestea putând fi îmbunătățite până la maxim $17 \div 19 \%$ (Zelenka A. et. al. 1998). Aceste erori se datorează zgomotului produs de discrepanța spațiu-timp dintre satelit și observatorul de pe pământ precum și erorilor de măsurare și a microvariabilității originale a câmpului de iradiere la scara sub-pixel. Având în vedere că pentru sisteme fotovoltaice conectate la rețea citirea iradianței cu precizie foarte bună este mult mai puțin relevantă decât iradianța integrată pe o arie terestră de dimensiunea pixelului, datele din satelit apar considerabil mai utile și mai precise decât datele obținute cu ajutorul modelelor convenționale.

Au fost elaborate o serie de modele de satelit. Unul din aceste modele este *modelul de satelit ESRA*.

ESRA – The Clear Sky Irradiation Model of European of the European Solar Radiation Atlas (Rigollier C. et. al., 2000) este un model dezvoltat pentru a estima iradianța solară la nivelul solului prin

prelucrarea imaginilor culese de satelit (Heliosat). În acest model componenta directă a irradiației solare se calculează cu relația:

$$G_D = G^0 e^{[-T_L k_R(m)m]} \cdot \sin h \quad (1.20)$$

unde T_L este factorul de turbiditate, iar m este masa optică de aer de forma (Kasten F., Young A., 1989):

$$m = \frac{1 - z \cdot 10^{-4}}{0,50572 \cdot (h + 6,079995)^{-1,6364} + \sin h} \quad (1.21)$$

unde h se exprimă în grade, iar z este altitudinea, dată în metri.

Componenta difuză se calculează cu relația:

$$G_d = G^0 \cdot T_{rd}(T_{L_{AM2}}) \cdot F_d(h, T_{L_{AM2}}) \quad (1.22)$$

unde $T_{rd}(T_{L_{AM2}})$ este transmitanța atmosferică la zenit:

$$T_{rd}(T_{L_{AM2}}) = -0,015843 + 0,030543 \cdot T_{L_{AM2}} + 3,797 \cdot 10^{-4} \cdot T_{L_{AM2}}^2 \quad (1.23)$$

iar

$$F_d(h, T_{L_{AM2}}) = A_0 + A_1 \cdot \sin h + A_2 \cdot \sin^2 h \quad (1.24)$$

unde A_0 , A_1 și A_2 sunt coeficienți adimensionali ce depind de $T_{L_{AM2}}$.

S-L – Satel – Light Program este o versiune a programului *ESRA*. Acesta este disponibil la adresa <http://www.satel-light.com>.

1.3.4 **Modele stocastice**

Modelele stocastice ale seriilor temporale, orare și zilnice ale iradianței solare globale și ale fracției de însorire au fost explorate de la sfârșitul anilor 1970 ca un instrument pentru îmbunătățirea utilizării datelor observate. Modelele stocastice spectrale au fost propuse și chiar utilizate pentru diferite aplicații. Dintre acestea, două au devenit extrem de populare: *modelele de mediere dinamică auto-regresivă (ARMA)*, precum și *modelele matricei de tranziție Markov (MTM)*.

Principalele modele stocastice recente au fost dezvoltate de: Graham și Hollands (Graham V., Hollands K., 1988), Mora-Lopez și Sidrach-de-Cardona (Mora-Lopez L., Sidrach-de-Cardona M., 1997), Morf (Morf H., 1998).

Vom considera serii staționare pentru ambele tipuri de modele. În cazul modelelor auto-regresive de ordinul I (AR1), valoarea variabilei $x(t)$ este iterată pentru a găsi valoarea acestuia la un moment ulterior $x(t + \Delta t)$:

$$x(t + \Delta t) = \Phi_1 x(t) + r(t), \quad (1.25)$$

unde $r(t)$ este o variabilă aleatoare necorelată. X și r au valoarea medie 0 și sunt distribuite normal în timp ce dispersia lui r este $\sigma^2(r) = 1 - \Phi_1^2$. În cazul modelelor MTM cu un singur pas, domeniul lui x este discretizat în 10 stări. Probabilitățile de tranziție P_{ij} sunt calculate pentru toate cazurile, cu $i, j = \overline{1, N}$, obținându-se matricea MTM.

Plecând de la o valoare inițială $x(t)$, corespunzătoare unei stări k , următoarea stare m este obținută cu ajutorul unei variabile necorelate u , distribuită uniform în intervalul $[0,1]$, astfel încât să fie îndeplinită condiția :

$$\sum_{i=1}^m P_{ki} \geq u(t) \quad (1.26)$$

Valoarea reală $x(t + \Delta t)$ se găsește în granițele stării m , ceea ce se poate realiza prin alegeri aleatoare sau prin interpolare.

Deși aceste modele pot fi generalizate în vederea includerii dependenței valorilor curente de diferite valori din trecut, s-a înțeles rapid că seriile de iradianță solară globală prezintă o autocorelare semnificativă numai pe intervale de o zi și o oră. În acest fel, cele mai simple modele stocastice ar putea fi utilizate cu succes.

Performanța modelelor stocastice ale iradierii globale este revizuită în funcție de indicii de claritate și datorită faptului că există diferite probleme. De exemplu, modelele stocastice au fost studiate în special pentru clima temperată din emisfera nordică, deci nu se pot aplica la alte zone climatice. O altă problemă ar fi comportarea modelelor orare în prezența apusului și răsăritului soarelui.

Se consideră că există posibilități de îmbunătățire a preciziei modelelor stocastice. Cele mai multe probleme pot apărea datorită provocării generării de date cu mai mulți parametri variabili, precum și faptului că nu există instrumente teoretice bune ce pot explica

diferențele între modelele empirice existente și acelea care orientează adaptarea la diferite locații și zone climatice.

1.4 Simularea radiației solare

În acest paragraf se prezintă un program, Grad (Global Radiation – Radiația Globală), open source, disponibil la adresa <http://sourceforge.net>. GRad este un model științific al radiației solare, programat în Java. În acest moment folosind acest program se pot calcula: 1) radiația globală și componentele sale (radiația directă, difuză și reflectată) pentru una sau mai multe suprafețe orizontale sau înclinate; 2) radiația în cazul unui cer senin cât și cea în cazul unui cer real (cu anumite condiții atmosferice date). Calculul se poate efectua pentru orice perioadă de timp: de la minute până la ani.

GRad este un program/librărie autonom ce poate fi folosit în două moduri:

1) Folosind o interfață grafică care lucrează pe baza unor fișiere cu datele de intrare. Aceasta procesează fișiere de coordonate iar rezultatele privind iradianța sau iradiația sunt prezentate sub forma unor fișiere de ieșire. Această interfață este însă limitată către cele mai primitive funcții.

2) Folosind o infrastructură bine dezvoltată ce permite folosirea mai multor funcții din interiorul mediului Java.

Sunt suportate trei tipuri de operații: calculul iradianței în cazul unui cer senin sau cer real [W/m^2] și calculul iradiației pentru

cer senin [Wh/m^2]. Primele două operații au ca rezultat un tabel cu o valoare pentru fiecare pas de timp (un interval selectat de utilizator) în timp ce a 3-a operație calculează suma radiației globale pentru o perioadă de timp, care nu e altceva decât energia pe care o primește fiecare metru pătrat în această perioadă de timp.

Ca date de intrare, GRad are nevoie de un fișier în care sunt definite coordonatele zonei de interes (longitudine și latitudine) împreună cu aspectul, înclinația și elevația acesteia.

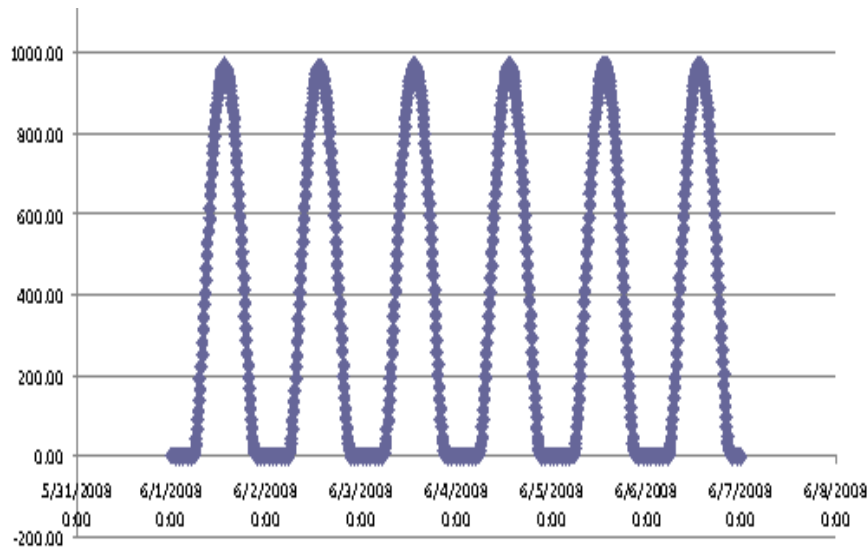


Fig. 1.7: *Iradiația potențială pentru București, luna iulie 2008*

Un exemplu tipic de fișier de intrare este:

„Longitudine”, „Latitudine”, „Elevatie”, „Înclinație”, „Aspect”

1.6, 50.9, 300, 0, 0

1.6, 50.9, 300, 10, 0

1.6, 50.9, 300, 10, 45

1.6, 50.9, 300, 10, 90

În cazul în care se calculează iradianța pentru cerul real, este necesar și un tabel ce conține valorile pentru componenta directă și difuză a indexului cerului senin.

Un alt parametru de intrare este „*linke turbiditatea*”, adică o valoare ce descrie starea atmosferei, atmosferă ce poate fi foarte clară sau poate avea mulți aerosoli care reduc radiația solară. Deși *linke turbiditatea* poate varia de la zi la zi, de obicei, doar valori medii lunare sunt disponibile. Acestea pot fi găsite, la adresa de web: <http://sunbird.jrc.it/pvgis/solres/solrespvgis.htm>, pentru orice loc din Europa.

Procesul de calcul poate dura de la secunde până la câteva minute în funcție de puterea de calcul a calculatorului. În medie calculul durează undeva în jurul unei secunde per an și locație.

În Fig 1.7 este prezentat graficul pentru București privind iradianța potențială corespunzătoare primei săptămâni din luna iulie.

Bibliografie

1. Ångström A., 1924, Solar and terrestrial radiation, Quarterly J. the Royal Meteorological Society, **150**, 121-126.
2. ASTM (2003), G173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° tilted surfaces (www.astm.org).