

## Randamentul colectoarelor solari termici

### Randamentul colectoarelor solari termici fără concentratori

**Randamentul colectoarelor solari**  $\eta$ , reprezintă eficiența cu care este transformată radiația solară în căldură și poate fi calculat cu relația:

$$\eta = \frac{q_u}{I_g}$$

unde:

- $q_u$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] densitatea fluxului de căldură utilă, acumulată în agentul termic din colectori;
- $I_g$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] este densitatea fluxului radiației solare globale.

O variantă simplificată de calcul a randamentului colectoarelor solari, permite utilizarea relației:

$$\eta = \frac{q_u}{I_g} = \frac{q_0 - q_p}{I_g} = \frac{q_0}{I_g} - \frac{q_p}{I_g}$$

unde

- $q_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] este densitatea fluxului termic produs pe suprafața absorbantă, sau fracția din densitatea fluxului radiației solare globale  $I_g$ , care ajunge pe suprafața absorbantă și este transformată efectiv în căldură transmisă agentului termic din colectorul solar;
- $q_p$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] este densitatea fluxului termic pierdut în mediul ambiant, de la agentul termic.

Raportul dintre  $q_0$  și  $I_g$ , reprezintă o mărime caracteristică importantă a colectoarelor solari, denumită randament optic și notată  $\eta_0$ :

$$\eta_0 = \frac{q_0}{I_g}$$

Utilizând această notație, randamentul colectoarelor solari se poate calcula cu relația:

$$\eta = \eta_0 - \frac{q_p}{I_g}$$

Densitatea fluxului termic  $q_0$  produs de colectorul solar, depinde atât de proprietățile sticlei colectorului solar, cât și de proprietățile materialelor din care este realizată suprafața absorbantă. Randamentul optic poate fi determinat în funcție de proprietățile materialelor, utilizate în construcția colectoarelor solari termici, cu ajutorul relației:

$$\eta_0 = \tau \cdot \alpha$$

unde:

- $\tau$  este factorul de transmisie, al materialului transparent (de regulă sticlă), care acoperă și izolează colectorul asigurând și rezistența mecanică a acestuia, având valorile prezentate în tabelul 4, pentru câteva materiale uzuale;
- $\alpha$  este factorul de absorbție al materialului absorbant.

**Tab. 4.** Valori ale factorului de transmisie, pentru diferite materiale

Material	Grosime [mm]	Factor de transmisie $\tau$	
		Radiație directă	Radiație difuză
Sticlă cu fier	4	0,81	0,74
Sticlă solară (săracă în fier)	4	0,87	0,8
Plăci duble din policarbonat	8...16	0,77	0,83

Procesul de absorbție a radiației solare pe suprafața absorbantă a colectoarelor solare, este caracterizat de coeficientul de absorbție al materialului absorbant. Astfel emailul negru pentru metale, are un coeficient de absorbție  $\alpha=0,9$  ceea ce înseamnă că 90% din radiația solară care ajunge pe acest material, este transformată în căldură. În mod normal, materialele absorbante utilizate în construcția colectoarelor solare, asigură valori ale coeficientului de absorbție, în intervalul  $\alpha=0,85 \dots 0,98$ , așa cum se observă și în tabelul alăturat.

*Valori ale absorbtanței pentru diferite materiale absorbante*

Material	Absorbtanță ( $\alpha$ )	
	Emisivitate ( $\epsilon$ )	
	vizibil	infraroșu
Email negru pentru metal	0.9	0.9
Absorbant neselectiv	0.97	0.97
Crom negru	0.87	0.09
Nichel negru	0.88	0.07
Cupru fără oxigen	0.95	0.04
Absorbant selectiv TiNOX	0.95	0.05

**Observație:** Sticla utilizată la construcția captatoarelor solare, pe lângă valori ridicate ale factorului de transfer, datorat conținutului redus de fier din compoziție, este caracterizată și printr-o rezistență mecanică foarte mare. Astfel numeroși producători de colectori solare, testează rezistența mecanică a acestora cu ajutorul unor bile de oțel, având diametrul de cca. 1 inch (1inch $\approx$ 2,54cm). Aceste bile sunt lăsate să cadă pe colectorii solare, în timpul testelor, de la o înălțime de cca. 1m. Având în vedere că majoritatea colectoarelor solare trec asemenea teste de rezistență mecanică, există un grad ridicat de probabilitate, ca ele să reziste în condiții foarte bune la cele mai grele condiții care ar putea să apară în timpul exploatarei, din punct de vedere al solicitărilor mecanice, și anume la grindină cu bucăți mari de gheață. Cu toate acestea, producătorii recomandă clienților să încheie **polițe de asigurare** care să acopere integral valoarea colectoarelor solare.

Revenind la calculul randamentului colectoarelor solare, densitatea fluxului termic pierdut în mediul ambiant  $q_p$ , se poate determina cu o relație de tipul:

$$q_p = k \cdot \Delta t$$

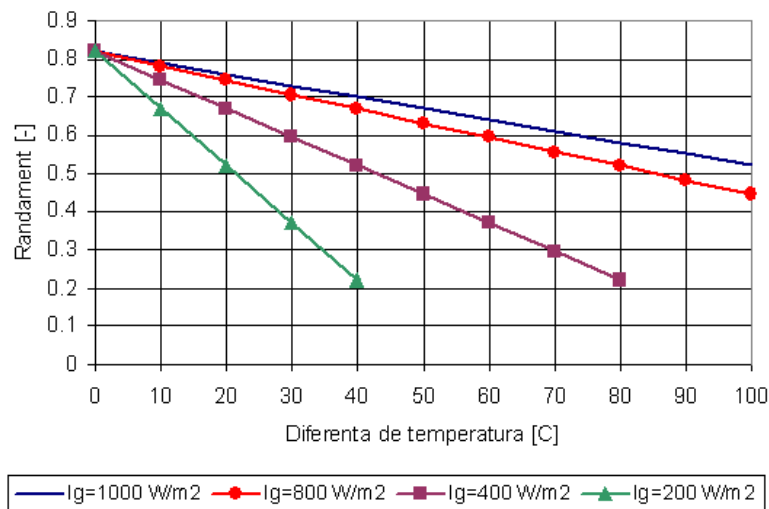
unde

- $k$  [ $W/m^2K$ ] este coeficientul global de transfer termic între colector și mediul ambiant. Valorile uzuale ale coeficientului global de transfer termic sunt de  $2 \dots 4$  [ $W/m^2K$ ];
- $\Delta t$  este diferența dintre temperatura medie a colectorului (care poate fi considerată temperatura medie a agentului termic) și temperatura mediului ambiant.

Înlocuind în relația prezentată anterior pentru calculul randamentului colectoarelor, se obține:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k \cdot \Delta t}{I_g} = \eta_0 - k \frac{\Delta t}{I_g}$$

Considerând că materialul din care sunt realizați colectori solari este sticla solară, cu o valoare medie a factorului de transmisie  $\tau=0,84$ , între valoarea de 0,87 corespunzătoare radiației directe și cea de 0,8 corespunzătoare radiației difuze (conform tabelului 4) și considerând că materialul absorbant este de cea mai bună calitate, având un coeficient de absorbție  $\alpha=0,98$ , pentru randamentul optic, se obține valoarea  $\eta_0 = \tau \cdot \alpha = 0,84 \cdot 0,98 = 0,82$ . Considerând o valoare medie și pentru coeficientul global de transfer termic  $k=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , cu ajutorul relației prezentate anterior, se pot determina prin calcul, curbe de variație a randamentului colectoarelor solari în funcție de diferența de temperatură  $\Delta t$  pentru diferite valori ale intensității radiației solare globale  $I_g$ . Asemenea curbe sunt prezentate în figura 12.



**Fig. 12.** Variația randamentului colectoarelor solari, calculată considerând o dependență liniară de diferența de temperatură

Curbele de variație a randamentului colectoarelor solari, de tipul celor prezentate în figura 12, considerând o variație liniară a randamentului, cu diferența de temperatură, sunt obținute așa cum s-a arătat deja, prin utilizarea unei relații de calcul simplificate dar intuitive. Această relație, ca și curbele trasate cu ajutorul ei, sunt valabile numai pentru diferențe de temperatură relativ reduse și numai pentru colectori plani.

O variantă corectată de calcul a randamentului colectoarelor solari, recomandată în numeroase lucrări de specialitate publicate în străinătate, se poate aplica atât pentru colectori plani cât și pentru colectori având construcții mai performante (de exemplu colectori cu tuburi vidate sau cu tuburi termice). Relația de calcul corectată este:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta t}{I_g} - k_2 \frac{\Delta t^2}{I_g}$$

unde:

- $\eta_0$  este randamentul optic, ce ține seama de eficiența cu care este absorbită energia radiației solare;
- $k_1$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] și  $k_2$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^2$ ] sunt factori de corecție caracteristici pierderilor termice;
- $\Delta t$  este diferența dintre temperatura medie a agentului termic din colector și temperatura mediului ambiant;

Factorii de corecție  $k_1$  și  $k_2$  caracteristici pierderilor termice care se manifestă în colectorii solari, datorită diferenței de temperatură dintre agentul termic încălzit de radiația solară și mediul ambiant, depind de construcția colectoarelor. În tabelul alăturat, sunt prezentate valorile randamentelor optice și ale coeficienților de corecție  $k_1$  și  $k_2$ , pentru câteva tipuri de colectori solari. Analizând valorile din acest tabel, se observă că deși colectorii plani au cele mai bune randamente optice, acestea prezintă și cele mai ridicate valori ale pierderilor termice.

Valori tipice ale randamentului optic și ale factorilor de corecție, pentru diferite tipuri de colectori

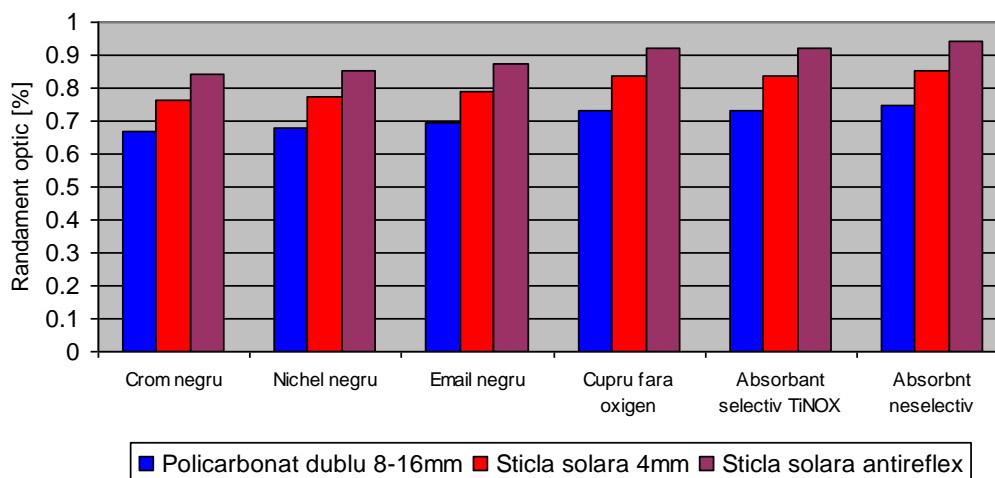
Tipul colectorului	Modelul colectorului	Coeficienții de corecție		
		$\eta_0$ [%]	$k_1$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$k_2$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-2</sup> ]
Neacoperit	Energie Solaire	94.8	12.28	0.0235
Plan	Winkler VarioSol A-antireflex	82.5	3.13	0.0152
Plan	Rehau Solect Fassadenkollektor	78.5	3.66	0.0070
Plan	Arge Integral Holz	77.7	4.36	0.0101
Vidat	Riomay Ecotube	79.4	1.02	0.0032
Vidat	Enertech EnerSol HP	73.9	1.08	0.0056
Vidat	Spring Solar SK-8 CPC	62.0	0.94	0.0070
Vidat	Thermomax Mazdon 20	76.0	1.09	0.0061
Vidat	Dallinger Sonnenpower 22	61.7	1.34	0.0101
Vidat	Kilimeko KS 1800/58-18	53.3	1.30	0.0125

**Observație:** Asemenea date sunt disponibile pe site-urile unor laboratoare de testare independente sau în literatura tehnică de specialitate. Un asemenea laborator este Solartechnik Prüfung Forschung of Swiss (<http://www.spf.ch/spf.php?lang=en&fam=1&tab=1>).

**Observație:** Trebuie menționat că dacă se efectuează comparații ale performanțelor colectoarelor cu tuburi vidate și cu tuburi termice, este dificil de menționat care dintre aceste tipuri sunt mai performante. Astfel există producători pentru care construcțiile cu tuburi vidate sunt mai performante decât cele cu tuburi termice sau decât cele cu tuburi termice ale altor producători și invers. Diferențele dintre performanțele acestor tipuri de colectori sunt relativ reduse. În consecință cele două tipuri de colectori pot fi denumite simplu: colectori cu tuburi vidate, deoarece și colectori cu tuburi termice, prezintă tuburi vidate în care se montează tuburile termice.

Analizând valorile prezentate în tabelul anterior, se observă că deși de regulă colectori neacoperiți și cei plani prezintă valori ridicate ale randamentului optic, acești colectori sunt caracterizați și de pierderile de căldură cele mai ridicate.

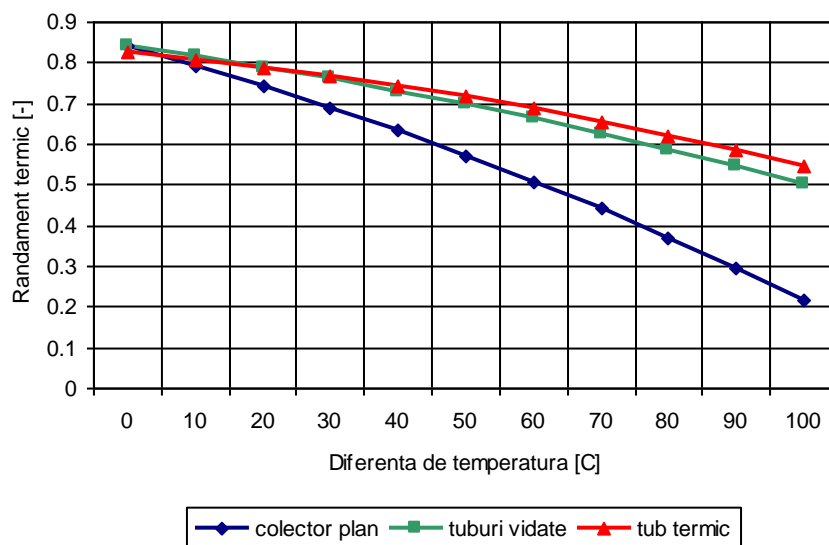
Influența unor materiale uzuale pentru construcția colectoarelor solari termici, asupra randamentului optic pe care îl asigură, este prezentată în figura alăturată.



Influența proprietăților unor materiale asupra randamentului optic

În figură se observă că absorbantul neselectiv asigură cele mai ridicate valori ale randamentului optic, însă datorită valorilor ridicate ale emisivității acestor tipuri de materiale în domeniul infraroșu colectorii realizați cu acest material prezintă pierderi ridicate de căldură – valori ridicate ale coeficienților de corecție  $k_1$  și  $k_2$ . Aceeași observație este valabilă și pentru suprafețele acoperite cu email negru pentru metale. În urma efectuării unei analize complexe, materialele cele mai recomandate pentru realizarea suprafețelor absorbante sunt absorbantul selectiv (TiNOX) și cuprul fără oxigen, datorită emisivităților reduse ale acestor materiale în domeniul infraroșu, care asigură pierderi termice minime. Ca suprafață transparentă de acoperire, cel mai recomandat material este sticla solară antireflex, caracterizată prin valorile cele mai ridicate ale transmitanței. Combinația dintre sticla solară antireflex și absorbantul selectiv (TiNOX) sau cuprul fără oxigen asigură cea mai bună comportare a colectoarelor solari termici, datorită valorilor ridicate ale randamentului optic pe care le asigură. Aceste combinații de materiale asigură și pierderilor termice minime datorită valorilor reduse ale coeficienților de corecție  $k_1$  și  $k_2$ .

Dacă se calculează randamentul colectoarelor solari cu relația de calcul corectată, se pot trasa curbe de variație ale acestui parametru în funcție de diferența de temperatură  $\Delta t$  și de intensitatea radiației solare globale  $I_g$ , așa cum sunt curbele prezentate în figura alăturată, obținute pentru câteva modele de colectoare solare termice: plan - Winkler VarioSol A-antireflex; cu tuburi vidate - Riomay Ecotube sau cu tuburi termice - Thermomax Mazdon 20.

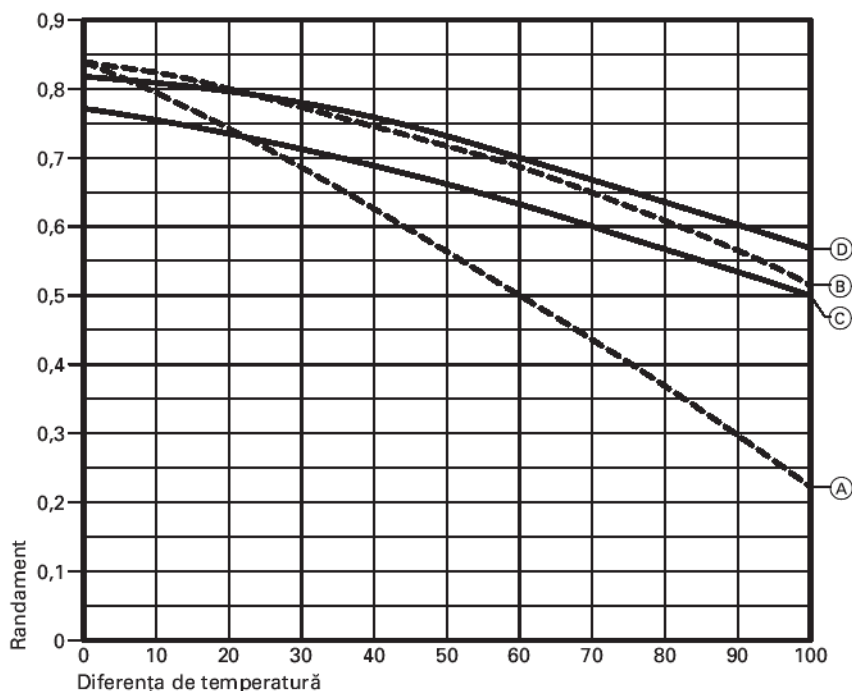


Influența diferenței de temperatură asupra randamentului termic, pentru  $I_g=750W/m^2$

Asemenea tipuri de curbe de variație a randamentului termic al colectoarelor solari, sunt prezentate în fișele tehnice ale producătorilor sau ale unor laboratoare independente de testare.

Relația de calcul necorectată introduce erori de calcul importante, mai ales pentru colectoarele cu tuburi vidate și cu tuburi termice, în special în domeniul diferențelor de temperatură mai ridicate. Din acest motiv în continuare va fi utilizată numai relația de calcul corectată pentru determinarea randamentului termic al colectoarelor solari termici. Această afirmație este justificată și de alura curbelor determinate experimental, care este apropiată numai de alura curbelor determinate cu ajutorul relației de calcul corectate.

În figura 14 sunt prezentate câteva curbe de variație a randamentului, pentru câteva tipuri de colectori solari, produși de firma Viessmann (Germania).



**Fig. 14.** Variația randamentului în funcție de diferența de temperatură, pentru câteva tipuri de colectori solari Viessmann (Germania)

A – colectori plani; B – colectori cu tuburi vidate; C – colectori cu tuburi vidate amplasate vertical;

D – colectori cu tuburi termice

[www.viessmann.com](http://www.viessmann.com)

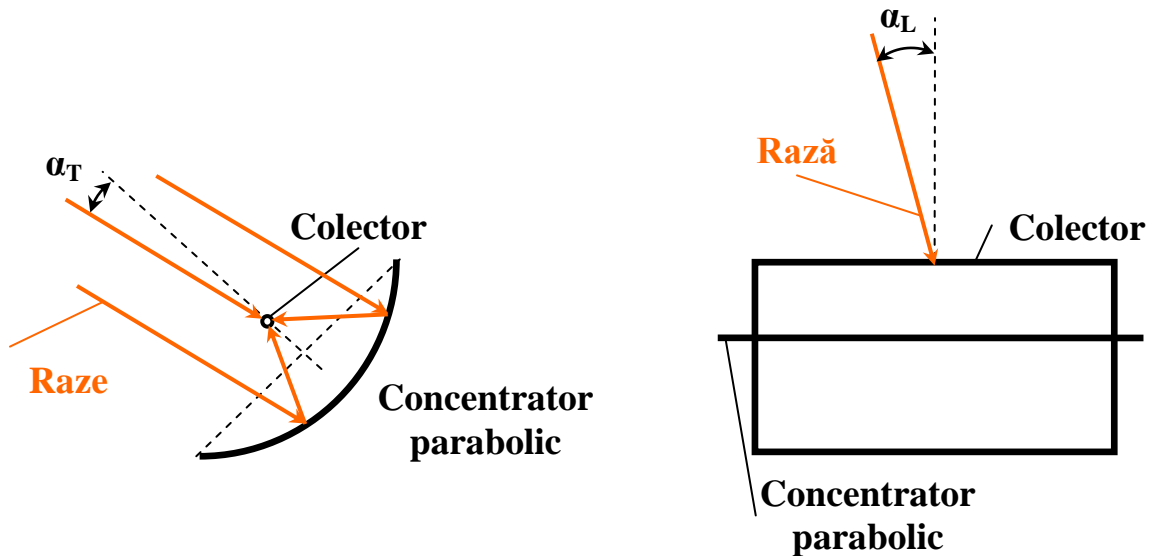
În regim de lucru netaționar, atât intensitatea radiației solare, cât și diferențele de temperatură se modifică permanent. Pot fi menționate variații diurne, lunare, sezonale și chiar anuale. În aceste condiții, valorile randamentelor termice indicate în figurile anterioare, pot fi utile numai pentru compararea performanțelor colectoarelor solari termici între aceștia, însă nu pot fi utilizate pentru a descrie comportarea colectoarelor solari în regim termic netaționar.

Pentru analiza regimurilor netaționare de lucru, trebuie menționat și că valoarea intensității radiației solare, care intervine în relația corectată, reprezintă valoarea normală la planul colectorului, iar unghiul dintre normala la planul colectorului și direcția soarelui este continuu variabil. Unghiurile de înclinare și deorientare a colectorului solar față de direcția Sud, sunt de asemenea variabile și reprezintă parametrii importanți ai unor asemenea analize.

## Randamentul colectoarelor solari termici cu concentratori

Pentru colectoarele cu concentratori, randamentul depinde de poziția relativă dintre unghiul de incidență al razelor solare și normala la planul format de laturile concentratorului parabolic. Pentru aceste tipuri de colectoare, există un unghi transversal de incidență ( $\alpha_T$ ) și un unghi longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ ).

*Pentru colectoarele cu concentratori parabolici* cele două unghiuri de incidență sunt reprezentate în figurile alăturate.

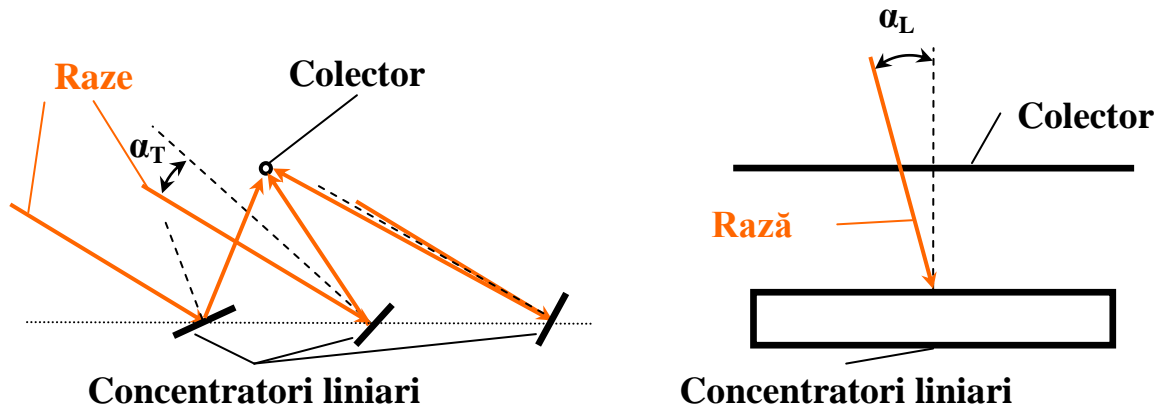


Unghiul transversal de incidență ( $\alpha_T$ ) și unghiul longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ )

De regulă, datorită echipării cu sisteme de urmărire (tracking), pentru colectoarele cu concentratori parabolici, unghiul transversal de incidență este 0.

Unghiul longitudinal de incidență prezintă variație sezonieră și depinde de altitudinea soarelui pe cer.

**Pentru colectori cu concentratori liniari** cele două unghiuri de incidență sunt reprezentate în figurile alăturate.



Unghiul transversal de incidență ( $\alpha_T$ ) și unghiul longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ ) pentru concentratori liniari

**Pentru calculul randamentului colectoarelor cu concentratori parabolici**, se poate utiliza relația:

$$\eta = k_T \cdot k_L \cdot \eta_0 - k_1 \frac{\Delta t}{I_g}$$

unde:

- $\eta_0$  este randamentul optic, ce ține seama de eficiența cu care este absorbită energia radiației solare;
- $k_T$  este coeficientul de corecție datorat unghiului transversal de incidență ( $\alpha_T$ ); ( $k_T = 1$ )
- $k_L$  este coeficientul de corecție datorat unghiului longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ )
- $k_1$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] este un coeficient de corecție caracteristic pierderilor termice;
- $\Delta t$  este diferența dintre temperatura medie a agentului termic din colector și temperatura mediului ambiant;
- $I_g$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] este intensitatea radiației solare incidente normală la planul colectorului

Deoarece pentru colectoarele cu concentratori parabolici, unghiul transversal de incidență este 0, coeficientul de corecție ( $k_T$ ) datorat unghiului transversal de incidență este 1.

În tabelul alăturat sunt prezentate valori ale randamentului optic și ale coeficientului de corecție caracteristic pierderilor termice, pentru colectori cu concentratori parabolici ai firmei Soltigua (Italia).

valori ale  $\eta_0$  și ale  $k_1$ , pentru colectori cu concentratori parabolici Soltigua (Italia)

Colector	$\eta_0$	$k_1$
Soltigua PTMx	0.747	0.64

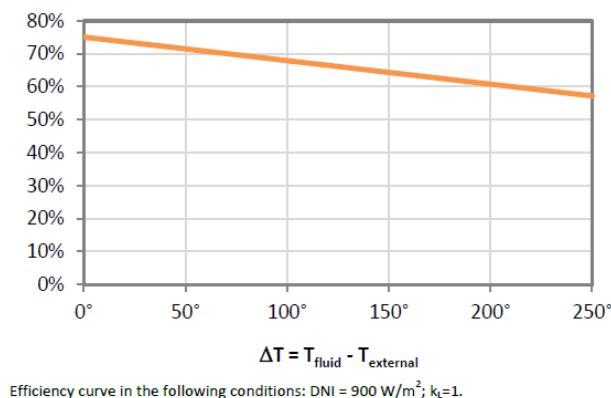


În tabelul alăturat sunt prezentate valori ale coeficientului de corecție  $k_L$ , datorat unghiului longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ ), pentru colectori cu concentratori parabolici PTMx ai firmei Soltigua (Italia).

Valori ale coeficientului de corecție  $k_L$ , pentru colectori cu concentratori parabolici Soltigua (Italia)

Unghi incidentă	PTMx-18	PTMx-24	PTMx-30	PTMx-36
0°	1.000	1.000	1.000	1.000
10°	0.973	0.976	0.977	0.978
20°	0.912	0.917	0.920	0.921
30°	0.820	0.826	0.830	0.833
40°	0.698	0.706	0.711	0.714
50°	0.551	0.561	0.566	0.570
60°	0.385	0.395	0.401	0.405

În figura alăturată este prezentată curba de variație a randamentului colectoarelor cu concentratori parabolici Soltigua (Italia).



**Pentru calculul randamentului colectoarelor cu concentratori liniari**, se poate utiliza relația:

$$\eta = k_T \cdot k_L \cdot \eta_0 - k_1 \frac{\Delta t}{I_g} - k_2 \frac{\Delta t^2}{I_g}$$

unde:

- $\eta_0$  este randamentul optic, ce ține seama de eficiența cu care este absorbită energia radiației solare;
- $k_T$  este coeficientul de corecție datorat unghiului transversal de incidență ( $\alpha_L$ ); ( $k_T = 1$ )
- $k_L$  este coeficientul de corecție datorat unghiului longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ )
- $k_1$  [W/m<sup>2</sup>K] și  $k_2$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>] sunt coeficienți de corecție caracteristici pierderilor termice;
- $\Delta t$  este diferența dintre temperatura medie a agentului termic din colector și temperatura mediului ambiant;
- $I_g$  [W/m<sup>2</sup>] este intensitatea radiației solare incidente normală la planul colectorului

Pentru colectoarele cu concentratori liniari, unghiul transversal de incidență diferă pentru fiecare concentrator (oglină) în parte, iar coeficientul de corecție ( $k_T$ ) datorat unghiului transversal de incidență este diferit de 1.

În tabelul alăturat sunt prezentate valori ale randamentului optic și ale coeficientului de corecție caracteristic pierderilor termice, pentru colectorii cu concentratori liniari ai firmei Soltigua (Italia).

valori ale  $\eta_0$  și ale  $k_1$  și  $k_2$ , pentru colectorii cu concentratori parabolici Soltigua (Italia)

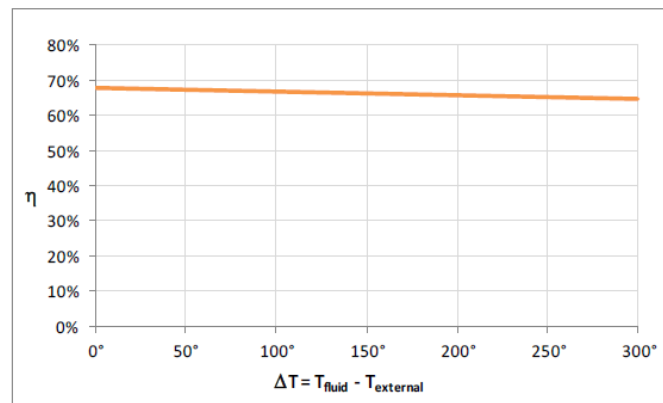
Colector	$\eta_0$	$k_1$	$k_2$
Soltigua FLT10v	0.67	0.032	0.00018

În tabelul alăturat sunt prezentate valori ale coeficienților de corecție  $k_T$  și  $k_L$ , datorati unghiului transversl de incidență ( $\alpha_T$ ) și respectiv unghiului longitudinal de incidență ( $\alpha_L$ ), pentru colectorii cu concentratori parabolici FLT10v ai firmei Soltigua (Italia).

Valori ale coeficientului de corecție  $k_T$  și  $k_L$ , pentru colectorii cu concentratori liniari Soltigua (Italia)

Unghi incidență	$k_T(\alpha_T)$	$k_L(\alpha_L)$
0°	1.000	1.000
10°	0.984	0.974
20°	0.958	0.909
30°	0.936	0.812
40°	0.894	0.686
50°	0.851	0.521
60°	0.691	0.334
70°	0.478	0.146
80°	0.252	0.020
90°	0.000	0.000

În figura alăturată este prezentată curba de variație a randamentului colectoarelor cu concentratori liniari Soltigua (Italia).



Efficiency curve in the following conditions:  $DNI = 900 \text{ W/m}^2$ ;  $k_1=1$ ;  $k_2=1$ .