

Noțiuni de "geometrie solară"

Una dintre problemele pe care le ridică utilizarea energiei solare, este reprezentată de faptul că aceasta prezintă variații importante, atât diurne cât și sezoniere, datorate poziției reciproce dintre Soare și zona de pe suprafața Pământului în care se dorește utilizarea energiei solare.

Poziția Soarelui pe cer, poate fi calculată cu ajutorul unui algoritm matematic, prezentat în (Duffie & Beckman, 1980), (Quaschnig, 2007), sau în studiul realizat la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (Bălan et. al., 2010).

Poziția Soarelui pe cer, depinde în mod evident de locația observatorului, iar aceasta este definită prin coordonatele geografice latitudine (paralela) (φ) și longitudine (meridianul) (λ).

Ceilalți parametri ai modelului matematic, sunt prezentați în continuare.

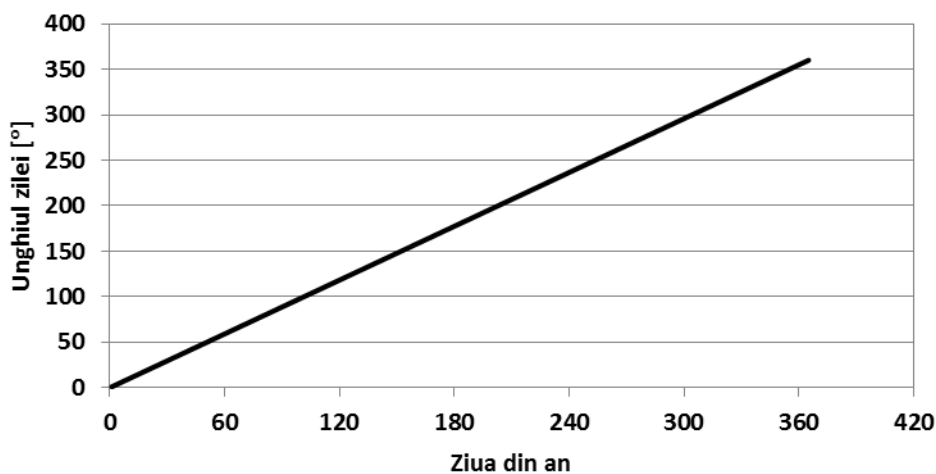
Unghiul zilei (*day angle*) (y) se calculează cu relația:

$$y = 360^\circ \frac{n}{365} [^\circ]$$

unde:

n este numărul zilei din an.

Este evident că unghiul zilei prezintă o variație liniară, prezentată în figura alăturată.

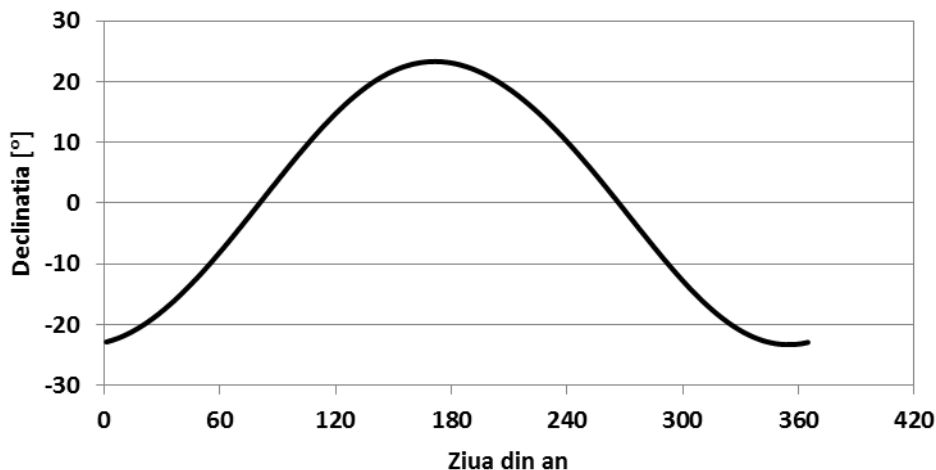


Unghiul zilei

Unghiul de declinație al Soarelui (*declination of the Sun*) (δ) (sau declinația) reprezintă unghiul dintre razele soarelui și planul ecuatorului. Acest unghi depinde de unghiul zilei (y).

$$\delta(y) = 0.3948 - 23.25559 \cdot \cos(y + 9.1^\circ) - 0.3915 \cdot \cos(2y + 5.4^\circ) - 0.1764 \cdot \cos(3y + 105.2^\circ)$$

Curba de variație a unghiului de declinație este prezentată în figura alăturată.



Curba de variație a unghiului de declinație

Valoarea maximă a declinației este $\pm 23^\circ 27'$ și corepunde solstițiilor ($\delta = +23^\circ 27'$ în emisfera nordică, la solstițiul de vară și $\delta = -23^\circ 27'$ în emisfera nordică, la solstițiul de iarnă).

Valoarea minimă a declinației este 0° la echinocții.

Pentru verificarea modului de implementare a relației prezentate, valorile calculate au fost comparate cu valorile medii reale, corespunzătoare unui ciclu de patru ani, disponibile pe internet la adresa: http://www.wsanford.com/~wsanford/exo/sundials/DEC_Sun.html (28.01.2016).

Rezultate comparative sunt prezentate în tabelul alăturat.

Valorile reale și calculate ale unghiului de declinație

Day	2008.01	2008.02	2008.03	2008.04	2008.05	2007.08	2007.09	2007.10	2007.11	2007.12
21	-20°05'	-10°52'	0°00'	+11°39'	+20°04'	+12°19'	+0°57'	-10°29'	-19°47'	-23°26'
22	-19°52'	-10°30'	+0°24'	+12°00'	+20°16'	+11°59'	+0°33'	-10°50'	-20°00'	-23°26'
23	-19°38'	-10°08'	+0°47'	+12°20'	+20°28'	+11°39'	+0°10'	-11°12'	-20°13'	-23°26'
				↑	Valori reale	↑				
				↓	Valori calculate	↓				
21	-19°53'	-10°59'	0°06'	+11°59'	+20°21'	+12°27'	+1°09'	-10°35'	-19°57'	-23°17'
22	-19°41'	-10°38'	+0°30'	+12°20'	+20°32'	+12°08'	+0°45'	-10°57'	-20°10'	-23°17'
23	-19°28'	-10°17'	+0°54'	+12°40'	+20°44'	+11°48'	+0°21'	-11°19'	-20°23'	-23°16'

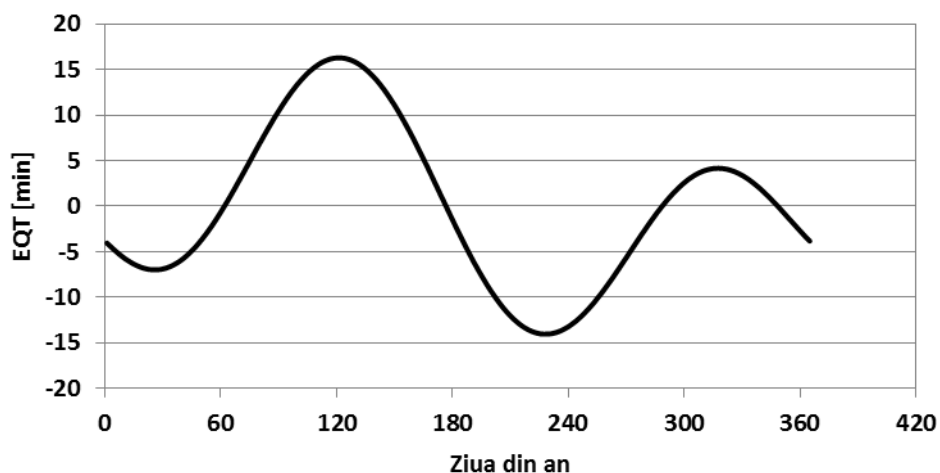
Se observă că diferențele dintre valorile calculate și cele reale sunt mai mici de $20' = 0.3^\circ$.

Valorile evidențiate (bold) corespund echinocțiilor ($\delta = 0^\circ$; 20-21.03 și 22-23.09), respectiv solstițiilor ($\delta = \pm 23.27^\circ$; 20-21.06 și 21-22.12).

Ecuția timpului (*the equation of time*) (EQT) [min] este diferența înregistrată de-a lungul anului, dintre timpul indicat pe cadranul unui ceas solar și timpul indicat de un ceas.

$$EQT(y) = 0.0066 - 7.3525 \cdot \cos(y + 85.9^\circ) + 9.9359 \cdot \cos(2y + 108.9^\circ) + 0.3387 \cdot \cos(3y + 105.2^\circ)$$

Curba de variație a acestei mărimi este prezentată în figura alăturată.



Ecuția timpului

Se observă că diferența dintre timpul indicat pe cadranul unui ceas solar și timpul indicat de un ceas, prezintă o variație maximă de cca. ± 15 min.

Ora locală aparentă (*mean local time*) MLT [min] depinde de ora locală (*local time*) (LT), de fusul orar (*time zone*) (TZ) și de longitudine (λ).

În cazul României: $LT - TZ = EET$ Ora Europei de Est (*Eastern European Time*).

$$MLT = LT - TZ + \lambda \cdot 4 \text{ min}/^\circ \text{ [min]}$$

Ultimul termen al relației de calcul provine din faptul că Soarele se deplasează pe cer cu unghi de $4^\circ/\text{min}$.

Ora solară (*solar time*) ST [h] se calculează cu relația:

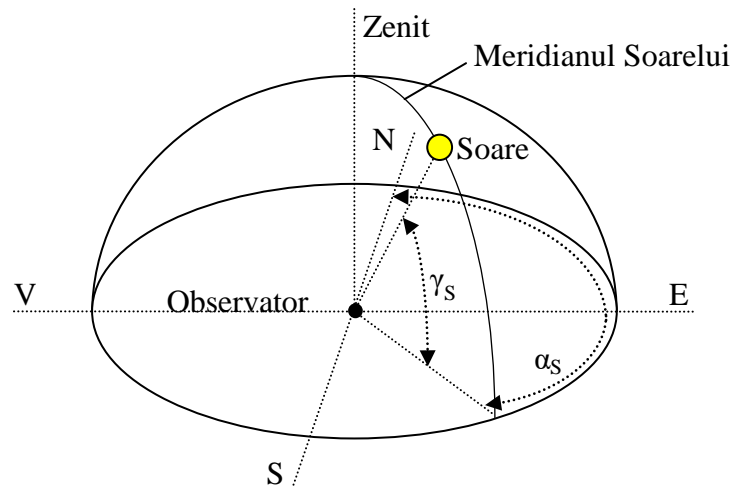
$$ST = \frac{MLT + EQT}{60} \text{ [h]}$$

Unghiul orar al Soarelui (*hour angle of the Sun*) (ω) [$^\circ$] este unghiul dintre direcția Soarelui și planul determinat de axa Pământului și direcția zenitului (verticala locului).

$$\omega = (12 - ST) \cdot 15^\circ/\text{h}$$

Unghiul altitudinii solare (*angle of the solar altitude*) γ_S [°] și **unghiul azimutului solar** (*angle of solar azimuth*) α_S [°], reprezintă coordonatele polare sau unghiulare, care definesc poziția Soarelui pe cer față de un punct de referință (observator) aflat pe suprafața Pământului.

Cele două unghiuri sunt reprezentate în figura alăturată.



Unghiul altitudinii solare γ_S și unghiul azimutului solar α_S
(Bălan et. al., 2010)

Cele două unghiuri se calculează cu relațiile:

$$\begin{aligned} \gamma_S &= \arcsin(\cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)) \\ \alpha_S &= 180^\circ \pm \arcsin((\sin(\gamma_S) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta)) / (\cos(\gamma_S) \cdot \cos(\varphi))) \\ &\pm = "+" \text{ dacă } ST > 12:00 \text{ și } "-" \text{ dacă } ST < 12:00 \end{aligned}$$

Cu ajutorul celor două unghiuri (coordoanate polare), pot fi trasate diagrame de poziție a Soarelui pe cer.

Diagramele de poziție a Soarelui pe cer, pot fi determinate, pentru orice locație, în funcție de coordonatele geografice, fie cu ajutorul algoritmului prezentat, fie cu ajutorul altor instrumente de calcul, dintre care se menționează un program de calcul al Universității din Oregon SUA, Laboratorul de monitorizare a radiației solare, disponibil pe internet.

<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

Dacă pentru Cluj-Napoca se consideră coordonatele geografice: latitudine ($\varphi=46.778^\circ$) și longitudine ($\lambda=23.571^\circ$), digrama de poziție a Soarelui pe cer, furnizată de acest program este prezentată în figura alăturată.

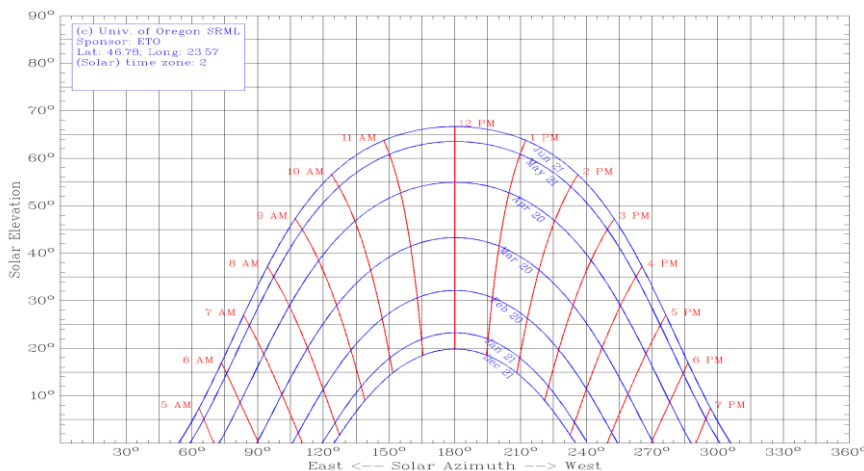


Diagrama de poziție a Soarelui pe cer, pentru Cluj-Napoca
<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

Diagrama de poziție pentru Cluj-Napoca, calculată cu ajutorul modelului matematic prezentat, implementat în Excel, este prezentată în figura alăturată.

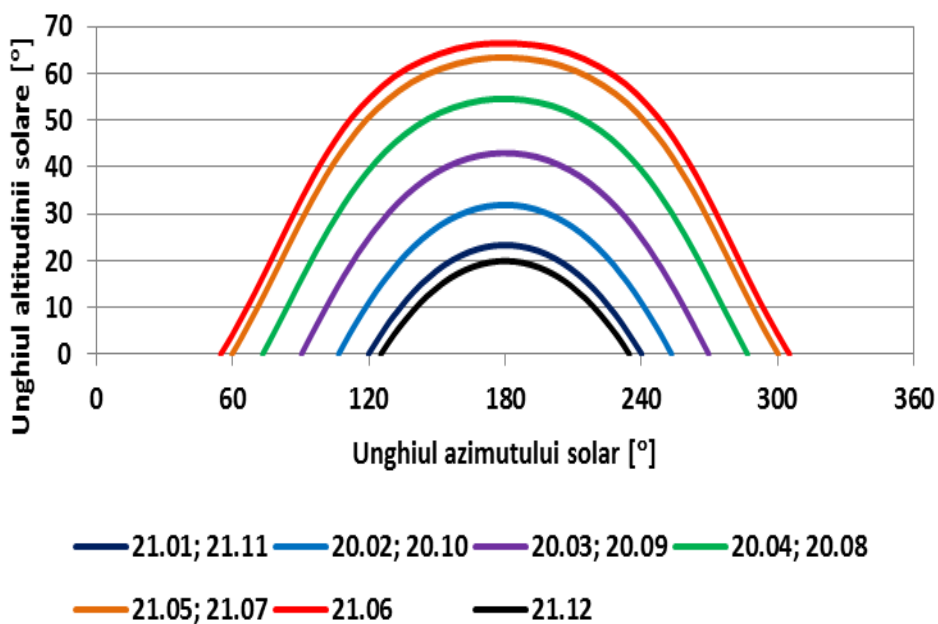
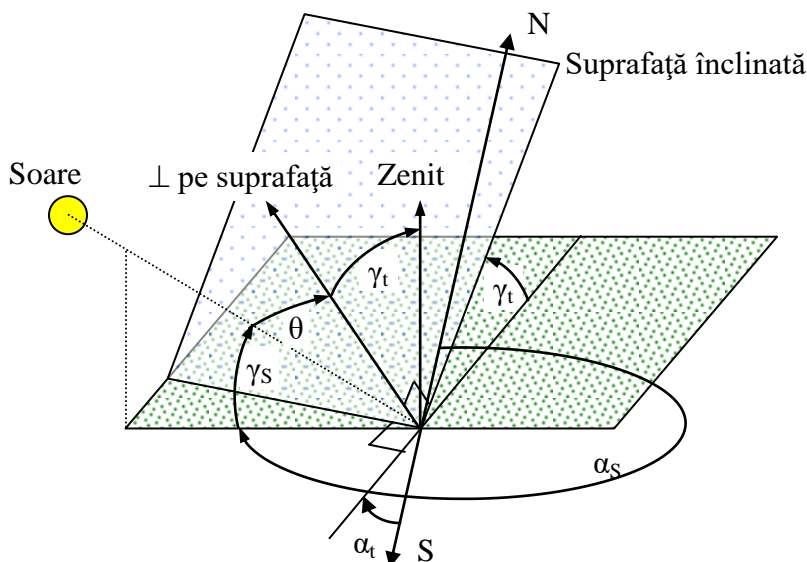


Diagrama de poziție a Soarelui pe cer, pentru Cluj-Napoca (Excel)

Pentru aplicațiile în care se utilizează energia solară, prezintă importanță și calculul “geometriei solare”, raportate la suprafețe înclinate, care reprezintă suprafețele caracteristice (reprezentative) ale colectoarelor solari, indiferent de tipul acestora.

față de orizontală și față de direcția Sudului geografic.

Elementele geometrice necesare acestor tipuri de calcule sunt prezentate în figura alăturată.



Elemente de “geometrie solară” raportate la suprafețe înclinate
(Bălan et. al., 2010)

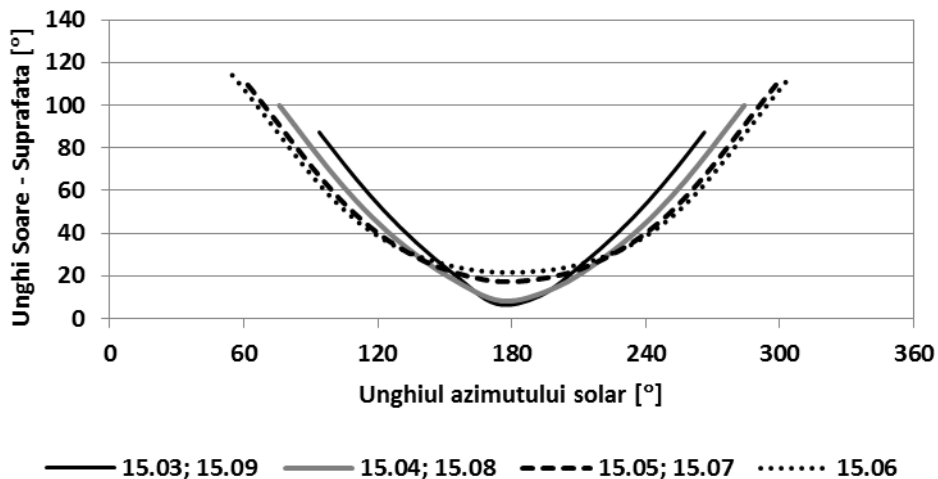
Unghiul de înclinare față de orizontală (tilt angle) γ_t [°]. Pentru acest unghi, valoarea 0° semnifică faptul că suprafața este orizontală, iar valoarea 90° semnifică faptul că suprafața este verticală.

Unghiul de orientare față de azimut (față de direcția Sud) (azimuth angle of tilted surface) α_t [°]. Acest unghi se măsoară dinspre direcția Sud spre Vest, Nord, Est. Pentru acest unghi, câteva valori semnificative sunt următoarele: 0° semnifică faptul că suprafața este orientată spre Sud, 90° semnifică faptul că suprafața este orientată spre Vest, 180° semnifică faptul că suprafața este orientată spre Nord, iar 270° semnifică faptul că suprafața este orientată spre Est.

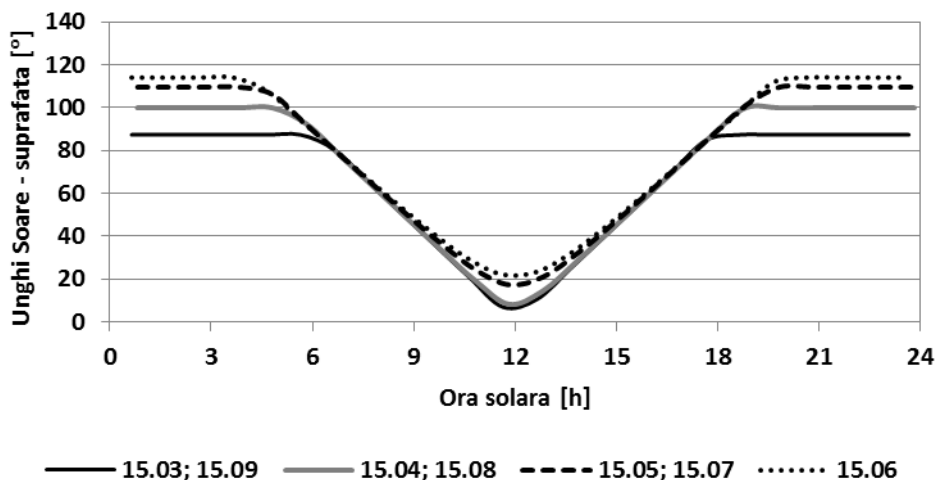
Unghiul de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată (solar angle of incidence on a tilted surface) θ [°], este unghiul dintre direcția razelor solare și normala la suprafața înclinată. Direcția razelor solare depinde de cele două unghiuri care definesc poziția Soarelui pe cer (γ_s și α_s), iar direcția normală la suprafața înclinată depinde de cele două unghiuri care definesc poziția suprafeței înclinate (γ_t și α_t). În consecință unghiul de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată (θ), depinde de toate cele patru unghiuri menționate (γ_s , α_s , γ_t , α_t).

$$\theta = \arccos (-\cos(\gamma_s) \cdot \sin(\gamma_t) \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_t) + \sin(\gamma_s) \cdot \cos(\gamma_t))$$

În figurile alăturate este prezentată curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată (unghiul Soare - suprafață), pentru localitatea Cluj-Napoca și pentru câteva zile din an, în funcție de unghiul azimutului solar și în funcție de ora solară, pentru o suprafață înclinată la 45° față de orizontală ($\gamma_t=45^\circ$) și pentru câteva valori ale unghiului de orientare față de direcția Sud ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest); ($\alpha_t=0^\circ$ / Est).

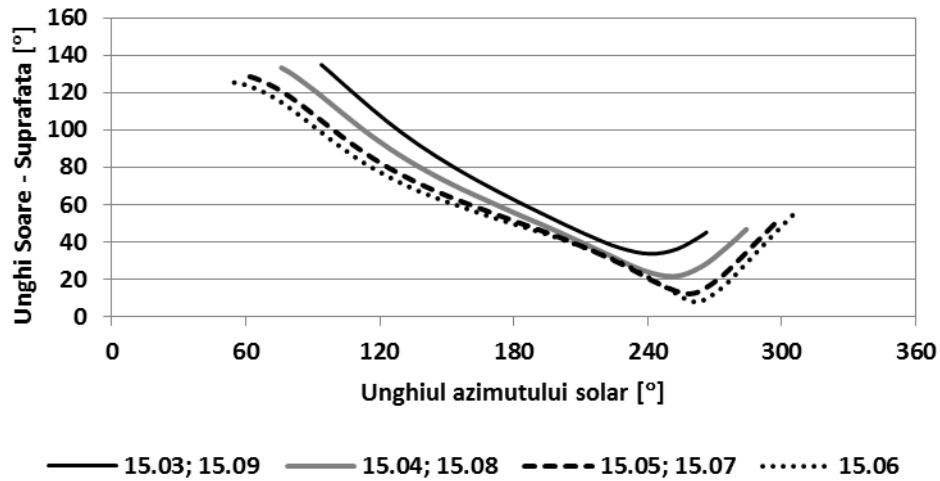


Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată în funcție de unghiul azimutului solar
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)

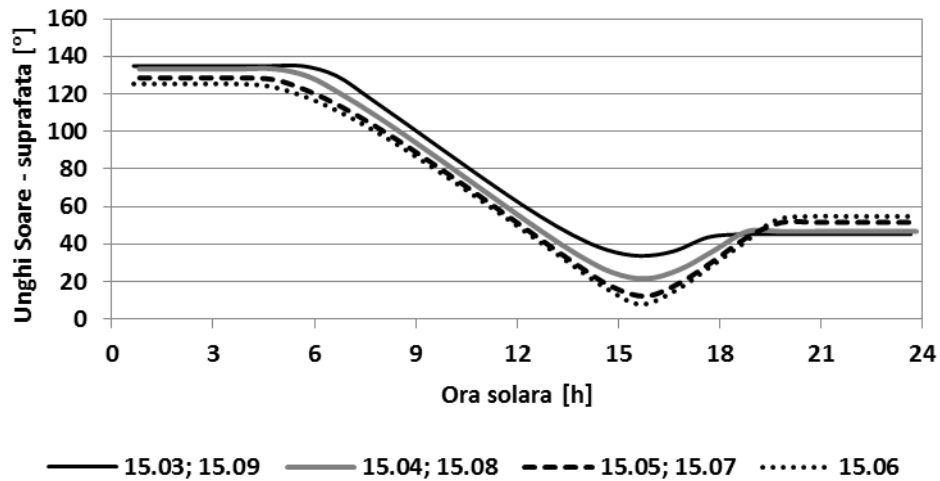


Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată în funcție de ora solară
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)

Se observă că dacă suprafața înclinată este orientată spre Sud, unghiul de incidență dintre radiația solară și suprafața înclinată, prezintă cele mai mici valori atunci când unghiul azimutului solar ($\alpha_s=180^\circ$), sau când ora solară este 12, deci la miezul zilei. În condiții de cer senin, acest moment corespunde cu valorile cele mai ridicate ale intensității radiației solare iar aceasta poate fi valorificată cel mai eficient.

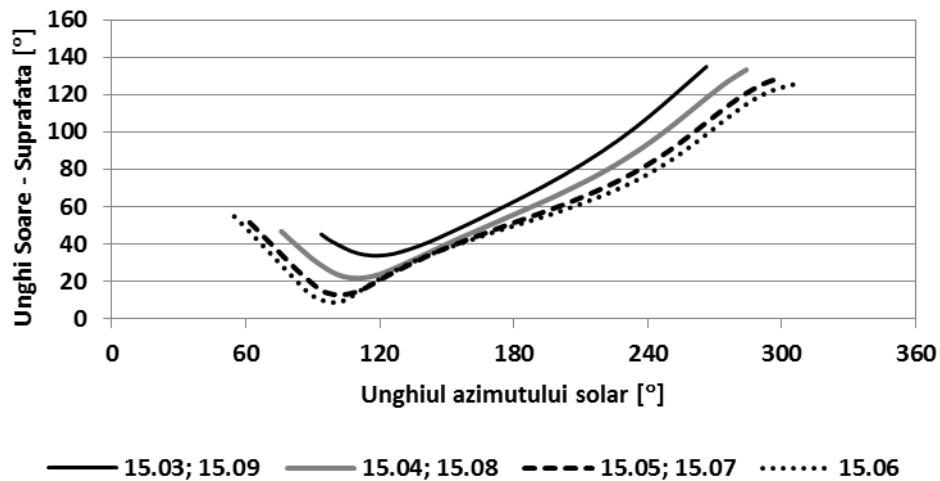


Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată
 în funcție de unghiul azimutului solar
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)

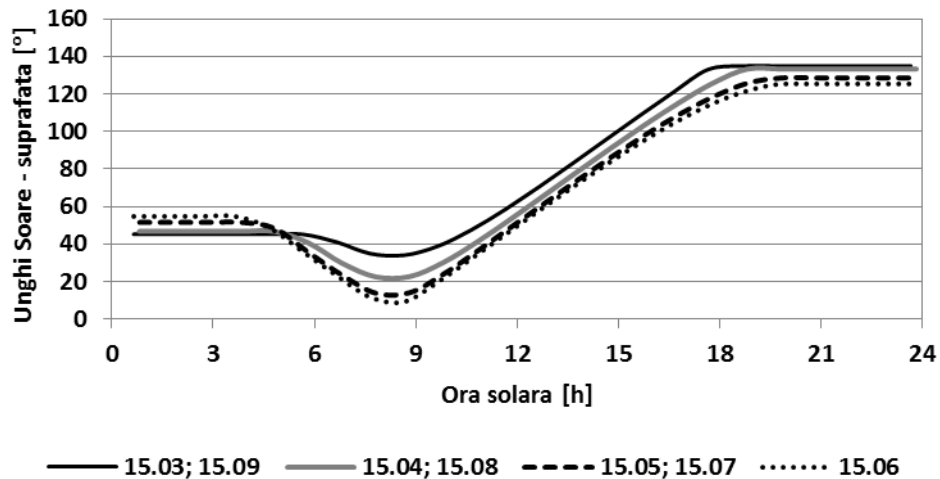


Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată
 în funcție de ora solară
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)

Se observă că dacă suprafața înclinată este orientată spre Vest, unghiul de incidență dintre radiația solară și suprafața înclinată, prezintă cele mai mici valori atunci când unghiul azimutului solar ($\alpha_s=260^\circ$), sau când ora solară este 16, deci la începutul serii. În condiții de cer senin, acest moment corespunde cu valori ale intensității radiației solare, care deja încep să scadă, iar energia solară poate fi valorificată mai puțin eficient, decât în cazul orientării spre Sud.



Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată
în funcție de unghiul azimutului solar
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Est)



Curba de variație a unghiului de incidență al radiației solare pe suprafața înclinată
în funcție de ora solară
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Eest)

Se observă că dacă suprafața înclinată este orientată spre Est, unghiul de incidență dintre radiația solară și suprafața înclinată, prezintă cele mai mici valori atunci când unghiul azimutului solar ($\alpha_s=100^\circ$), sau când ora solară este 8, deci la începutul zilei. În condiții de cer senin, acest moment corespunde cu valori ale intensității radiației solare, care abea încep să crească, iar energia solară poate fi valorificată mai puțin eficient, decât în cazul orientării spre Sud.

Radiația solară globală pe o suprafață înclinată (*global solar radiation on a tilted surface*) (I_{gt}) [W/m^2] prezintă în cazul general trei componente.

$$I_{gt} = I_{dirt} + I_{dift} + I_{grt}$$

unde:

I_{dirt} [W/m^2] este radiația solară directă, normală pe suprafața înclinată;

I_{dift} [W/m^2] este radiația solară difuză, normală pe suprafața înclinată;

I_{grt} [W/m^2] este radiația solară reflectată de sol, normală pe suprafața înclinată.

Radiația solară directă, normală pe suprafața înclinată (*direct radiation normal on the tilted surface*) (I_{dirt}) [W/m^2] se determină cu relația:

$$I_{dirt} = I_{dir} \cdot \cos \theta / \sin \gamma_s$$

unde I_{dir} [W/m^2] este radiația solară directă, normală pe suprafața orizontală.

Radiația solară difuză, normală pe suprafața înclinată (*diffuse radiation normal on the tilted surface*) (I_{dift}) [W/m^2] se poate determina în două ipoteze:

- considerând că radiația solară difuză este uniformă (I_{difti}) (ipoteza izotropiei radiației solare difuze):

$$I_{difti} = I_{dif} \cdot 1/2 \cdot (1 + \cos \gamma_t)$$

unde I_{dif} [W/m^2] este radiația solară difuză, normală pe suprafața orizontală.

sau

- considerând că radiația solară difuză este neuniformă (I_{difta}) (ipoteza neizotropiei radiației solare difuze):

$$I_{difta} = I_{difi} \cdot (1 + F + \sin^3(\gamma_t / 2)) \cdot (1 + F + \cos^2 \theta \cdot \cos^3 \gamma_s)$$

unde F este un factor de corecție, care se poate determina cu relația:

$$F = 1 - (I_{dir} / I_{gh})^2$$

unde I_{gh} [W/m^2] este radiația solară globală pe suprafața orizontală.

Radiația solară reflectată de sol, normală pe suprafața înclinată (*reflected radiation normal on the tilted surface*) (I_{grt}) [W/m^2] se determină cu relația:

$$I_{grt} = I_{gh} \cdot A \cdot (1 - \cos \gamma_t)$$

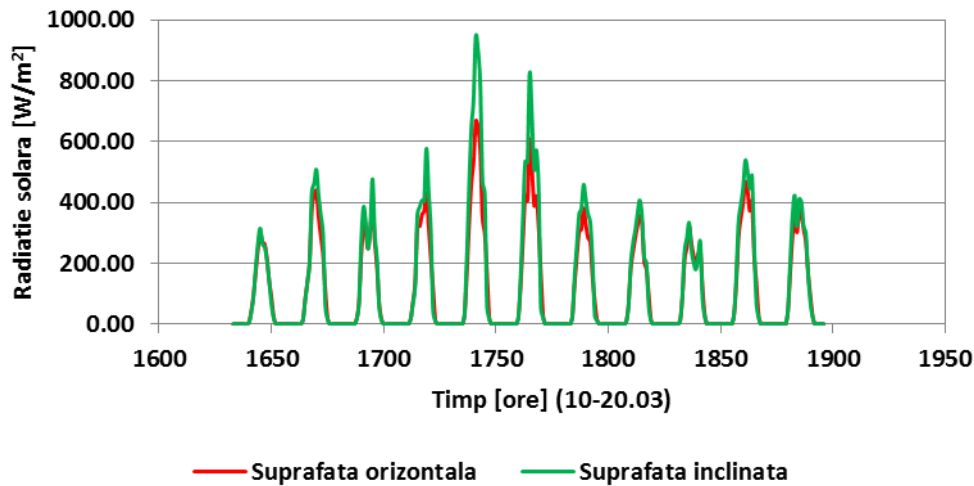
unde A reprezintă albedoul, definit ca măsura în care suprafața orizontală pe care este amplasată suprafața înclinată, reflectă radiația solară.

Albedoul depinde de natura materialului de pe suprafața orizontală. Valoarea albedoului poate să vazeze între 0 și 1. Pentru material necunoscut se poate considera $A=0.2$ (Quaschnig, 2007). Influența radiației solare reflectate de sol este redusă. Astfel, de exemplu pentru cazul $A=0.2$ și pentru o suprafață înclinată la 45° orientată spre Sud, se obține $I_{grt}=0.06 \cdot I_{gh}$ (radiația solară reflectată de sol reprezintă 6% din radiația solară globală pe suprafața orizontală).

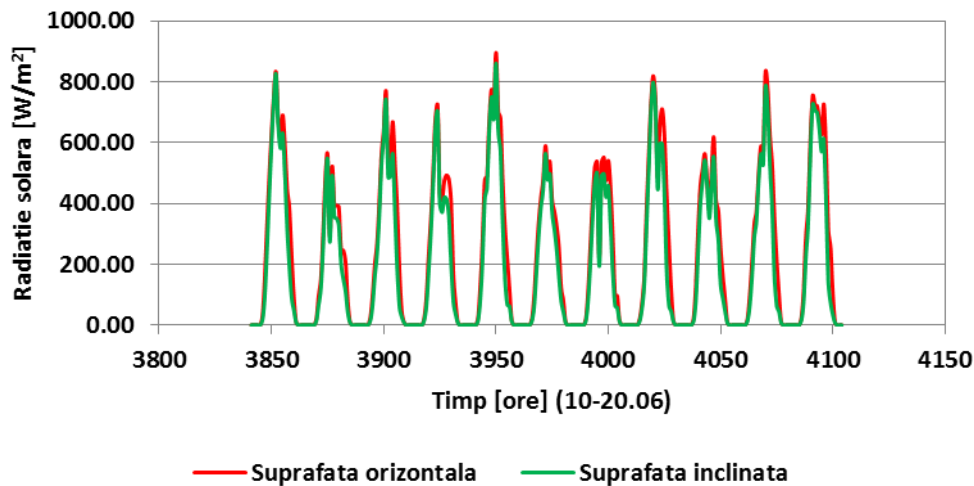
Observație!

Algoritmul de calcul prezentat, produce rezultate nerealistice pentru valorile calculate ale radiației solare directe și difuze, normale la planul suprafeței înclinate, pentru valori foarte mici ale unghiului altitudinii solare (γ_s). Această limită a modelului matematic este cunoscută și menționată în literatură: (Duffie & Beckman, 1980), (Quaschnig, 2007). Pentru a elimina valorile indesezirabile din aceste situații, algoritmul de calcul a fost implementat numai pentru unghiuri ale altitudinii solare care respectă condiția ($\gamma_s > 10^\circ$).

În figurile alăturate sunt prezentate curbe de variație ale intensității radiației solare în plan orizontal și în planul unei suprafețe înclinate la 45° , pentru localitatea Cluj-Napoca și pentru două perioade din an (10-20.03, respectiv 10-20.06), considerând suprafața înclinată la 45° față de orizontală ($\gamma_t=45^\circ$) și pentru câteva valori ale unghiului de orientare față de direcția Sud ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest); ($\alpha_t=0^\circ$ / Est).

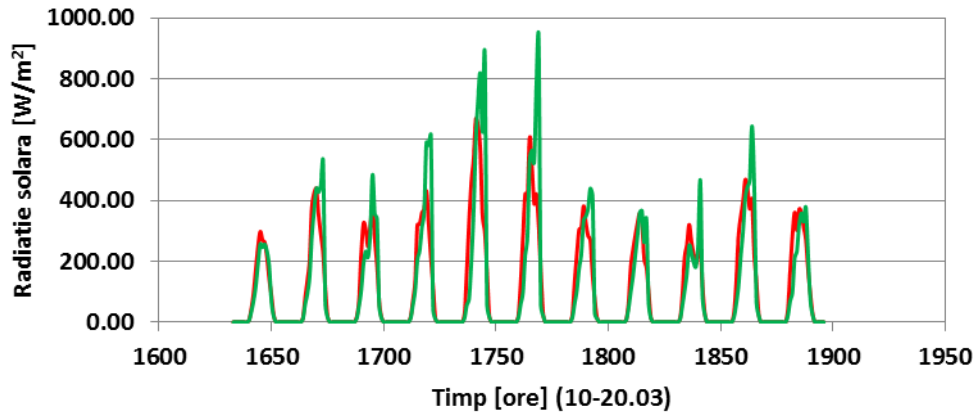


Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.03 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)



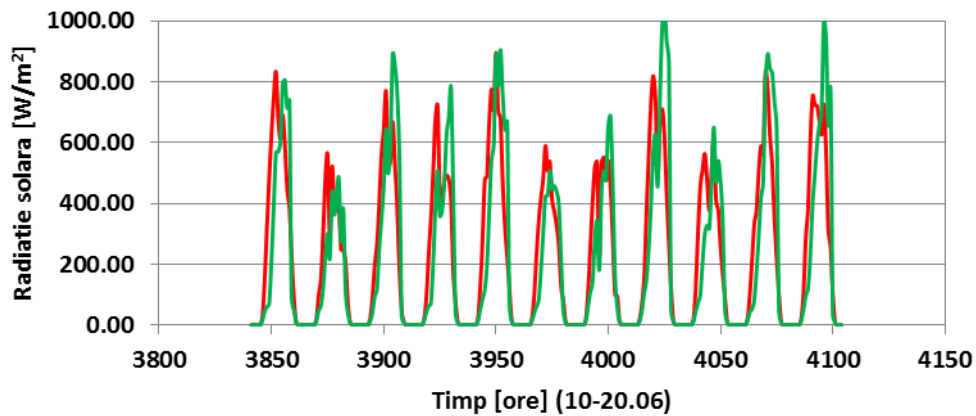
Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.06 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)

Se observă că în cazul suprafeței înclinate orientate spre Sud, există perioade din an (de exemplu luna martie), în care efectul pozitiv al înclinării suprafeței este mai accentuat decât în alte perioade (de exemplu luna iunie). În unele perioade, efectul înclinării suprafeței este chiar negativ.



— Suprafata orizontala — Suprafata inclinata

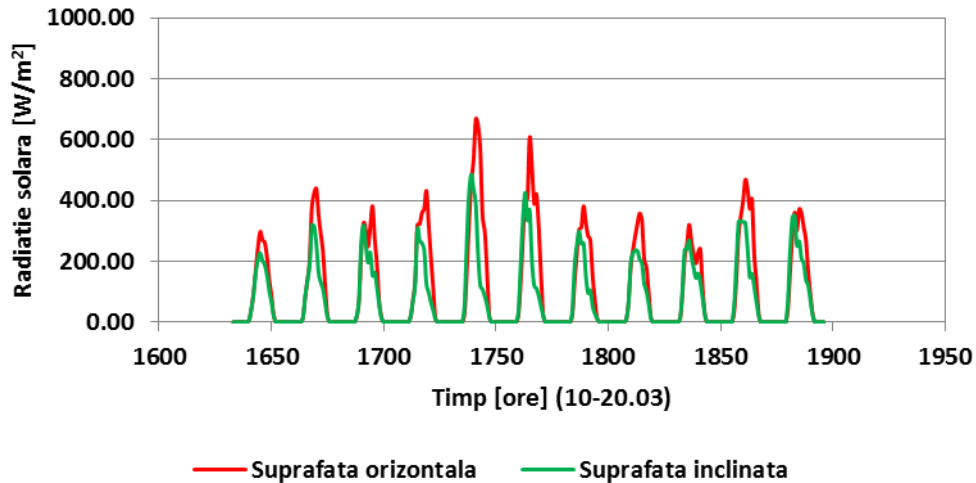
Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.03
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)



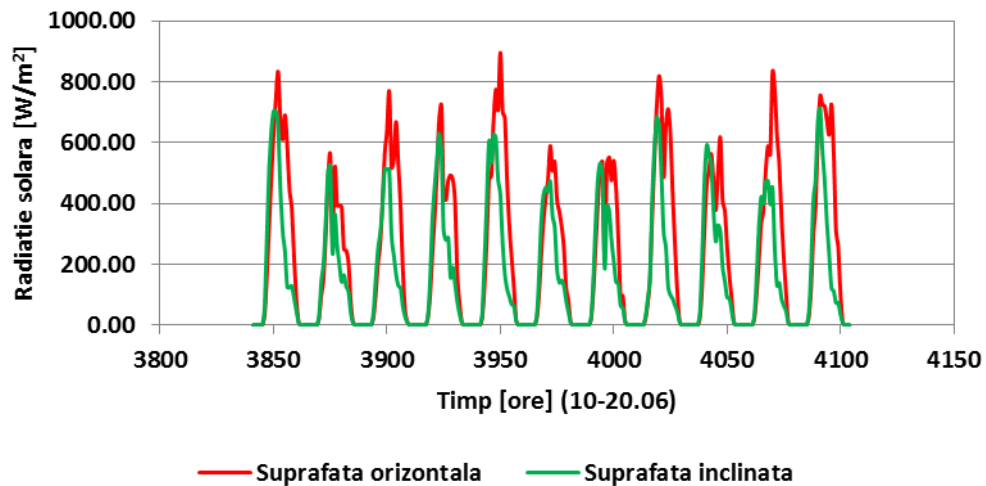
— Suprafata orizontala — Suprafata inclinata

Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.06
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)

Se observă că în cazul suprafeței înclinate orientate spre Vest, efectul înclinării suprafeței este pozitiv în ambele perioade studiate. Se observă și că momentele atingerii maximelor intensității radiației solare în planul suprafeței înclinate sunt decalate spre seriile zilelor din cele două intervale și nu mai coincid cu momentele atingerii maximelor intensității radiației solare în planul orizontal.



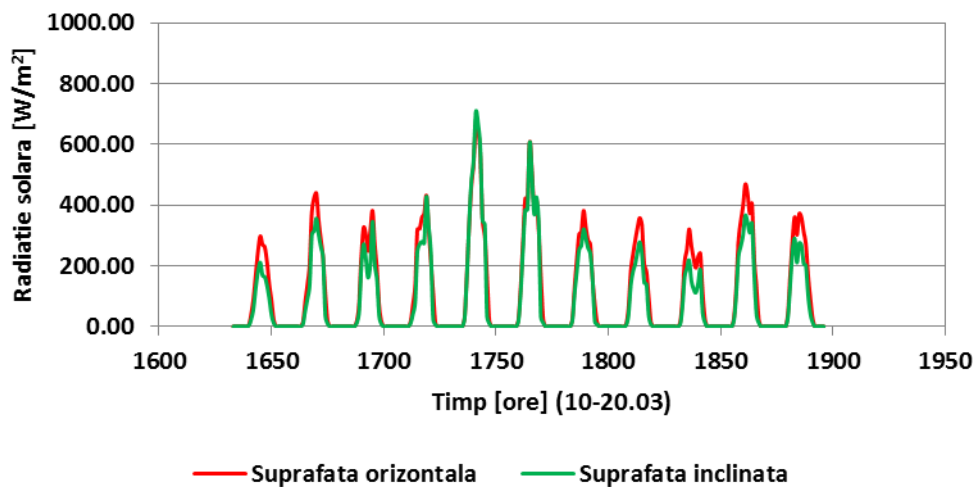
Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.03
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Est)



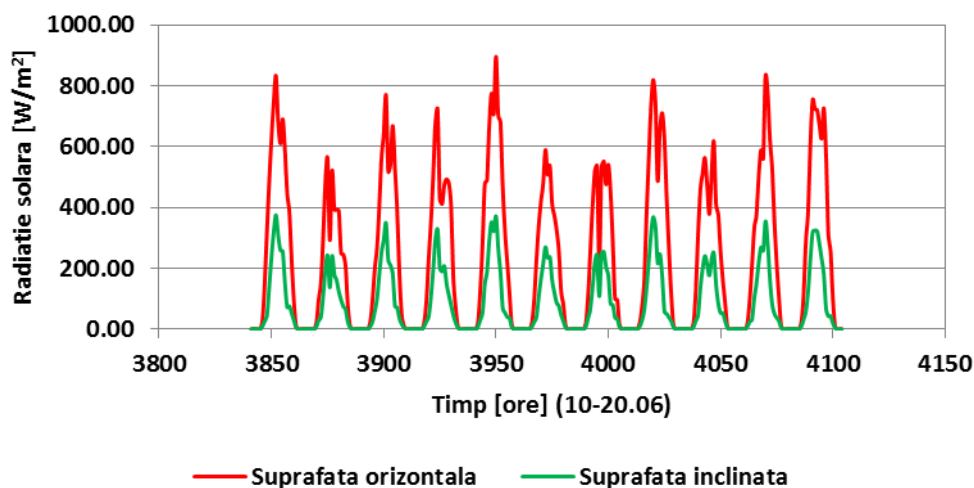
Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și înclinată în perioada 10-20.06
Cluj-Napoca; ($\gamma_t=45^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Est)

Se observă că în cazul suprafeței înclinate orientate spre Est, efectul înclinării suprafeței este negativ în ambele perioade studiate. Se observă și că momentele atingerii maximelor intensității radiației solare în planul suprafeței înclinate sunt decalate spre dimineața zilelor din cele două intervale și nu mai coincid cu momentele atingerii maximelor intensității radiației solare în planul orizontal.

În figurile alăturate sunt prezentate curbe de variație ale intensității radiației solare în plan orizontal și în planul unei suprafețe verticale (înclinate la 90°) ($\gamma_t=45^\circ$), pentru localitatea Cluj-Napoca și pentru două perioade din an (10-20.03, respectiv 10-20.06), și pentru câteva valori ale unghiului de orientare față de direcția Sud ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest); ($\alpha_t=0^\circ$ / Est).

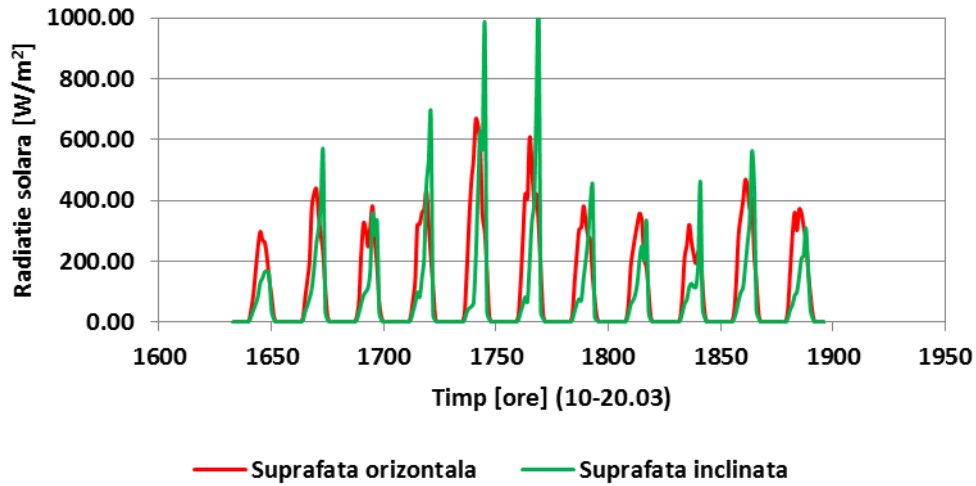


Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală în perioada 10-20.03 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)

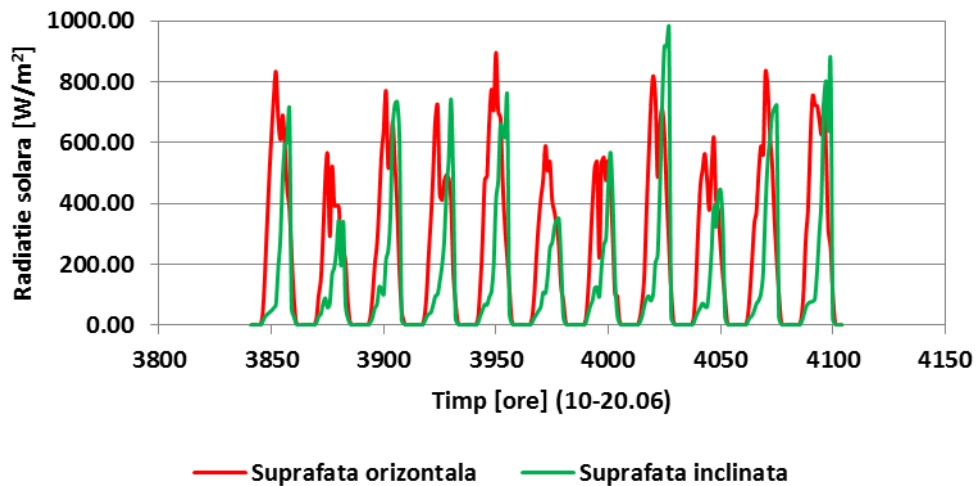


Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală în perioada 10-20.06 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=0^\circ$ / Sud)

Se observă că în cazul suprafeței verticale orientate spre Sud, în aproape toate situațiile studiate, energia solară disponibilă în planul vertical, este mai mică decât în plan orizontal. Excepție fac numai situațiile în care în luna martie, intensitatea radiației solare este totuși ridicată, iar în acest caz, există și în plan vertical disponibil de radiație solară apropiat, sau chiar puțin mai ridicat decât în plan orizontal. În luna iunie, disponibil de radiație solară în plan vertical este considerabil mai scăzut decât în plan orizontal.

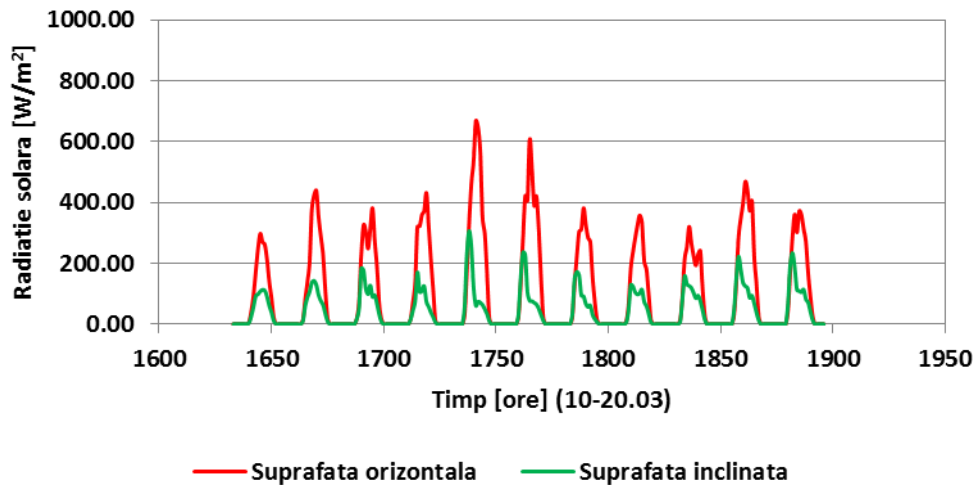


Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală
 în perioada 10-20.03
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)

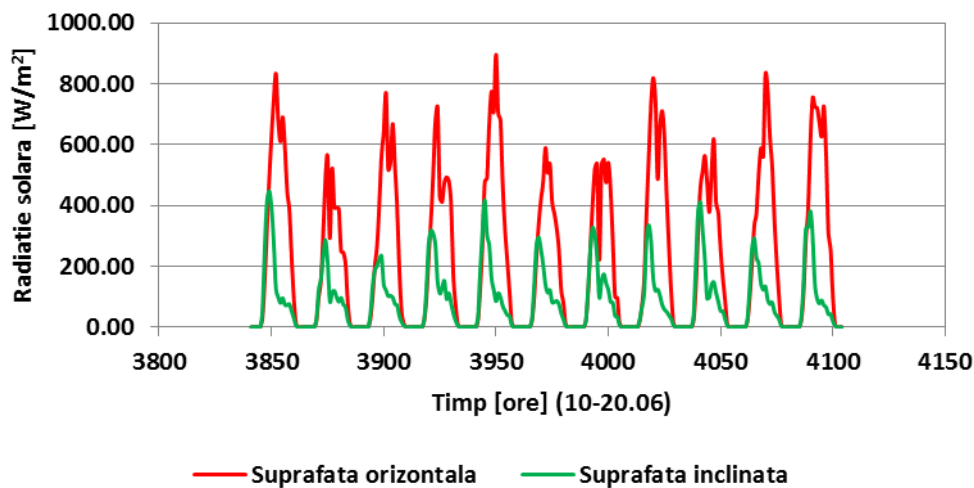


Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală
 în perioada 10-20.06
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=90^\circ$ / Vest)

Se observă că în cazul suprafeței verticale orientate spre Vest, în numeroase momente, radiația solară disponibilă în planul vertical, este apropiată sau mai mare decât în plan orizontal, atât în luna martie cât și în luna iunie. Se remarcă și deplasarea momentelor de maxim pentru radiația solară în planul vertical, spre seară.



Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală
 în perioada 10-20.03
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Est)



Curba de variație a intensității radiației solare pe suprafața orizontală și verticală
 în perioada 10-20.06
 Cluj-Napoca; ($\gamma_t=90^\circ$); ($\alpha_t=270^\circ$ / Est)

Se observă că în cazul suprafeței verticale orientate spre Est, radiația solară disponibilă în planul vertical, este considerabil mai mică decât cea disponibilă în plan orizontal, atât în luna martie cât și în luna iunie. Se remarcă și deplasarea momentelor de maxim pentru radiația solară în planul vertical, spre dimineață.

În urma analizei referitoare la influența geometriei suprafețelor înclinate asupra disponibilului de radiație solară în planul suprafețelor verticale, se evidențiază importanța acestui tip de studii și relevanța pe care o prezintă rezultatele care se pot obține, asupra unor importante aspecte practice referitoare la eficiența utilizării radiației solare.

Referințe bibliografice

- Bălan M.C., Jäntschi L., Bolboacă S.D., Damian M. - Thermal Solar Collectors Behaviour in Romania, Polish Journal of Environmental Studies, ISSN 1230-1485, 2010, 19(1):231-241
- Duffie J.A., Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, Second ed., Wiley & Sons, Singapore, 1980.
- Quaschnig V., Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan, London, 2007