

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare)

Systems of solar radiation concentrators, important components in the future solar energy systems (indicative elements in the design of solar energy recovery systems)

Drd. ing. I.C. COTOROBAI, Prof. dr. ing. Theodor MATEESCU,
Conf. dr. ing. Victoria COTOROBAI

U.T. Gh. Asachi,
Facultatea de Constructii si Instalatii Iasi, Romania
cotorobai.victoria@gmail.com

Rezumat :

Una dintre resursele energetice primare disponibile în cantități mari, curate, inepuizabile la scara timpului este energia solară. Până în prezent s-au imaginat și realizat sisteme de conversie a energiei solare în energie termică, electrică, sau de cogenerare a energie termică sau electrică. Acestea utilizează fluxul radiației solare incident natural pe suprafața de captare sau apelează la tehnici de creștere a fluxului energetic solar incident pe o suprafață de captare de interes, respectiv sisteme de concentrare a radiației solare. Sistemele cu concentrare a radiației solare utilizate pe scară largă până în prezent au folosit oglinzile, cilindro/parabolice sau tip disc, fixe sau servite de sisteme mecanice de orientare dar descoperirile fizicii cuantice și-au pus ampreta și pe acest domeniu. Reducerea suprafeței necesare de amplasare și respectiv perfecționarea sistemelor de conversie, de concentrare și de integrare multiplă (mai multe resurse; mai multe forme de energie generate; integrare în clădiri) este o direcție prioritară a cercetării actuale. În lucrare se realizează o trecere în revistă a tehnologiilor actuale de concentrare a radiației solare în scopul facilitării activității de proiectare a sistemelor de valorificare.

cuvinte cheie: concentrator radiație solară

Abstract:

One of the primary energy resources available in large, clean, inexhaustible quantities at times is solar energy. So far, solar energy conversion systems have been imagined and realized in thermal, electric, or cogeneration of heat or electricity. They use natural incident solar radiation flux on the capture surface or resort to techniques for increasing the incident solar energy flux on a capture surface of interest, namely solar radiation concentration systems. Solar systems that have been widely used so far have used mirrors, cylindro / parabolic, or disc type, fixed or serviced by mechanical guidance systems, but the quantum physics discoveries have also stood out in this area. Reducing the required surface for the location and improvement of conversion, concentration and multiple integration systems (more resources, multiple forms of energy generation, integration in buildings) is a priority direction of current research. The paper reviews the current technologies of solar radiation concentration in order to facilitate the design of recovery systems.

key-words: solar radiation concentrators

1. Introducere

Energia solară este resursa energetică primară disponibilă în cantități mari, practic inepuizabilă la scara timpului, curată și aflată la baza tuturor celorlalte resurse energetice regenerabile de pe Terra. Afirmatia anterioară, corelată cu politicile energetice promovate la nivel național, european și global, orientate către procese de proiectare și renovare a clădirilor cu bilanț energetic anual nul și sisteme de procurare a energiei pentru acestea din surse regenerabile, cu eficiențe energetice ridicate, precum și politicile de orientare a tehnologiilor & materialelor & instalațiilor de construcție ecologice se adaugă argumentelor anterioare care să susțină dezvoltarea cercetărilor și tehnologiilor în domeniul sistemelor de valorificare a energiei solare.

Până în prezent s-au imaginat și realizat sisteme de conversie a energiei solare în energie termică, electrică, sau de cogenerare energie termică & electrică. Acestea utilizează fluxul radiației solare incident pe suprafața de colectare sau apelează la tehnici de creștere a fluxului energetic solar incident pe o suprafață colectoare de interes, respectiv sisteme de concentrare a radiației solare. Cele mai performante tehnologii de valorificare a energiei solare s-au dovedit a fi cele termice dar pe termen mediu și lung, pot deveni eficiente alte tehnologii (sisteme hibride de valorificare termică+electrică cu concentrare; conversie fotocatalitică, valorificare la limita atmosferei terestre,...).

Sistemele de concentrare a radiației solare utilizate pe scară largă până în prezent au folosit oglinzile, cilindro-parabolice sau tip disc, fixe sau deservite de sisteme mecanice de orientare dar în prezent se cercetează sisteme de concentrare a radiației solare complet novatoare (cu ghid de unde, cu luminofori, ...) și sisteme de autoorientare.

Una dintre direcțiile de dezvoltare majore în domeniu vizează dezvoltarea de sisteme de poligenerare a energiei, flexibile, care să permită multiple interconectări de surse, multiple integrări de echipamente, tehnologii, de generații diferite, în sisteme diferite (anvelope, sisteme centralizate de încălzire-răcire, distribuție energie electrică, sau, generare hidrogen, ...). Organizația Internațională a Energiei, în cadrul studiilor și previziunilor evoluției energetice pe termen lung estimează că, în 2100, cca. 66% din necesarul global de energie va fi asigurat cu ajutorul sistemelor de valorificare multiplă a energiei solare (termică + electrică) (Fig.1, Fig. 2.). În acest context este absolut importantă reducerea suprafeței necesare de amplasare și respectiv perfecționarea sistemelor de conversie, de concentrare și de integrare multiplă: mai multe surse; mai multe forme de energie generate; integrare în clădiri. Rezultă necesitatea dezvoltării intense a cercetărilor în această direcție.

2. Sisteme de valorificare a energiei solare cu concentrare – direcție de cercetare prioritară în domeniul sistemelor de valorificare a energiei solare.

Printre direcțiile majore de cercetare & dezvoltare din domeniul sistemelor de valorificare a energiei solare se află :

a) *îmbunătățirea & dezvoltarea & identificarea unor sisteme de colectare a cât mai multă energie solară de pe suprafețe cât mai mici, respectiv găsirea unor sisteme*

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare) *de concentrare a energiei solare cât mai performante.*

b) *valorificare a cât mai multă energie din cea colectată*, respectiv dezvoltarea sistemelor de conversie a energiei solare multispectrale.

Concentratoarele solare au fost cunoscute și utilizate încă din antichitate, au evoluat pe parcursul timpului, relativ încet până în mileniul trei dar au cunoscut o dezvoltare spectaculoasă în ultimul sfert de veac și încă prezintă un potențial de dezvoltare ridicat.

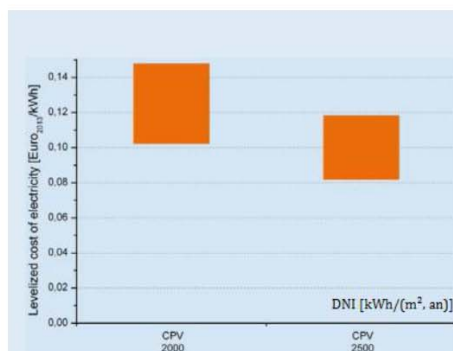


Fig.1: Nivelul de cost al energie electrică cu sisteme fotovoltaice (LCOE) pentru o iradiere solară ridicată*

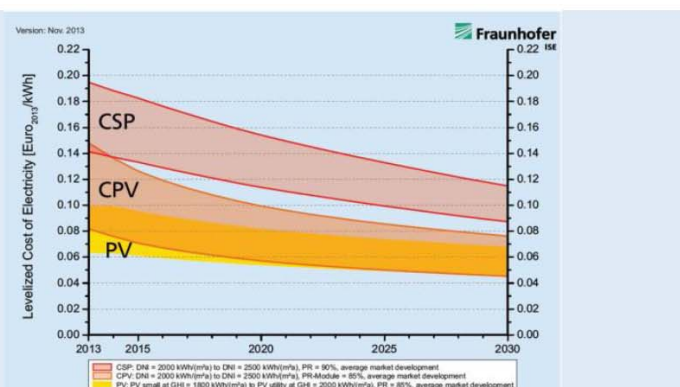


Fig. 2. Dezvoltarea sistemelor LCOE PV, CSP și CPV în locuri cu iradiere solară mare*

*(DNI=2000 kWh / (m², an) și 2500 kWh / (m², an), în 2013.) Sursa: [21].

Acestea pot fi asociate cu sisteme de conversie a energiei solare: a) termice : CS_T ; b) Fotovoltaice : C_PV ; c) Fotovoltaice & termice: C_PV-T, de c1) joasă sau c2) înaltă temperatură, LC_PV-T/HC_PV-T; d)Termo-dinamice : CS_P ; e) Chimice, ș.a.

3. Factori de influență ai performanțelor sistemelor de valorificare a energiei solare cu concentrare.

Performanțelor sistemelor de valorificare a energiei solare cu concentrare sunt dependente pe de-o parte de performanțele intrinseci ale celulelor solare, pe de altă parte de performanțele sistemelor de concentrare și de orientare (Fig. 3) și nu în ultimul rand de performanțele celorlalte componente ale sistemului : sistem stocaj, conectică, invertoare (dacă este cazul, etc.).

4. Concentratorul solar optic

Concentratorul solar optic este un element structural, un subsistem al sistemelor de valorificare a energiei solare, destinat concentrării energiei radiație solară pe receptorul de energie solară. Acesta contribuie la:

- colectarea unei cantități de energie solară cât mai mare,
- dirijarea energia captată spre receptoarele de energie solară.

Intr-un sistem de valorificare a energiei solare pot fi utilizate unul sau mai

multe concentratoare. Ansamblul acestor concentratoare optice formează *subsistemul de concentrare optică*.

Prin concentrarea unei cantități relativ mari de energie solară pe o suprafață relativ redusă, respectiv prin creșterea densității de radiație solară pe o anumită suprafață se obține:

- reducerea gabaritului (masă & dimensiuni) receptoarelor de energie solară: în acest context pot fi folosite sisteme de conversie performante, chiar dacă acestea sunt mai scumpe.
- multiplicarea eficienței sistemelor de conversie a energiei solare în energie termică/electrică.

4.1. Clasificare

S-a dezvoltat o mare varietate de concentratoare optice care pot fi diferențiate în raport cu mai multe aspecte, dintre care, determinante sunt cele de natură *funcțională, constructivă, economică*. Principalele criterii de clasificare ale concentratoarelor optice se diferențiază după criteriile indicate în Fig. 4.

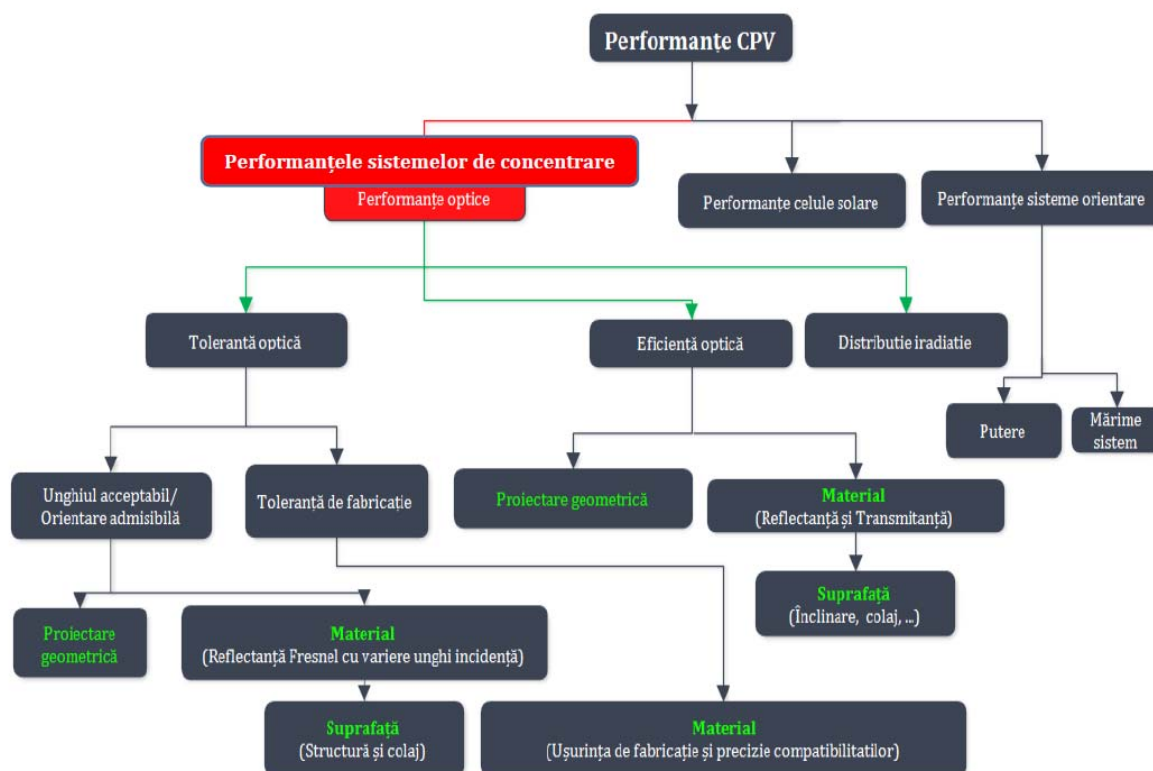


Fig. 3. Factorii de influență ai performanțelor CPC.

Principalele criterii de clasificare ale concentratoarelor sunt:

- devierea radiației optice incidente în concentratoarele optice: *cu refracție, reflectorizante (oglină) ; cu elemente difractante/holografice ;*
- *compoziția spectrală a radiațiilor solare în concentratoare optice*. Există concentratoare solare pentru: *radiații monocromatice sau multispectrale; radiații*

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare) *ultraviolete, vizibile, infra-roșii;*

- *deschiderea unghiulară a sistemului optic utilizat pentru colectarea radiației solare din direcția normală/directă și cea înclinată. Există concentratoare cu : deschideri înguste; deschideri late;*

- *forma suprafeței de lucru utilizate pentru corecția aberației optice a radiației directe. Se disting: concentratoare sferice; concentratoare a-sferice (cilindrice, parabolice, hiperbolice).*

- *forma spotului optic concentrat în planul receptorului de energie solară. S-au dezvoltat concentratoare cu focalizare : punctuală; liniară;*

- *suma elementelor de concentrare paralele din sistemul de concentrare optică. Există concentratoare cu : un singur element ; mai multe elemente ;*

- *suma elementelor de concentrare din sistemul de concentrare optică, situat în mod constant pe drumul de propagare radiației optice. S-au propus concentratoare: în cascadă unică; în dublă cascadă.*

- *principiile fizice care stau la baza originii radiației rezultate. Se disting concentratoare pentru: radiația primară; radiația secundară, numite și luminescente ;*

- *caracteristicile distribuției frontului de unde propagat; concentratoarele optice se pot clasifica în concentratoare cu : ghid de unde; elemente volumice.*

- *compoziția chimică a materialelor utilizate pentru realizarea concentratoarelor optice; se disting concentratoare din: materiale anorganice, materiale organice (polimeri); metamateriale;*

- *corelarea lungimi de undă a radiației și dimensiunilor geometrice ale structurilor elementare, responsabile pentru înclinarea fasciculului optic în concentratoare se disting concentratoare: macroscopice; nanostructurate.*

În cadrul lucrării vom prezenta o simplă trecere în revistă a diferite modele prezente în literatura de specialitate, în scopul de a ajuta la orientarea în proiectare a diferitelor sisteme de valorificare precum și la dezvoltarea cercetării în acest domeniu (Fig. 5). Alegerea designului cel mai potrivit se realizează în raport cu o mulțime de criterii dintre care, de-o importanță majoră sunt criteriile legate de destinația acestuia și locația acestuia.

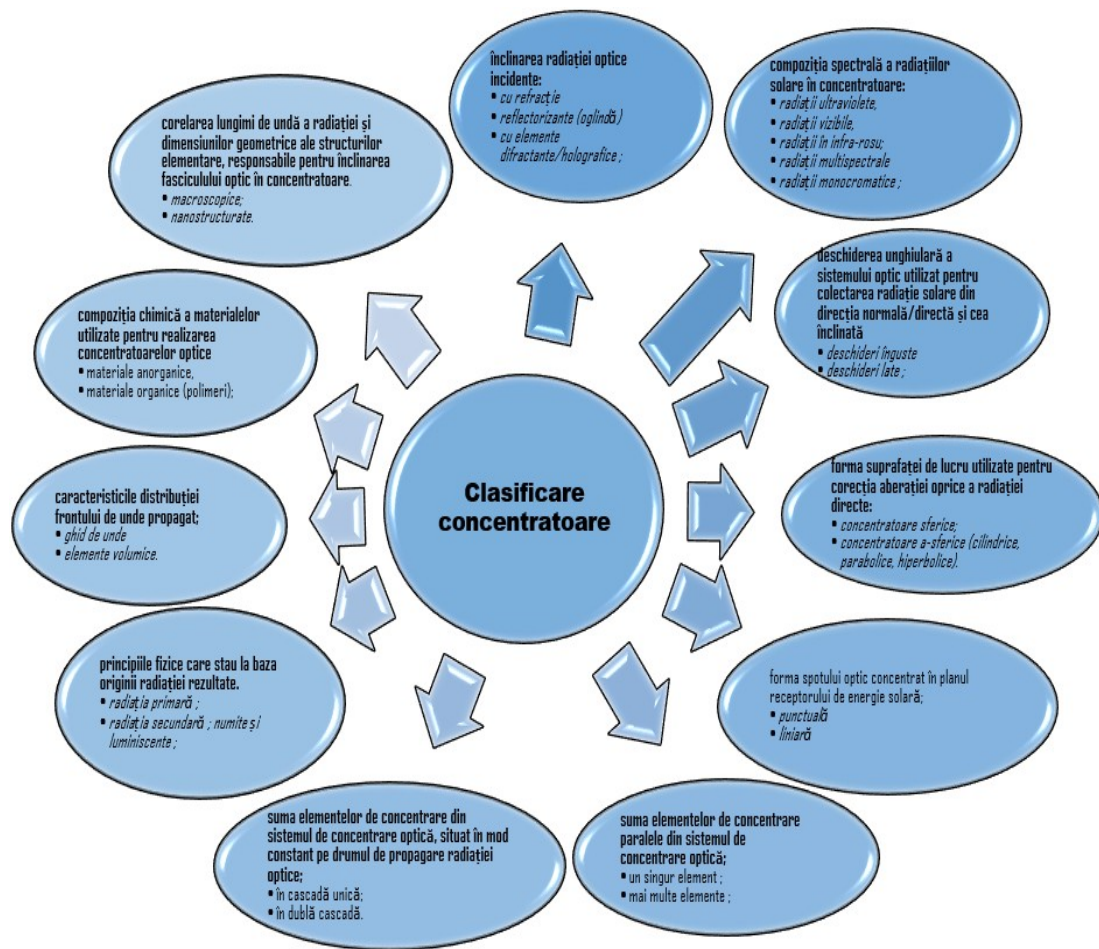


Fig. 4. Clasificarea sistemelor de concentrare a radiației solar

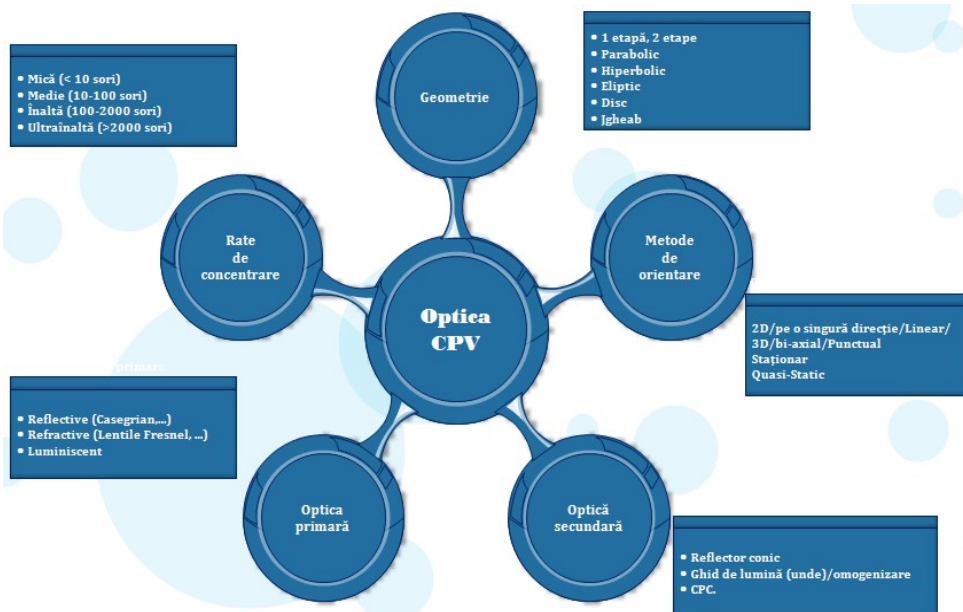


Fig. 5. Optica CPV [1],[4],[5],[6],[7]

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare)

Tab. 1

Caracterizare Concentratoare (dupa [1])

Tip	Tip mecanism concentrare				Raport de concentrare			Formă
	Refracție	Reflectorizant		Luminiscent	Scăzut	Mediu	Înalt	
		acoperire	TIR					
Reflector plat		X			X	X		Fig. 6.a
Jgheab în V		X			X	X	X	Fig. 6.b
Pâlnie de lumină / omogenizator	X		X		X			Fig. 6.c
Reflector Liniar cu lentilă Fresnel		X				X	X	Fig. 6.d
Antena parabolica / jgheab		X				X	X	Fig. 6.e
Lentilă Fresnel	X		X			X	X	Fig. 6.f
Concentrator parabolic compus	X				X			Fig. 6.g
Pană prismatică	X	X	X		X			Fig. 6.h
Luminiscent / puncte cuantice	X	X	X	X	X			Fig. 6.i

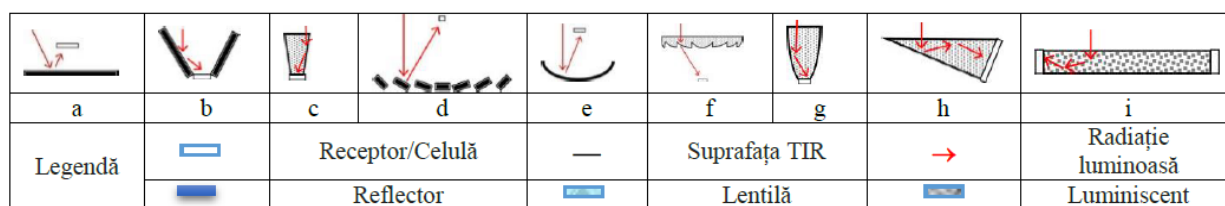


Fig.6. Formă concentratoare [1], [2], [3], [4], [5]

4.2. Optica primară

Conceptele de design primar cele mai comune și adoptate pe scară largă sunt *lentila*.

Fresnel și oglinda parabolică (Tab. 1). Aceste două tipuri de concentratoare pot fi alcătuite în diferite moduri, putându-se adapta la diferite aplicații. O caracteristică importantă a acestora este aria lor de concentrare. Raportul concentrației maxime atinse pe pământ sub un unghi de incidență normală este de 46.000 x. Totuși, datorită aberației cromatice, limita de concentrație a unei lentile Fresnel este în jur de 1000 x (Languy ș.a.). Această limită poate fi depășită prin combinarea *lentilelor divergente din policarbonat (PC) cu cele convergente din Poly(methyl methacrylate) (PMMA)*, caz în care se poate atinge o rată de concentrare de ~ 8500 x .

Cercetările referitoare la *concentratoarele tip jgheaburi parabolice singulare* (fără elemente optice secundare) au reliefat că nu se poate depăși rata de concentrare de ~70 x. Aceste modele optice singulare au o dependență severă de toleranța optică, respectiv de unghiul de acceptare, unghiul de urmărire solară, precizia de fabricație, efectele de încărcare din acțiunile vântului și calitatea finisajului optic.

Prin potrivirea adecvată a dimensiunii receptorului cu raza concentratorului de

radiație directă, toleranța optică poate fi crescută, putându-se realiza concentratoare cu rată înaltă de concentrare optică, dar cu consecințe legate de reducerea eficienței locale datorită forme gaussiene a radiației solare. Pentru a aduce valoarea concentrației cât mai aproape de limita maximă posibilă și relaxarea cererii în raport cu precizia sistemului se folosește un al doilea element de concentrare. Soluția este valabilă atât pentru sistemele de focalizare punctuale cât și pentru cele cu focalizare liniară. Unii cercetători (Brunotte ș.a.) au studiat un jgheab parabolic primar cu un CCP secundar standard, care a atins rate de concentrare mai mari de 250 x. Alții au propus folosirea unui nou sistem optic secundar ZZ SMS pentru a crește limita de concentrare de la 70 x la 213 x și unghiul de acceptare. Mai recent aceștia au propus și alte potențiale modele de jgheab cu concentrator parabolic cu arii cu deschideri mai mari, dar cu rate de concentrare medii pentru a menține valorile potrivite pentru unghiurile de acceptare.

În raport cu concentratoarele cu oglinzile parabolice, concentratoarele cu lentile Fresnel pot face față aparent mai bine fără ajutorul unui sistem optic secundar. Recent s-au studiat și sisteme de lentile Fresnel cu performanțe îmbunătățite. Un exemplu în acest sens îl constituie o lentilă cilindrică Fresnel, propusă de Gonzalez și colab. [20], curbată, cu o uniformizare bună a iradianței, dar cu probleme semnificative de fabricație.

Specialiștii au proiectat o lentilă Fresnel unde fiecare pas este concentrat într-o zonă diferită a receptorului, îmbunătățind uniformitatea fără ajutorul unui sistem optic secundar. Unghiul de acceptare însă este limitat (doar $\sim 0,3^\circ$). S-au proiectat și lentile Fresnel unicate care concentrează radiațiile luminoase în diferite zone "de intrare" ale secundarului. Ambele sisteme au o distribuție a iradianței îmbunătățită, o eficiență optică $> 80\%$ și un unghi de acceptare de $\sim 1,3^\circ$. *Deci, performanța tehnologiilor CPV poate crește semnificativ prin utilizarea unor modele de concentratoare unicate în raport cu cele standard dezvoltate până în prezent. Dar aceste tehnologii unicate sunt relativ noi în timp ce lentila Fresnel convențională și concentratoarele parabolice sunt deja tehnologii mature, testate și validate experimental și pe proiecte prototip.*

Recent, s-a reprojectat și structura inelară a unei lentile Fresnel; rearanjarea inelelor a condus la o uniformizare a iradianței îmbunătățită semnificativ (Fig. 7.)

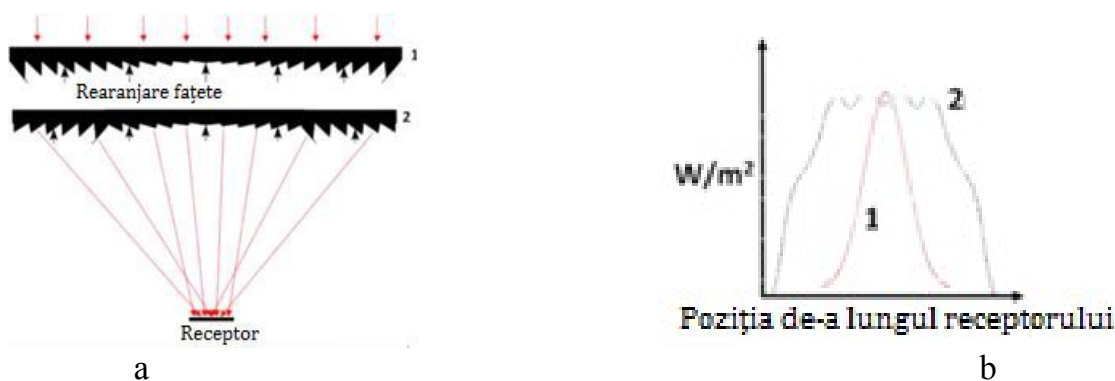


Fig. 7. Distribuție iradianță îmbunătățită a lentilelor Fresnel: prin rearanjarea inelelor lentilei Fresnel (a), este obținută o distribuție mai uniformă a iradianței (b). [1],[5]

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare)

Prin adaptarea unor macro sau micro-structuri (inele în aceste scenarii) și evitarea suprafețelor continuu pe reflectoare, se poate crește eficiența optică și distribuția iradierii. Zanganeh ș.a. au propus un concentrator solar bazat pe membrane fațetate elipsoidale din polyester care prezintă o eficiență optică de 90%, o toleranță optică bună și o eficiență optică $> 80\%$ în cadrul sistemelor (depășind limitele de concentrație 2D). Nilsson ș.a. au propus un concentrator parabolic asimetric staționar cu o suprafață a reflectorului structurat micro cu diferite micro-structuri: eficiența optică maximă obținută a fost de 88%; toate distribuțiile au redus vârfulurile de iradiere în raport cu echivalentul ne-micro-structurate.

Suprafața optică, și, prin urmare, materialul, structura și calitatea joacă, evident, un rol cheie în proiectarea unui concentrator solar de performanță. În prezent cercetările se extind pe larg în domeniul științei materialelor utilizabile la realizarea unor concentratoare solare performante..

4.3. Optica secundară

Concentrator parabolic compus (CCP) (fig. 7), este cel mai studiat elementul optic staționar și secundar și este declarat a fi un concentrator ideal, care funcționează perfect pentru toate razele din unghiul de acceptare proiectat (în geometria 2D). CPC-ul 3D este, de asemenea, foarte aproape de ideal.

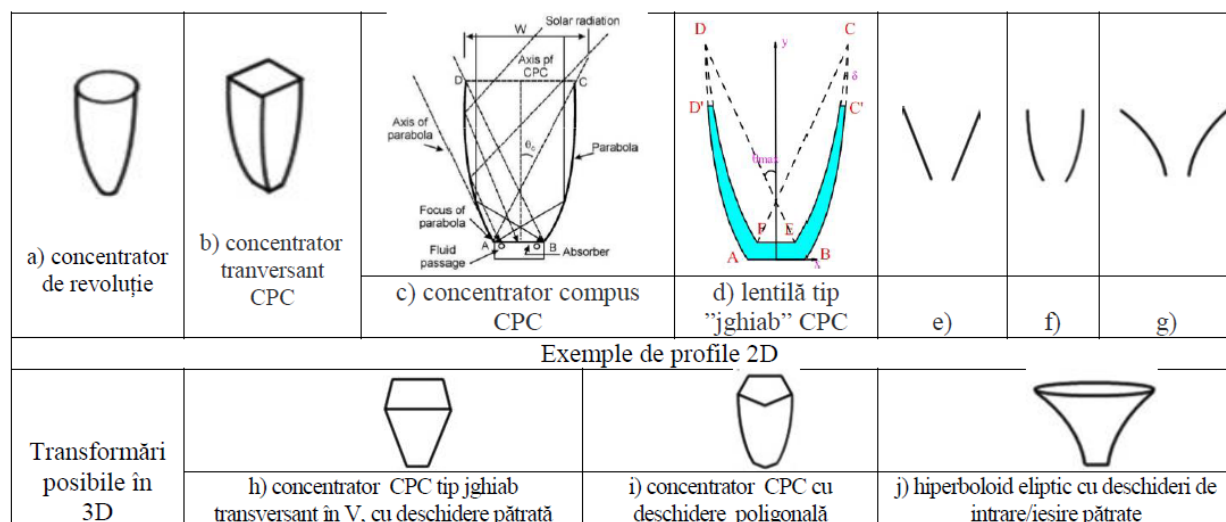


Fig. 8. Concentratoare optice. Principalele tipuri de optică secundară [1]

Concentratoarele tip CPC pot fi utilizate pentru ratele de concentrare superioare celor ale lentilelor Fresnel și se apropie (teoretic), de concentrația limită teoretică a sistemelor optice pur reflectorizante la 42,000 x dar sunt utilizate în practică la aplicații cu rapoarte de concentrare de $\eta_c > 40x$. Pentru a îmbunătăți diferite aspecte de interes, s-au cercetat diferite souții de CPC (prin proiectarea lor) cu rapoarte de concentrare și de distribuție iradiantă diferite.

Modelul optim de concentrator va fi un amalgam de factori multipli.

Tipul de CPC cel mai potrivit este determinat de: locație, condițiile radiațiilor solare incidente și opțiunile de orientare. Adaptarea specifică la particularități/condiții este deocamdată procedura cea mai benefică în dezvoltare a concentratoarelor. Uniformitatea distribuției iradianță a CPP pare a fi un defect inerent care impune investigarea altor noi sisteme optice.

Un alt element important în performanța globală a unui concentrator este dat de *metoda de răcire utilizată*, în special la sistemele cu rată de concentrare mai mare. Uniformitatea distribuției iradianței în CPP este un defect inerent și determină investigarea mai multor sisteme optice noi. Pâlniile și omogenizatoarele ușoare (Fig. 8) au fost investigate pentru a îmbunătăți unghiul de acceptare și distribuirea iradianței în sistem. În general, acestea iau forma unui con inversat sau piramidă, dar există, de asemenea, forme eliptice și hiperbolice posibile, cum ar fi hiperboloidul eliptic pătrat (SEH) proiectat de Nazmi și colab. Câteva exemple de geometrii sunt arătate în Fig. 8 .

4.4. Unghiul global de toleranță și acceptare optică

Unghiul de acceptare pentru dispozitive de concentrare ridicată (antenele parabolice, lentile Fresnel) care nu sunt prevăzute cu elemente optice suplimentare este foarte scăzut. Este motivul pentru care, o parte importantă dintre cercetările unor concentratoare solare performante vizează îmbunătățirea acestora. În Fig. 9 se reprezintă o sinteză cu aceste caracteristici pentru concentratoarele uzuale.

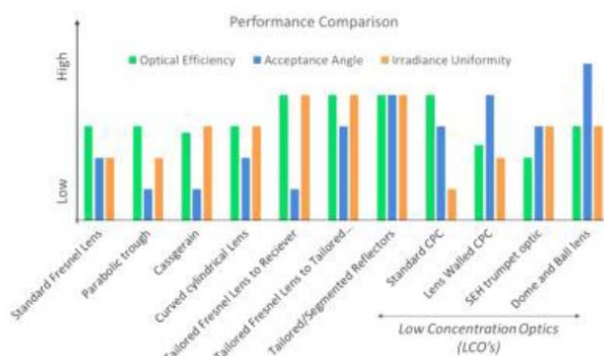


Fig. 9. Compararea performanțelor diferitelor CPV plane privind eficiența optică, unghiul de acceptare și uniformitatea iradianță la receptor. [1],[4],[5]

4.5. Materiale

Eforturile depuse de specialiștii actuali pentru îmbunătățirea performanțelor concentratoarelor solare sunt remarcabile și fructuoase. Sunt investigate material noi, special proiectate (metamateriale), sau chiar cu funcții dedicate, menite să contribuie la controlul impactului undelor radiației solare asupra colectoarelor/pnourilor solare. În conceptele aplicabile concentratoarelor solare se includ: *acoperiri selective spectrale; optica comutabilă (se poate schimba de la transparent la reflectorizant); anti-reflectorizant și reflectoare de acoperire amplificate; structuri optice cu apă; materiale nanocristaline, straturi de grafen precum și alte materiale organice și*

Sisteme de concentratoare de radiație solară, componente importante în viitoarele sisteme de valorificare a energiei solare (elemente orientative în acțiunea de proiectare a sistemelor de valorificare a energiei solare) *anorganice¹ ; graphene; structurile naturale complexe, avansate, care au fost studiate pentru a fi reproduse și adaptate pentru uz dedicat²; diverse bio-replici care acoperă o gamă largă de aplicații, studiate în prezent și pentru aplicații CPV.*

5. Concluzii. Perspective viitoare

Cercetările realizate până în prezent în domeniu (multe și pe diverse planuri), dificil de cuprins în cadrul unei astfel de comunicări, dar studiate de către autori ne permit să afirmăm că, pentru dezvoltarea tehnologiilor fotovoltaice direcțiile de cercetare viitoare se focalizează pe :

- creșterea raportului de concentrare
- utilizarea de sisteme optice secundare / omogenizante;
- reducerea lungimii traiectoriei radiațiilor solare; și
- adaptate structurii suprafețelor

În figura 10 se prezintă sintetic performanțele referitoare la rata de concentrare pentru principalele tipuri de concentratoare promovate până în prezent. Pentru fiecare tip de CPV, în raza de acțiune, versiunile cele mai sigure sunt în jumătatea de jos a cercurilor; modelele din partea superioară vor necesita precizie înaltă de fabricație și materiale de calitate.

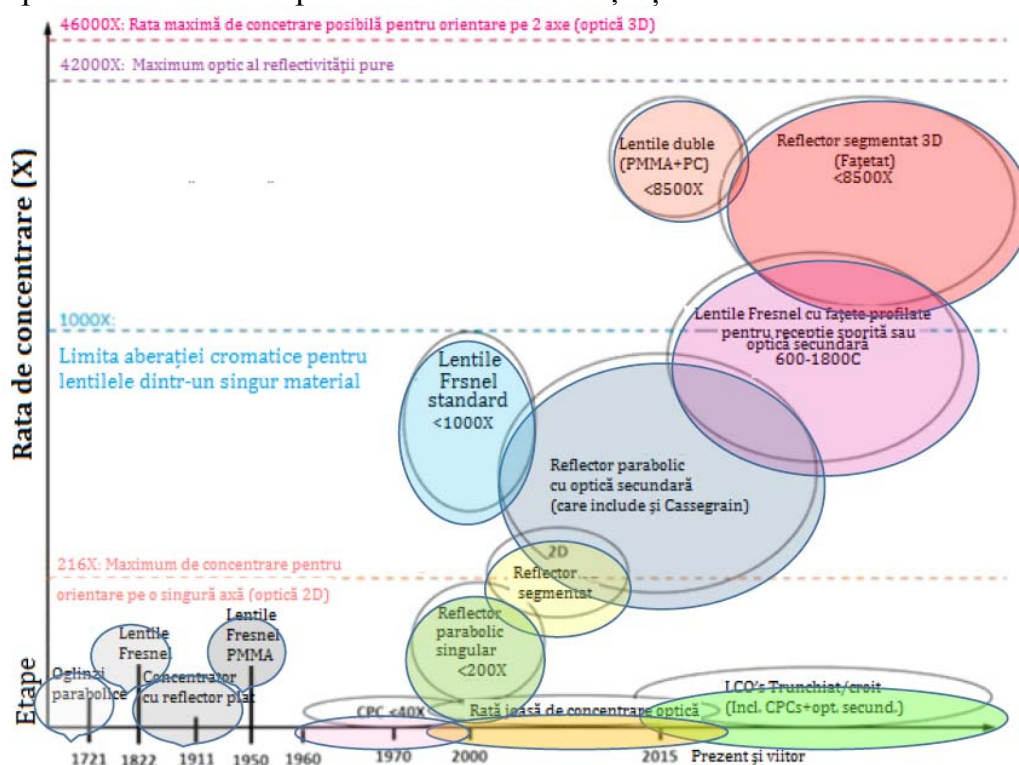


Figura 10. Evoluția cronologică a modelelor CPV și tendințele preconizate pentru viitor pentru concentratoare cu rată mare și foarte mare de concentrare [5]

¹ materiale hibride organice-anorganice (O-I) sunt nano-materiale compozite, cu o componentă anorganică și alta organică (bio-organice). Aceste materiale au de multe ori caracteristici impresionante

² microstructuri de vânătoare /capcane luminoase inscripționată pe celule solare pentru a spori eficiența de colectare & conversie a luminii.

Referințe

1. Dr. Simon P. Philipps, Dr. Andreas W. Bett, Kelsey Horowitz, Dr. Sarah Kurtz, Current status of concentrator photovoltaic (CPV) TECHNOLOGY, Rapport, Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems Ise National Renewable Energy Laboratory, NREL, 2016
2. Tyler Hamilton, Un concentrator solar mai ieftin, MIT tehnologie reviuue, 2009
3. Gaurav A. Madhugiri, High solar energy concentration with a Fresnel lens: A Review, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.2, Issue.3, May-June 2012 pp-1381-1385 ISSN: 2249-6645
4. M Khamooshi, A Review of Solar Photovoltaic Concentrator, 2014 pacesat pe /www.hindawi.com/journals/ijp/2014/958521/
5. Mehrdad Khamooshi ș.a., *O revizuire a solare fotovoltaice Concentratori*, International Journal of Photoenergy 2014(3856) June 2014, DOI: 10.1155/2014/958521
6. Știri, biblioteci proiect, proceedigs conferințe: <http://cpvconsortium.org/>
7. Colecția revistei Natura