

Suora insolaatio

Matti A Ranta ja Laila Hosia

Tiivistelmä. Aurinkoenergian hyödyntämisessä tulee tietää auringosta maan ilmakehään saapuvan säteilyn teho eli ns. aurinkovakio. Paikan, jossa aurinkoenergiaa aiotaan hyödyntää, leveysaste tulee tietää samoin kuin vuodenaika, vuorokaudenaika sekä paikalliset sääolo-suhteet.

Avainsanat: aurinkovakio, auringon deklinaatio, paikan leveysaste, auringon korkeuskulma, ilman vaimennusvakio eli opasiteetti.

Auringon säteilyteho

Auringon säteilyteho koostuu suoraan maanpinnalle saapuvasta säteilystä ja hajasäteilystä. Suoraa auringon säteilyä kutsutaan *suoraksi insolaatioksi*. Ilmakehän, pilvien, maan jne. kautta siroavaa ja heijastuvaa hajasäteilyä kutsutaan *diffuusiksi säteilyksi*. Auringosta saapuu maan ilmakehän ulkorajoille säteilyteho, jota kutsutaan aurinkovakioksi. Se vaihtelee hieman auringon aktiivisuuden mukaan sekä riippuu maan ja auringon välisestä etäisyydestä. Aurinkovakion keskimääräinen arvo vaihteluväliseen on $S = 1368(1 \pm 0,014) \text{ W/m}^2$ [1-3]. Tämä artikkeli käsittelee suoraa säteilyä lähinnä yllä olevan keskimääräisen aurinkovakion pohjalta.

Säteilytasapaino ja maan keskimääräinen lämpötila

Pallo vastaanottaa säteilyä poikkileikkauksensa suuruisen ympyrän pinta-alalla A ja säteilee neljä kertaa suuremmalla pallon pinta-alalla $4A$ [3]. Maapallolle saapuu säteily määrä SA , josta heijastuu pois määrä aSA . Erotus eli nettomäärä $A(1-a)S$ jää lämmittämään maata lämpötilaan T . Stefan-Boltzmannin lain $W = \sigma T^4$ [2] mukaan lämmennyt maa alkaa koko pinnallaan säteillä ulos teholla $4A\varepsilon\sigma T^4$, missä ε on efektiivinen emissiokyky. Tasapaino [3] johtaa yhtälöön $A(1-a)S = 4A\varepsilon\sigma T^4$, josta maan keskimääräinen lämpötila periaatteessa voidaan ratkaista:

$$T = [S(1-a)/4\varepsilon\sigma]^{1/4}. \quad (1)$$

Merkinnät ja vaihteluvälit suureilla tässä yhtälössä ovat:

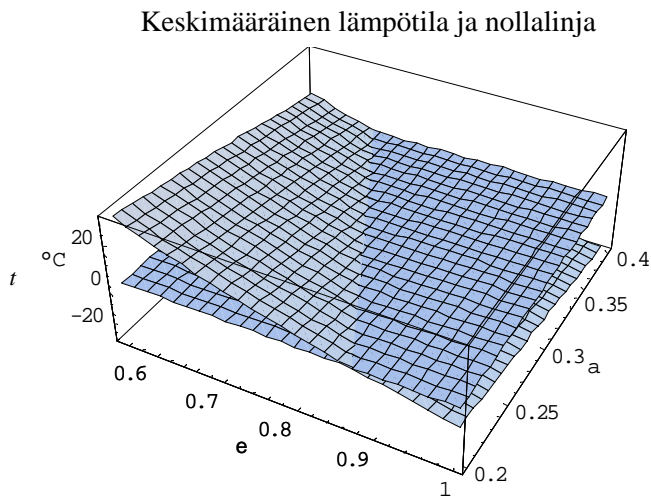
- T on absoluuttinen lämpötila ($0,0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$).

- $S = 1368(1 \pm 0,014) \text{ W/m}^2$ on aurinkovakio
- $\sigma = 5,670400(1 \pm 7,05418 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ on Stefan-Boltzmannin säteilyvakio
- $a = 0,3(1 \pm 0,033)$ on albedo eli takaisinheijastuskyky
- ε on efektiivinen emissiokyky eli säteily mustaan kappaleeseen verrattuna

Voidaan todeta seuraavaa:

- Jos maan oletetaan olevan musta kappale, on $\varepsilon = 1$, jolloin lämpötilaksi saadaan $253\text{K} \leq T \leq 257\text{K}$ eli $-20^\circ\text{C} \leq t \leq -17^\circ\text{C}$.
- Termisessä tasapainotilassa $\varepsilon = 1 - a = 0,7$ ja se antaisi maan lämpötilaksi $278\text{K} \leq T \leq 280\text{K}$ eli $4,5^\circ\text{C} \leq t \leq 6,5^\circ\text{C}$.
- Koska mittaukset maan pinnalla osoittavat, että todellinen keskilämpötila on selvästi edellisiä arvoja korkeampi, täytyy emission olla pienemmän kuin $\varepsilon = 0,7$. Lämpöä siis varastoituu maan ilmakehään eli esiintyy kasvihuoneilmiö. Luonnollinen kasvihuoneilmiö johtaa emissiokyvyn arvoon $\varepsilon = 0,612(1 \pm 0,014)$, mikä vastaa lämpötilaa $286\text{K} \leq T \leq 290\text{K}$ eli $13^\circ\text{C} \leq t \leq 17^\circ\text{C}$. Kasvihuone-kaasujen jatkuva lisääntyminen ilmakehässä pienentää edelleen ε -arvoa ja nostaa vastaavasti lämpötilaa.

Seuraavassa kuvassa näemme maan keskimääräisen pintalämpötilan albedon a ja emissiokyvyn ε funktiona.



Kuva 1. Maan keskimääräisen pintalämpötilan riippuvuus albedosta a ja emissiokyvystä ε .

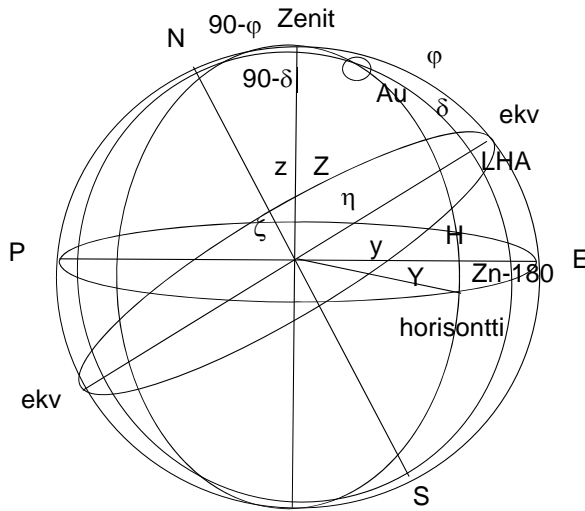
$$\text{Nollalinja } (1 - a) / \varepsilon \approx 0,923.$$

Tasapaino on siis herkkä vakioiden a ja erityisesti ε muuttumiselle [10]. Jotta saisimme käsityksen, miten auringosta tuleva suora säteily jakautuu maapallolla, ryhdymme tarkastelemaan maan pallonmuodon ja vuodenaikojen vaihtelun vaikutusta.

Horisontti- ja ekvaattorikoordinaatistojen välinen yhteys

Kuten tiedämme, maan akselin kallistuskulma on n. $23,5^\circ$. Tästä kallistuskulmasta johtuen auringon projektiopiste liikkuu vuodenaikojen mukaan kääntöpiirien eli leveyspiirien $\pm 23,5^\circ$ välillä. Ekvaattorikoordinaatistossa auringon pallokoordinaatit ovat deklinaatio δ eli projektiopisteen leveysaste ja Greenwichin tuntikulma GHA eli tuntikulma myötöpäivään nollameridiaanin suhteen. Näiden arvot saadaan tähtitieteellisistä vuosikirjoista. Auringon paikallinen tuntikulma pituuspiirin λ suhteen on $LHA = GHA + \lambda$. Tietyllä paikalla, jonka pallokoordinaatit ovat leveys φ ja pituus λ , aurinko näkyy horisonttiin nähden korkeudella H ja pohjoisesta myötöpäivään laskettuna suunnassa Z_n , jota suuntakulmaa kutsutaan atsimuutiksi. Näitä pallokoordinaatteja H ja Z_n kutsutaan horisonttikoordinaateiksi. Horisontti- ja ekvaattorikoordinaattien välille voidaan koordinaatiston kierrolla johtaa yhteys [5-7].

Seuraavassa kuvassa näemme nämä kaksi koordinaatistoa yksikköpallolla:



Kuva 2. Koordinaatistojen yhdistäminen niitä kiertämällä.

Asetetaan karteesilainen ξ, η, ζ -koordinaatisto ekvaattoritasolle origoon niin, että η -akseli kulkee tarkasteltavan paikan meridiaalin kautta ja ζ -akseli osoittaa pohjoisnavalle N. ξ -akseli on näitä vastaan kohtisuorassa. Auringon projektiopisteen suorakulmaiset ekvaattorikoordinaatit yksikköpallolla ovat

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \sin LHA \\ \cos \delta \cos LHA \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Karteesilainen X, Y, Z -horisontaalikoordinaatisto asetetaan niin, että aurinko on Y, Z -tasossa ja Z -akseli osoittaa zeniittiin. Tässä koordinaatistossa auringon koordinaatit ovat

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos H \\ \sin H \end{pmatrix} \quad (3)$$

Koordinaatistojen kierrot: Kierretään ensin ξ, η, ζ -koordinaatisto ξ -akselin ympäri kulman $\psi = 90^\circ - \varphi$ verran, jolloin ζ -akseli kääntyy z -akseliksi, joka osoittaa zeniittiin. Kierto johtaa x, y, z -koordinaatistoon

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi & -\cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (4)$$

Kierretään vielä z -akselin ympäri kulman $\vartheta = Zn - 180^\circ$ verran, jolloin tullaan X, Y, Z -koordinaatistoon

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos Zn & \sin Zn & 0 \\ -\sin Zn & -\cos Zn & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Ketjuttamalla kierrot saadaan

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \cos H \\ \sin H \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos Zn & \sin Zn & 0 \\ -\sin Zn & -\cos Zn & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi & -\cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \sin LHA \\ \cos \delta \cos LHA \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (6)$$

Muodostetaan kiertomatriisien tulo

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \cos H \\ \sin H \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos Zn & \sin Zn \sin \varphi & -\sin Zn \cos \varphi \\ -\sin Zn & -\cos Zn \sin \varphi & \cos Zn \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \sin LHA \\ \cos \delta \cos LHA \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (7)$$

Lopulta saadaan tulos (8)

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \cos H \\ \sin H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \delta \sin LHA \cos Zn + \cos \delta \cos LHA \sin \varphi \sin Zn - \sin \delta \cos \varphi \sin Zn \\ -\cos \delta \sin LHA \sin Zn - \cos \delta \cos LHA \sin \varphi \cos Zn + \sin \delta \cos \varphi \cos Zn \\ \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos LHA \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Auringon korkeuskulma ja atsimuutti

Yhtälön (8) *Z*-komponentista saadaan suoraan korkeuskaava [1,7]

$$\sin H = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos LHA . \quad (9)$$

Siitä voidaan ratkaista itse korkeus

$$H = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos LHA) , \quad (10)$$

josta derivoimalla ja olettaen $\delta \approx \text{vakio}$ sekä muokkaamalla saadaan korkeuden muutosnopeus

$$\frac{dH}{dt} = \Omega \cos \varphi \sin Zn \quad (11)$$

Tuntikulman muutoksen ja ajan välinen riippuvuus, kun $\lambda = \text{vakio}$, on likipitään

$$dLHA/dt = dGHA/dt = \Omega \cong 15^\circ h^{-1} \cong 72,7221 \cdot 10^{-6} s^{-1} . \quad (12)$$

Auringon nousussa ja laskussa, kun $H = 0$ kaavassa (9), toteuttaa tuntikulma ehdot $-1 \leq \cos LHA_{H=0} = -\tan \varphi \tan \delta \leq +1$ eli tuntikulma on

$$LHA_{H=0} = \pm \Delta LHA = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) . \quad (13)$$

Jos $-\tan \varphi \tan \delta \leq -1$, aurinko ei laske ja $\Delta LHA = 180^\circ$ eli π .

Auringon korkeus Suomessa: keskipäivällä $H = \delta - \varphi + 90^\circ$,
keskiyöllä $H = \delta + \varphi - 90^\circ$.

Yhtälön (8) *X*-komponentista saadaan

$$0 = -\cos \delta \sin LHA \cos Zn + (\cos \delta \cos LHA \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi) \sin Zn .$$

Jaetaan tämä tulolla $-\sin Zn \cos \delta$, järjestellään termejä ja ratkaistaan ns. atsimuuttikaava ([7])

$$\tan Zn = \frac{-\sin LHA}{\cos LHA \sin \varphi - \cos \varphi \tan \delta} . \quad (14)$$

Siitä voidaan ratkaista auringon suuntakulma

$$Z_n = \arctan \left(\frac{-\sin LHA}{\cos LHA \sin \varphi - \cos \varphi \tan \delta} \right). \quad (15)$$

Kun integroidaan kaavasta (12) $LHA = \Omega(TA - 12)$ ja käytetään kaavoja (10), (13) ja (15), voitaisiin auringon liikettä seurata taivaalla ja suunnata aurinkopaneelit optimaaliseksi. Vertaa [11], jossa asiaa on käsitelty.

Yhtälön (8) Y -komponentista tulee ensin

$$\cos H = -\cos \delta \sin LHA \sin Z_n - (\cos \delta \cos LHA \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi) \cos Z_n.$$

Kun järjestellään termejä ja käytetään äsken saatuja tuloksia hyväksi, saadaan yksinkertainen kaava

$$\sin Z_n / \cos \delta = -\sin LHA / \cos H. \quad (16)$$

Tämä vastaa tasokolmion sini-väittämää.

Auringon vaimentumattoman säteilyn vuorokausiannos

Auringon suoran vaimentumattoman päiväsäteilyn määrä ΔI (J/m^2) saadaan integraalista

$$\Delta I = S \int_{t_{\text{nousu}}}^{t_{\text{tastu}}} \sin H(t) dt \equiv S \int_{t_{\text{nousu}}}^{t_{\text{tastu}}} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos LHA) dt \quad (17)$$

Integraali (17) kuuluu tuntikulman (12) avulla kirjoitettuna

$$\Delta I = \frac{S}{\Omega} \int_{-\Delta LHA}^{+\Delta LHA} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos LHA) dLHA. \quad (18)$$

Ottamalla deklinaatio δ keskipäivän arvoa vastaavasti voidaan integraali (18) laskea likimäärin seuraavasti

$$\Delta I = \frac{2S}{\Omega} [\sin \varphi \sin \delta \cdot \Delta LHA + \cos \varphi \cos \delta \cdot \sin \Delta LHA]. \quad (19)$$

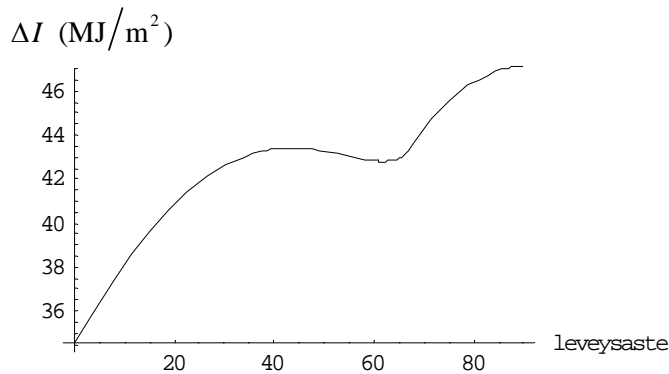
Lähteen [1] mukaan auringon deklinaatio voidaan laskea likikaavasta

$$\delta \cong -23,5^\circ \cos [360^\circ (n+10)/365]. \quad (20)$$

Tässä n on tarkasteltavan päivän vuodenpäivän numero vuoden alusta.

Jotta näkisimme, miten paikan leveysaste eli latitudi vaikuttaa vuorokautisen säteilyn määrään, unohtamme aluksi ilmakehän vaimennuksen, joka otetaan huomioon myöhemmin. Keskikesällä, kun deklinaatio on $\delta = 23,5^\circ$, olisi pohjoisella pallon-puoliskolla vuorokautisen vaimentumattoman säteilyn määrällä ΔI kaksi paikallista ääriarvoa, maksimi leveysasteella $\varphi = 43,71^\circ$ ja minimi leveysasteella $\varphi = 61,76^\circ$:

$\Delta I = 34,50 \text{ MJ/m}^2$	leveysasteella	$\varphi = 0^\circ$
$\Delta I_{\max} = 43,41 \text{ MJ/m}^2$	leveysasteella	$\varphi = 43,71^\circ$
$\Delta I_{\min} = 42,81 \text{ MJ/m}^2$	leveysasteella	$\varphi = 61,76^\circ$
$\Delta I = 47,13 \text{ MJ/m}^2$	leveysasteella	$\varphi = 90^\circ$



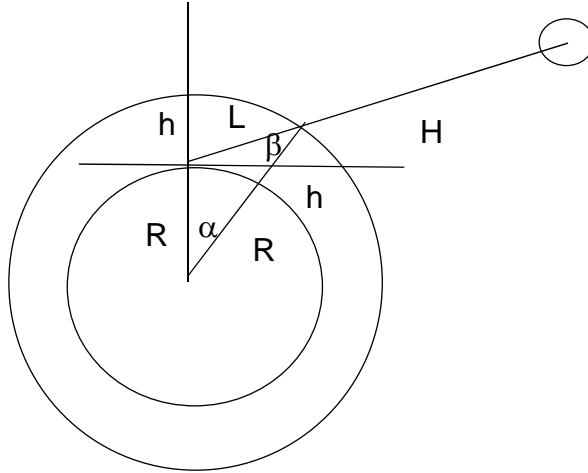
Kuva 3. Vuorokautinen säteily määrä juhannuksena, kun auringon $\delta = 23,5^\circ$, eikä ilmakehän vaimennusta ole otettu huomioon.

Kaavasta (13) näemme, että päiväntasaajalla suoran säteilyn kesto on aina 12 tuntia ja kesällä napapiirin sisällä 24 tuntia, jos $\varphi \geq 90^\circ - \delta$. Kesäpäivänseisauksena aurinko on Kravun kääntöpiirillä eli latitudilla $\varphi = +23,5^\circ$ keskipäivällä suoraan zeniitissä eli säteet tulevat maahan kohtisuorasti. Kravun kääntöpiiriltä pohjoiseen mentäessä suoran säteilyn kesto alkaa kasvaa nopeasti kaavassa (13) olevan tekijän $\tan \varphi$ vaikutuksesta, kun taas auringon säteilytehoon vaikuttava tekijä $\sin H$ alkaa vähentyä kulman H pienentyessä. Näistä syistä pohjoiseen mentäessä tulee ensin maksimi ja sitten minimi. Napapiiriä lähestyttäessä suoran säteilyn keston voimakas kasvu lisää säteilyn määrää. Ilmakehän vaimennuksen tarkastelun yhteydessä tulemme näkemään, että tässä esitetyt ilmiöt häviävät vaimennuksen alle (ks. kuva 6).

Säteilyn kulkema matka ilmakehässä

Säteilyn kulkema matka maan ilmakehässä on tärkeä säteilyn vaimennukseen vaikuttava tekijä. Seuraavassa kuvassa näemme, miten korkeuskulmassa H paistavan auringon säde joutuu kulkemaan h -paksuisen ilmakehän läpi matkan L . Ilmakehän tehollisen

osan troposfäärin [8] paksuus on liki $h = 20\text{km}$ ja maan ekvaattorisäde on $R = 6378\text{km}$.



Kuva 4. Auringon säteen kulku maan ilmakehässä.

Kuvan 4 ja tasokolmion siniväittämän perusteella saadaan verrannot

$$\frac{L}{\sin \alpha} = \frac{R}{\sin \beta} = \frac{R+h}{\sin(90^\circ + H)}. \quad (21)$$

Kahdesta jälkimmäisestä verrannosta seuraa

$$\sin \beta = R \cos H / (R+h). \quad (22)$$

Kuvan perusteella nähdään myös, että $\alpha = 90^\circ - H - \beta$. Tällöin saadaan $\sin \alpha = \cos H \cos \beta - \sin H \sin \beta \equiv \cos(H + \beta)$. Kahdesta ensimmäisestä verrannosta seuraa $L = (R+h) \cos(H + \beta) / \cos H$. Se voidaan kirjoittaa vielä muotoon

$$L = (R+h) \cos \beta - R \sin H. \quad (23)$$

Koska $\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h}\right)^2 \cos^2 H}$, saadaan yksinkertainen kaava

$$L = (R+h) \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h}\right)^2 \cos^2 H} - R \sin H \quad (24)$$

säteen kulkemalle matkalle maan ilmakehässä. Lähteessä [1] esitetään säteilyn kulke-
malle matkalle likilauseketta

$$L \approx h/\sin H, \quad (25)$$

joka säteen matkaa laskettaessa pätee suurin piirtein välillä $10^\circ < H \leq 90^\circ$, mutta vaimennusta laskettaessa se on täysin käyttökelpoinen.

Ilmakehän säteilytehoa vaimentava vaikutus

Säteilyn intensiteetti I vaimenee määrällä dI kulkiessaan ilmakehässä matkan ds . Jos väliaineen vaimennusvakio eli opasiteetti on α , saadaan tunnettu yhtälö $dI/I = -\alpha ds$. Tämän integrointi antaa

$$I/I_0 = e^{-\alpha L} \equiv e^{-\tau L/h}, \quad (26)$$

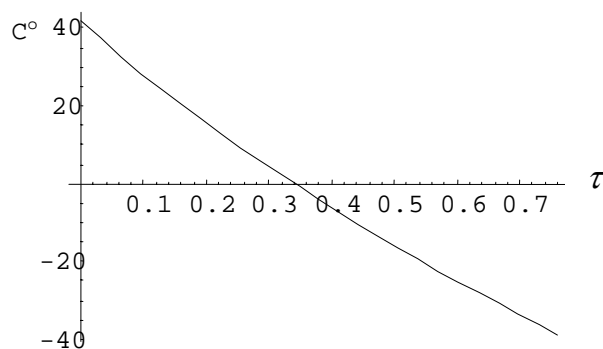
missä $I_0 = S$ on säteilyteho avaruudessa ja I maan pinnalla. Vaimenemisvakio eli opasiteetti α annetaan yleensä ns. *optisen paksuuden* $\tau = \alpha h$ avulla, joka ilmakehälle on pilvisyydestä riippuen $0,52 \leq \tau \leq 0,76$, katso [1] ja [4]. Lähteessä [1] annetaan optiselle paksuudelle τ pohjoisella pallonpuoliskolla vuodenaajasta riippuva kokemus-peräinen kaava

$$\tau \approx 0,64 + 0,12 \cos \left[360^\circ (n - 174) / 365 \right]. \quad (27)$$

Tässä n on tarkasteltavan päivän vuodenaikojen numero vuoden alusta. Lopulliseksi suoran vaimennettun säteilytehon kaavaksi saadaan

$$I = I_0 e^{-\tau L/h} \sin H \quad (28)$$

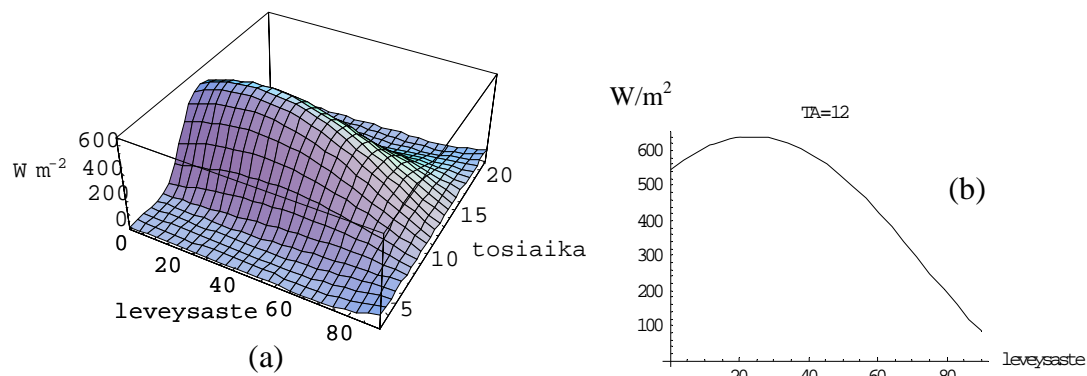
Jotta saataisiin tietynä aikavälinä, esimerkiksi vuorokautena, maahan tulleen suoran säteilyn määrä, pitäisi kaava (28) integroida tämän aikavälin yli. Se on vain numeerisesti mahdollista. Jos kaava (28) integroidaan päiväntasauksena maan otsapinnan yli ottaen huomioon kaavat (24) ja (9) sekä vaaditaan, että tulos vastaa albedon $a = 0,3$ avulla laskettua, saadaan optisen paksuuden arvoksi $\tau = 0,205226 \approx 0,205$. Tämä arvo on huomattavasti pienempi kuin kaavan (27) antama.



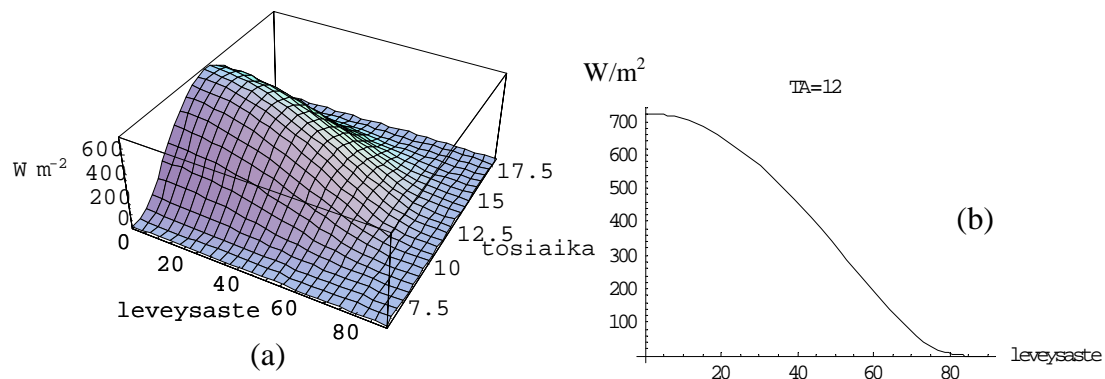
Kuva 5. Maan keskilämpötila optisen paksuuden τ funktiona.

Numeerisia laskelmia säteilytehon vaimentumisesta ilmakehässä

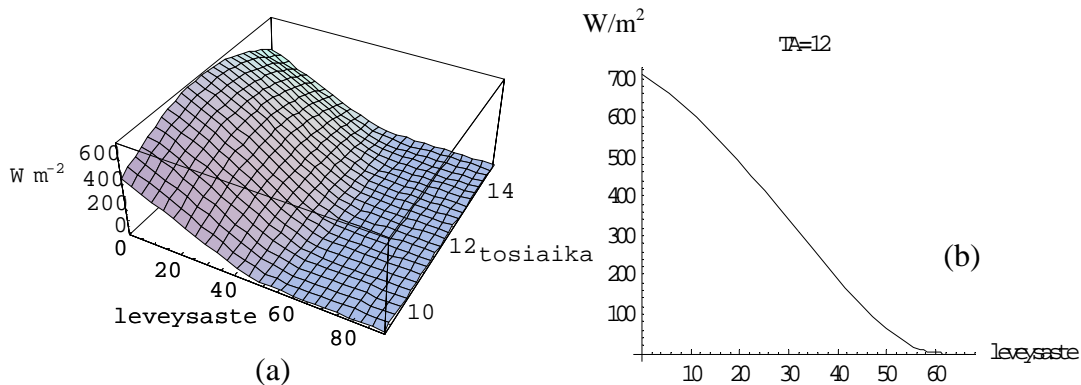
Laskelmissa käytetään tosiaikaa TA eli sitä aikaa, mitä aurinkokello näyttää. Tällöin ei tarvitse ottaa huomioon paikan pituusastetta, ei vyöhykeaikaa eikä mahdollista kesäaikaa. Myöskään auringon muuttuvaa kiertonopeutta radallaan eli ajantasausta ei tarvitse ottaa huomioon. Kaavasta (28) seuraa laskemalla seuraavien kuvien mukaiset tulokset:



Kuva 6. Säteilteho (W/m^2) juhannuksena ($\tau = 0,76$) (a) tosiajan ja leveysasteen funktiona sekä (b) keskipäivällä leveysasteen funktiona.

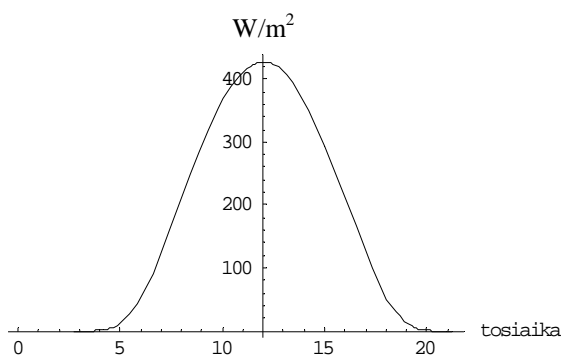


Kuva 7. Sama kuin kuva 6 kevätpäiväntasauksena ($\tau = 0,64$).

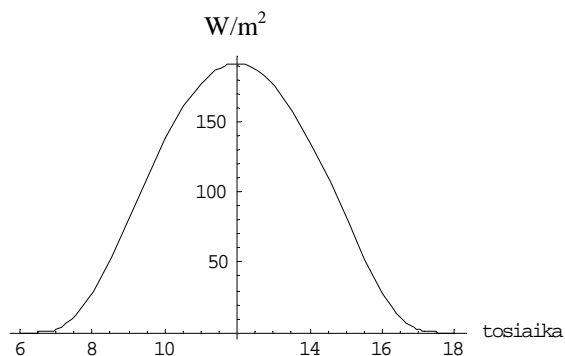


Kuva 8. Sama kuin kuva 6 jouluna ($\tau = 0,52$).

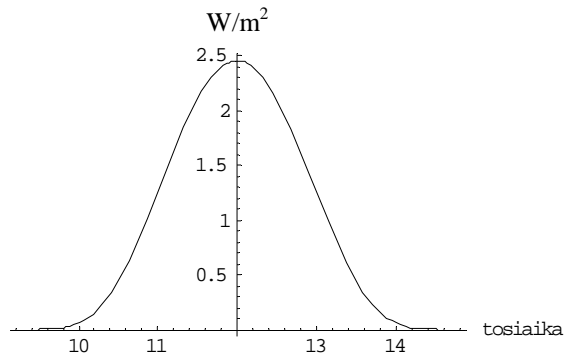
Seuraavassa nähdään, miten kaavasta (28) laskettu säteilyteho ja auringon noususta las-
kuun integroitu vuorokautinen suora säteily määrä vaihtelee eri vuoden- ja vuorokau-
denaikoina Helsingissä.



Kuva 9. Säteilyteho $I < 427,6 \text{ W/m}^2$ Helsingissä juhannuksena ($\tau = 0,76$).
Vuorokautinen suora säteily määrä $\Delta I = 12143,3 \text{ kJ/m}^2$.

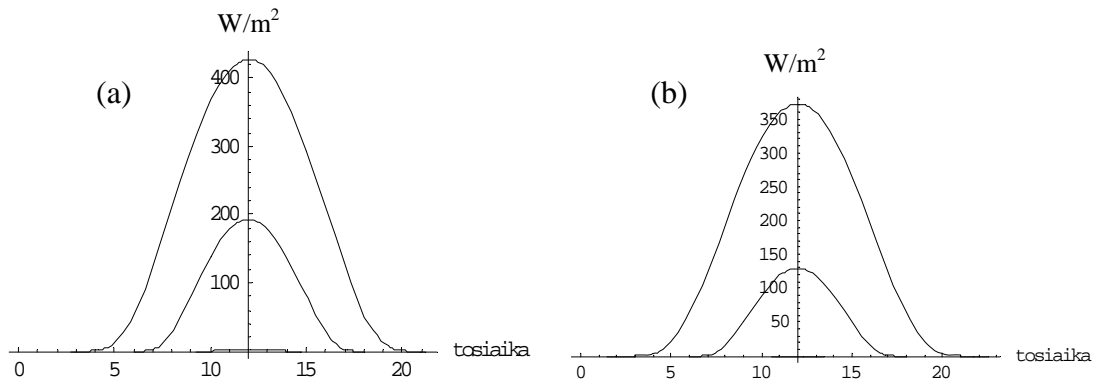


Kuva 10. Säteilyteho $I < 192,5 \text{ W/m}^2$ Helsingissä kevätpäiväntasauksena ($\tau = 0,64$)
Vuorokautinen suora säteily määrä $\Delta I = 3767,49 \text{ kJ/m}^2$.



Kuva 11. Säteilysteho $I < 2,46 \text{ W/m}^2$ Helsingissä jouluna ($\tau = 0,52$).
Vuorokautinen suora säteily määrä $\Delta I = 18,31 \text{ kJ/m}^2$

Esittämällä kuvien (9) - (11) kuvaajat samassa kuvassa (kuva 12a) ja vastaavat kuvaajat Oulussa (kuva 12b) nähdään kesän ja talven jyrkkä ero sekä maantieteellinen ero säteilytehoissa.



Kuva 12. Säteilystehon ja -ajan vaihtelu (a) Helsingissä ja (b) Oulussa jouluna, päivän-tasauksena ja juhannuksena (alhaalta ylös).

Yhteenveto

Elämän ja hyvinvoinnin menestyminen maapallolla riippuu viimekädessä auringosta säteilevästä energiasta. Pienetkin muutokset tässä tasapainossa saattavat järkyttää olosuhteita maapallolla kuten viimeaikaisista keskusteluista olemme ymmärtäneet. Tässä artikkelissa esitetty on yksinkertainen johdatus suoran säteilyn kannalta tähän mutkikkaaseen ongelmaan. Kuten kuvista 6 ja 7 näemme, ovat olosuhteet Suomessa leveyspiirien $60^\circ < \varphi < 70^\circ$ välillä kesällä valoisat ja miellyttävät. Talvella sen sijaan on pimeää ja auringon lämmittävä vuorokausivaikutus on mitätöntä, Helsingissäkin alle 20 kJ/m^2 ja Oulussa käytännössä nolla (kuva 12). Tämä on valitettava tosiasia, että talvella, kun uusiutuvaa energiaa tarvitaan eniten, auringosta sitä ei juurikaan saa vaan katseet tulee kääntää esim. tuulienergiassa [9]. Aurinkolämmön hyödyntämistä Suomessa on tutkittu lähteessä [11].

Lähteitä

- [1] <http://fi.wikipedia.org/wiki/Insolaatio>
- [2] http://fi.wikipedia.org/wiki/Stefanin-Boltzmannin_laki
- [3] http://fi.wikipedia.org/wiki/Maan_s%C3%A4teilytalous
- [4] http://fi.wikipedia.org/wiki/Optinen_paksuus
- [5] <http://fi.wikipedia.org/wiki/Pallotrigonometria>
- [6] <http://www.astro.utu.fi/zubi/sphere/trigon.htm>
- [7] Hannu Lappalainen, *Merenkulun pallotrigonometria*, AKH, Valtion painatuskeskus, 1982, ss 161
- [8] <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ilmakeh%C3%A4>
- [9] http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulivoima_Suomessa
- [10] www.ipcc.ch
- [11] Katri Komulainen, *Aurinkolämpö-tekniologia ja mahdollisuudet*, Pro gradu-tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, 2006, ss. 123

Matti A Ranta
Teknillinen korkeakoulu
Matematiikan ja systeemianalyysin laitos
PL 1100, 02015 TKK
s-posti: matti.ranta@tkk.fi

Laila Hosia
Nallenpolku 2 C 38
02110 Espoo
s-posti: laila.hosia@gmail.com