فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۴، شماره ۱، ص‌ص ۱۵ الی ۲۲، تابستان ۱۳۹۱
تاریخ دریافت: ۹۱/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۶/۲۲

الگوی ساده برای تخمین شدت‌تابش خورشیدی در کرج برحسب شرایط اقلیمی

مریم فهار- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج
کمال عباسپورثانی – استادیار گروه تبدیل انرژی- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان
E-mail: fahar@mail.merc.ac.ir

چکیده: یکی از پارامترهای مهم در استفاده از منابع تجدیدپذیر، الگوی مناسب برای تعیین وضعیت و چگونگی تغییرات آنها می باشد. نظربااینکه انرژی‌های تجدیدپذیر وابسته به شرایط اقلیمی محل می‌باشند، بنابراین با شرایط آب و هوایی مرتبا در طی روز، فصل و سال در حال تغییر هستند. بنابرین وجود الگوی مناسبی که بتواند این پارامترها را در بازه زمانی مشخص یا در آینده پیش‌بینی کند، در استفاده از این منابع بسیار اهمیت دارد. این الگوسازی در مورد انرژی باد و انرژی خورشیدی بیشتر مورد توجه است، زیرا این دو منبع بسیار مورد استفاده هستند بخصوص انرژی خورشیدی که منشاء تمام منابع انرژی های تجدیدپذیر است. این مطالعه برآن است تا با توجه به اطلاعات آماری شدت تابش خورشیدی و سایر شرایط اقلیمی که در بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ در شهر کرج اندازه گیری شده‌است، الگوی مناسبی برای شدت تابش خورشیدی ارائه دهد. در بین شرایط اقلیمی، دما و رطوبت نسبی از جمله پارامترهایی هستند که بر روی تابش کل خورشیدی خیلی تاثیرگذار هستند و در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می-شوند. بنابراین داده‌هایی دردسترس هستند که به کمک آنها می‌توان این الگو را تدوین نمود. از جمله مزایای این الگو تخمین شدت تابش خورشیدی در مناطقی که امکان اندازه‌گیری آن وجود ندارد و در مواردی که در اندازه‌گیری‌ها گاف وجود دارد خیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا استفاده از این الگو را در سایر مناطق، آسان و امکان‌پذیر می‌نماید

واژه های کلیدی: مدل‌سازی، شدت تابش خورشیدی، شرایط محیطی و کرج.

A Simplified Model for Prediction of Solar Irradiation in term of Climate conditions

M. Fahar, MS. Student, Energy Division, Materials and Energy Research Center
K. Abbaspoursani, Ass. Prof., the Faculty of Mech. Eng., Takestan Islamic Azad University

Abstract: One of the most important parameters in utilizing renewable, is a suitable model for estimating of their situation and the trend of their changes. However, renewable sources depend on climate conditions in everywhere; therefore they vary during day, month and year. Therefore, a suitable model that predicts these parameters in a specified period or in future, in utilizing of renewable very essential. This model, particularly in wind and solar is very important, because they are the base of other form of renewable. The aim of this study is to present a simplified model for estimating of solar irradiation in Karaj with help of statistics of solar radiation and other climate conditions in the period of 2001-2005. Among the environment conditions, ambient temperature and humidity are very effective in solar irradiation, and often measured in climatologically centers. Therefore, with help of these data may formulate a model for estimating of solar irradiation. The model can be used, particularly in where there is impossible to measure these parameters,. Therefore it will be very useful.

Keywords: Modeling, Solar Irradiation, Climate condition and Karaj.

۱- مقدمه

یکی از مسائل اولیه مهم در طراحی سیستم‌های خورشیدی، یافتن مجموعه داده‌های تابش خورشیدی در درازمدت است. به عنوان مثال برای شبیه‌سازی شرایط عملیاتی هر سیستم خورشیدی دانستن این مجموعه داده‌ها ضروری است. با این وجود در بیشتر محل‌ها این داده‌ها موجود نیستند و حتی در مکان‌هایی که دردسترس هستند کیفیت آنها بسیار ضعیف است. لذا یافتن مجموعه داده‌های تابش خورشیدی ساعتی برای مدت-های طولانی نسبتا مشکل است. برای حل این مسئله پژوهشگران بسیاری نشان داده‌اند که می‌توان داده‌های خورشیدی واقعی را با نوع ساختگی جایگزین کرد. این داده‌های ساختگی با روش‌های مختلفی ایجاد می‌شوند. خواص آماری این داده‌های جدید باید با داده‌های واقعی یکی باشد[۳].

۲- طبقه بندی مدل‌های توسعه یافته

مدل‌های متعددی برای محاسبه تابش خورشیدی وجود دارد که از کدهای کامپیوتری بسیار پیچیده تا روابط تجربی ساده متغیر هستند. این مدل‌ها معمولا با در نظر گرفتن دو ویژگی، یکی در دسترس بودن اطلاعات آب‌وهوایی و انواع دیگر داده-های موردنیاز به عنوان ورودی مدل و دیگری دقت مدل انتخاب می‌شوند. برای اکثر اهداف عملی و بسیاری از کاربران اولین ویژگی برنامه‌های پیچیده‌ای را برمبنای راه حل معادله انتقال تابشی می‌دهد که غیر مفید است. متعاقب آن مدل‌های دیگر که مدل‌های ساده نیز نام دارند، به طور گسترده آزمایش شده‌اند. طبق تعریف یک مدل بسیار ساده یعنی (۱) مدل های بسیار ساده آسمان صاف که برای ورودی نیاز به هیچگونه پارامتر اقلیمی ندارند. و (۲) مدل های بسیار ساده آسمان ابری که به عنوان ورودی نیاز به یک پارامتر ساده اقلیمی مربوط به درجه ابری بودن برای مثال مقدار ابر یا آفتاب نسبی دارند. اهمیت مدل های بسیار ساده از آن جهت است که اکثر افراد شرکت کننده در کاربردهای عملی انرژی خورشیدی به دلایل مختلفی تنها به این نوع مدل‌ها دسترسی دارند.

این مقاله با مدل‌های توسعه‌یافته بر اساس اطلاعات هوا-سنجی، MRM، سروکار دارد و با استفاده از آنها می‌توان پرتوافکنی کل خورشیدی (Global solar irradiation) را محاسبه کرد. در این مدل‌ها داده‌های هواسنجی که شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، فشار بارومتری و مدت تابش آفتاب است به عنوان ورودی مدل استفاده می شود. مزیت این مدل‌ها نسبت به مدل‌هایی که از تابش و یا ضریب صافی (Clarity index) به عنوان ورودی استفاده می‌کنند، جهانی بودن و محدود نبودن کاربرد آن ها برای یک محل خاص است. در ادامه سیر تکاملی مدلهای MRM و اصلی ترین معادلات هر یک و نقاط ضعف و قوت آنها اشاره خواهد شد. باتوجه به بررسی تعداد زیادی از مقالات علمی در این زمینه مشخص شد که صحت و اعتبار این گروه مدلها با توجه به اطلاعات دقیق تابش سنجی و هواسنجی در نقاط مختلف دنیا ثابت شده است. لذا استفاده از آنها برای شرایط اقلیمی مورد نظر یعنی مشکین دشت کرج نیز معتبر خواهد بود.

۳- کاربردهای مدل‌های MRM

کاربردهای مهم استفاده از این مدل‌ها را می‌توان در گروه های ذیل برشمرد.

- تخمین انرژی خورشیدی روی صفحه افقی تا به عنوان پارامتر ورودی برای محاسبه انرژی خورشیدی روی سطوح مایل با موقعیت دلخواه استفاده شود.
- تخمین انرژی خورشیدی روی صفحه افقی با استفاده از داده‌های هواسنجی برای تعیین اقلیم‌شناسی خورشیدی در یک محل.
- پرکردن گاف‌های مربوط به مقادیر از دست‌رفته تابش

خورشیدی در مجموعه‌های بایگانی با توجه به مشاهدات پارامترهای موجود هواسنجی.

- فراهم‌کردن الگوریتم‌هایی برای اهداف مهندسی مثل کاربرد-های انرژی خورشیدی، راندمان فتوولتائیک، طراحی ساختمان‌های انرژی و تامین روشنایی روز با داده‌های شبیه سازی شده تابش خورشیدی.

۴- مراحل توسعه MRM

این مدل‌ها براساس پیشرفت‌های حاصل در هر نسخه نسبت به نسخه قبلی در پنج گروه طبقه‌بندی شده‌اند. نسخه اول از سال ۱۹۸۷تا ۱۹۹۲ و برای شرایط هوای کاملا صاف، نسخه دوم از سال ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۶ با معرفی شرایط ابری، نسخه سوم از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ برای هوای صاف و تیره، نسخه چهارم از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ از ترکیب شاخه‌هایی از نسخه‌های قبلی و در ۴ زیرگروه، و نسخه پنجم از اواخر سال ۲۰۰۶ و اوایل ۲۰۰۷ تاکنون توسعه یافت[۳].

شکل اصلی MR نسخه اول در شرایط آسمان صاف به طور مؤثری کار می‌کند. اما نتوانست در آسمان‌های نسبتا ابری یا تیره کارکند. نسخه دوم معادلاتی را برای محاسبه عبور (Transmittance) با تحلیل جدیدی معرفی می‌کند و در نتیجه مؤثرتر از نسخه قبلی است. ولی همچنان فقط برای شرایط آسمان صاف به خوبی کار می‌کند. با توسعه نسخه سوم این نواقص برطرف شد و در نسخه چهارم برای شرایط آسمان نسبتا ابری و تیره بهبودهایی حاصل شد. با اصلاح خطاهای موجود در معادلات عبور و نیز خطاهای مربوط به هندسه خورشیدی در نسخه چهارم، آخرین نسخه معرفی شد.

در ادامه برای آشنایی بیشتر و ایجاد درک روشن‌تری از این نسخه‌ها، معادلات اساسی نسخه اولیه آورده شده است. معادلات در نسخه‌های دیگر تغییراتی داشته است تا همانطور که در بند قبلی اشاره شد، مسائلی نظیر شرایط ابری و مانند آن را وارد مدل کند.

۴-۱- نسخه اول مدل‌های MRM

۴-۱-۱- پرتوافکنی مستقیم در شرایط آسمان بدون ابر

به طورکلی MRM یک الگورتیم تجربی گسترده برای شبیه‌سازی و تخمین انرژی خورشیدی روی سطح افقی است. در این روش مؤلفه پرتو مستقیم عمود بر صفحه افقی در آسمان صاف و اتمسفر طبیعی (بدون تاثیر عوامل انسانی) مطابق با Bird و Hulstrom در ۱۹۸۱ با رابطه زیر داده می‌شود[۳]:

$$I_b = 0.975 I_{ex}\, sin(h).(T_a T_r T_0 T_w T_{mg}) \qquad (۱)$$

h، زاویه ارتفاع خورشیدی (رادیان)، I_{ex} پرتوافکنی فرازمینی عمود بر اشعه‌های خورشیدی در هر روز سال است و طبق اطلس اروپایی تابش خورشیدی در ۱۹۸۹ با رابطه زیر تعیین می‌شود[۴]:

$$I_{ex} = I_o\left[1 + 0.033 cos\left(2\pi \frac{DN-4}{366}\right)\right] \qquad (۲)$$

I_o=1353 W/m^2 ثابت خورشیدی، T_a عبور نوری اورسل‌ها در اثر پراکندگی Mie، T_r عبور نوری مولکول‌ها بر اثر پراکندگی رایلی (Rayleigh scattering) ، T_o عبور نوری ناشی از جذب اوزن، T_w عبور نوری ناشی از جذب بخار آب و T_{mg} عبور نوری بر اثر جذب مخلوط گازها، CO_2 و O_2 است. مطابق با اقبال در ۱۹۸۳، عبور نوری بر اثر پراکندگی Mie (اورسلها) توسط رابطه زیر محاسبه می شود[۵]:

$$T_a = exp\left[-\delta_a^{0.873}\left(1+\delta_a-\delta_a^{0.7088}\right)m'^{0.9108}\right] \qquad (۳)$$

δ_a، ضخامت نوری اورسل، m یا جرم هوا است که با رابطه (۴) محاسبه می شود [۶].

$$m = \left[sin(h) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.2253}\right]^{-1} \quad (۴)$$

که θ_z زاویه سمت‌الراس بر حسب درجه است. m برای سایت-هایی که فشار P غیر از P_a=1013.25 hPa (فشار سطح دریا) دارند به صورت $m' = m(P/P_a)$ تصحیح شده است. ضخامت نوری اورسل‌ها را می‌توان مطابق با shettle و Fenn در ۱۹۷۵ با فرمول (۵) محاسبه کرد[۷].

$$\delta_a = 0.2758\delta_{a,\lambda=0.38} + 0.3500\delta_{a,\lambda=0.50} \quad (۵)$$

جائیکه مقادیر $\delta_{a,\lambda=0.38}$ و $\delta_{a,\lambda=0.5}$ با توجه به محل مورد نظر متغیر هستند. رابطه بین δa و λ عبارت است از:

$$\delta_{a,\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (۶\text{-الف})$$

که به معادله آنگستروم شناخته می شود. این معادله δ_a را به صورت تابعی از طول موج λ، ضریب تیرگی β و ضریبی مربوط به توزیع اندازه ذرات اورسل α، بیان می کند. اگر α و β برای یک محل مشخص نباشد می‌توان مقادیر نمونه را از مقالات علمی معتبر برای شرایط آمسفری گوناگون (روستایی، شهری، اقیانوسی، و غیره) بدست آورد. شایان ذکر است مقادیر ضخامت نوری اورسل به طور ضعیفی تحت تاثیر تغییرات جغرافیایی هستند. اگر مشاهدات قابلیت دید را بتوان از ایستگاه هواسنجی نزدیک به محل بدست آورد آنگاه برای تخمین β می توان از رابطه تجربی (۶-ب) استفاده کرد[۸].

$$\beta = 0.55^{\alpha}\left(\frac{3.912}{V} - 0.01162\right)\times \left[0.02472(V-5) + 1.132\right] \quad (۶\text{-ب})$$

که V قابلیت دید افقی بر حسب کیلومتر است.

عبور نوری ناشی از پراکندگی مولکولی رایلی را می توان مطابق با اقبال در ۱۹۸۳ از رابطه زیر تعیین نمود:

$$T_r = exp\left[-0.0903m'^{0.84}\left(1 + m' - m'^{1.01}\right)\right] \quad (۷)$$

عبور نوری بر اثر جذب ازن عبارت است از:

$$T_o = 1 - \begin{bmatrix} 0.1611\ell_o(1 + 139.48x_o)^{-0.3035} \\ -0.00271\ell_o \times \begin{pmatrix} 1 + 0.0440x_o \\ +0.0003{x_o}^2 \end{pmatrix}^{-1} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

جائیکه x_0=l0 m است و l_0 کل ستون ازن در اتمسفر است و بر حسب واحد atm-cm اندازه‌گیری می شود. (1 atm-cm=10^{-3} DU) برای نیمکره شمالی مطابق فرمول Van Haiklon در ۱۹۷۹ تخمین زده می شود [۹].

$$\ell_o = d_1 + \begin{Bmatrix} d_2 + d_3\, sin\left[d_4(N-30)\right] + \\ d_5\, sin\left[d_6(\theta + \Delta)\right] \end{Bmatrix}\left[sin^2(d_7\phi)\right] \quad (۹)$$

در رابطه فوق:

d_1= 0.235 d_2= 0.15 d_3= 0.04
d_4= 0.9865 d5= 0.02 d_6=2 π/10800
d_7=1.28π/180

همچنین، θ طول جغرافیایی، φ عرض جغرافیایی برحسب درجه و Δ فاکتور تصحیح است که برای طول‌های جغرافیایی شرقی ۲۰ درجه و برای غربی ۰ درجه است.

عبور ناشی از جذب بخار آب، مطابق lacis و Hansen در ۱۹۷۴ به صورت زیر محاسبه می شود[۱۰].

$$T_o = 1 - 2.4959x_w \left[\begin{matrix} (1+79.034x_w)^{0.6828} \\ +6.385x_w^{-1} \end{matrix} \right]^{-1} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، $x_w=l_w$ .m است و l_w کل ستون آب قابل بارش برحسب cm است که با رابطه (۱۱) تخمین زده می شود[۱۱]:.

$$l_w = 0.23e_m \times 10^{-H/22000} \quad (۱۱)$$

e_m، فشار نسبی بخار برحسب میلیمتر جیوه در ارتفاع H متر ایستگاه است. برای محاسبه l_w در نسخه اول بجای رابطه‌های ارائه شده توسط Bird و Hulstrom استفاده از عبارت فوق ترجیح داده شده است زیرا در مناطقی که شرایط آب و هوای مدیترانه‌ای دارند نتایج بهتری می دهد[۱۲].

در نهایت مطابق با فرمول Bird و Hulstrom در ۱۹۸۱، عبور نوری بر اثر گازهای مخلوط در اتمسفر را می‌توان به صورت زیر تقریب زد[۱۳]:.

$$T_{mg} = exp\left(-0.0127m'^{0.26}\right) \quad (۱۲)$$

۴-۱-۲- پرتوافکنی نفوذی در شرایط آسمان بدون ابر

مؤلفه نفوذی افقی I_d براساس Bird و Hulstrom در ۱۹۸۱، برای آسمان صاف توسط رابطه زیر داده شده است:

$$I_d = 0.79I_{ex}.\sin(h)T_o.T_w.T_{mg}.T_{aa} \times \times \left[\begin{matrix} 0.5(1-T_r)+ \\ 0.84(1-T_{as}) \end{matrix} \right] / \left(1-m+m^{1.02}\right) \quad (۱۳\text{-الف})$$

که در رابطه فوق:

$$T_{aa} = 1 - 0.6(1-T_a)\left(1-m+m^{1.06}\right) \quad (۱۳\text{-ب})$$

$$T_{as} = 10^{-0.045.m'^{0.7}} \quad (۱۳\text{-ج})$$

که T_a با معادله (۳) داده شده است. T_{aa} عبور در باند گسترده ناشی از جذب توسط اورسلها و T_{as} تقلیل تابش حاصل از پراکندگی اورسل به تنهایی است.در معادله (۱۳.ب) ضریب ۰/۶ بجای مقدارش توسط bird و Hustrom در ۱۹۸۱ یعنی ۰/۱ ترجیح داده شده است زیرا در مناطقی با شرایط آب و هوای مدیترانه‌ای نتایج بهتری می‌دهد.

۴-۱-۳- پرتوافکنی کلی برای آسمان بدون ابر

پرتوافکنی کلی افقی I_g تحت شرایط آسمان صاف به صورت مجموع پرتومستقیم در معادل (۱) و مؤلفه نفوذی در معادله (۱۳.الف) داده می شود:

$$I_g = I_b + I_d \quad (۱۴\text{-الف})$$

اما تاثیر بازتاب‌های چندگانه آتمسفر با زمین بوسیله فاکتور مناسبی مثل $(1-\rho g\rho a)$ قابل لحاظ است:

$$I_g = (I_b + I_d)/(1-\rho_g.\rho_a) \quad (۱۴\text{- ب})$$

جائیکه ρ_g ضریب بازتابش زمین است و معمولا ۰/۲ داده می شود. و ρ_a ضریب بازتابش آسمان بدون ابر است و می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\rho_a = 0.0685 + 0.16(1-T_{as}) \quad (۱۵)$$

۵- عملکرد نسخه های مختلف MRM

برای مقایسه کارائی نسخه‌های مختلف و برتری حاصل شده در توسعه آنها، در جدول (۱) کیفیت عملکرد آنها در شرایط

آسمان صاف و ابری و همچنین تذکرات مهم مربوط به هر نسخه آورده شده است. همانطوریکه از جدول (۱) مشاهده می-شود، با توسعه به سوی نسخه‌های جدیدتر ، عملکرد مدل‌ها برای شرایط آسمان صاف و ابری بهتر شده و به‌ویژه در نسخه آخر رویکرد الگوریتم و طراحی مدل به طور کامل جدید است.

۶- ارزیابی آماری مدلها

با آنکه در اکثر مطالعات آماری گذشته، پارامتر ضریب همبستگی پیرسون (Pearson correlation coefficients) می تواند دقت عملیات ریاضی انجام شده برای یافتن رابطه همبستگی مدنظر را مشخص کند، اما همیشه یک ضریب همبستگی خوب دلیل بر دقت بالای مدل نیست[۱]. برای بررسی دقیق تر دقت مدل‌ها از چهار پارامتر آماری دیگر به طور عمده استفاده شده است که در ادامه به طور مختصر توضیح داده می‌شود.

۶-۱- ضریب تطابق (Index of agreement) یا ضریب مدلسازی (Modeling index) (d)

ضریب تطابق یا ضریب مدلسازی با رابطه (۱۶) محاسبه می شود:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=0}^{n} (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=0}^{n} \left(|x_i - \bar{x}_i| + |y_i - \bar{y}_i| \right)^2} \right] \qquad (۱۶)$$

که x_i ها مقادیر مشاهده شده تابش خورشیدی هستند و متوسط آنها $\bar{x}$ است و y_i ها مقادیر مدل‌سازی شده هستند[۱۶]. مقدار d بین ۰ و ۱ تغییر می کند و مقدار ۱ نشان دهنده تطابق کامل مدل است[۱۷]..

۶-۲- ضریب راندمان مدلسازی (Coefficient of modeling efficiency, ME)

با استفاده از رابطه (۱۷) ضریب راندمان مدل‌سازی قابل محاسبه است.

$$ME = 1 - \left[\frac{\sum_{i=0}^{n} (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=0}^{n} \left(|x_i - \bar{x}_i| \right)^2} \right] \qquad (۱۷)$$

که x_i ها مقادیر مشاهده شده تابش خورشیدی با مقدار متوسط $\bar{x}$ و y_i ها مقادیر متناظر مدل شده هستند[۲]. مقدار ME بین منفی بینهایت و ۱ تغییر می کند که مقادیر بزرگتر یا نزدیکتر به ۱ نشان دهنده عملکرد برتر مدل است.

دو سنجش آماری دیگر نیز محاسبه شده است و از آنجا که واحد آنها با پارامترهای کمیت های مشاهده شده یکسان است، مفید هستند. بنابراین می توان ارزیابی بهتری از دقت مدل بدست آورد. اولی، خطای مجذور میانگین (Root mean square error, RMSE) است که از رابطه (۱۸) محاسبه می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left[\sum_{i=0}^{n} (x_i - y_i)^2 \right]} \qquad (۱۸)$$

جائیکه x_i ها مقادیر تابش خورشیدی مشاهده شده و y_i ها مقادیر مدل شده و n تعداد مشاهدات است. [۱۸].

پارامتر دوم آماری، خطای مطلق میانگین (Mean absolute error MEA) است که توسط رابطه (۱۹) محاسبه می شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=0}^{n} |x_i - y_i| \right] \qquad (۱۹)$$

که x_i ها مقادیر تابش خورشیدی مشاهده شده و y_i ها مقادیر مدل شده هستند. این اندازه گیری‌های آماری در مقایسه مدلسازی های مختلف استفاده شده است[۲۳-۱۹].

۷- مراجع

[1] Viorel Badescu," Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance" *Solar Energy*, *Volume 61, Issue 4*, *October 1997*, *Pages 251-264.*

[2] Psiloglou BE and Kambezidis HD (2007) Performance of the meteorological radiation model during the solar eclipse of 29 March 2006. Special issue on: The total solar eclipse of 2006 and its effects on the environment. In: Zerefos C, Mihalopoulos N, Monks P (eds). Atmospheric Chemistry and Physics 7: 6047–6059.

[3] Bird RE and Hulstrom RL (1981a) Review, evaluation and improvement of direct irradiance models, Trans. ASME, J. Sol. Energy Eng. 103: 182–192.

[4] ESRA-European Solar Radiation Atlas (1989) Commission of the European Communities, version I.

[5] Iqbal M (1983) An introduction to solar radiation. Academic Press, New York.

[6] Kasten F (1966) A new table and approximate formula for relative optical air mass. Arch.Meteorol. Geophys. Bioklimatol. B 14: 206–223.

[7] Settle EP and Fenn RW (1975) Models of the atmospheric aerosol and their optical properties. In Proc. AGARD Conf. No. 183 on ‘’Optical propagation in the atmosphere”, 2.1–2.16.

[8] McClatchey RA and Selby JE (1972) Atmospheric transmittance from 0.25 to 38.5□m: computer code LOWTRAN-2. Air Force Cambridge Laboratories, AFCRL-72-0745, Environment Research Paper, pp. 4214.

[9] Van Heuklon TK (1979) Estimating atmospheric ozone for solar radiation models. Solar Energy 22: 63–68.

[10] Lacis AA and Hansen JE (1974) A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth’s atmosphere. J. Atmos. Sci. 31: 118–132.

[11] Gates DM (1962) Energy exchange in the biosphere. Harper & Row, New York.

[12] Pisimanis DK, Notaridou VA and Lalas DP (1987) Estimating direct, diffuse and global solar radiation on an arbitrarily. Solar Energy 39: 159–172.

[13] Bird RE and Hulstrom RL (1981b) A simplified clear-sky model for the direct and diffuse insolation on horizontal surfaces US SERI Tech. Report TR-642-761: 38.

[14] Viorel Badescu,"Modeling Solar Radiation at the Earth’s Surface, Recent Advances", 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[15] Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteor. Soc. 64:1309–1313.

[16] Mayer, D. G. and D. G. Butler. 1993. Statistical validation. Ecol. Model. 68:21–32

[17] Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. Physical Geography 2:184–194.

[18] Legates, D. R. and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of ‘‘goodness of fit’’ measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resour. Res. 35:233–241.

[19] Mayer, D. G. and D. G. Butler. 1993. Statistical validation. Ecol. Model. 68:21–32

[20] Diekkru¨ger, B., D. So¨ndgerath, K. C. Kersenbaum, and C. W. McVoy. 1995. Validity of agroecosystem models: a comparison of results of different models applied to the same data set. Ecol. Model. 81:3–29.

[21] Wegehenkel, M. 2000. Test of a modeling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches. Ecol. Model. 129:39–64.

[22] Eitzinger, J., M. Trnka, J. Ho¨sch, Z. Alud, and M. Dubrovsky´. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecol. Model. 171:223–246.

[23] Winslow, J. C., E. R. Hunt, and S. C. Piper. 2001. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. Ecol. Model. 143:227–243