

Получена: 22.12.2017 г.

Приета: 24.05.2018 г.

РАСТЕРНА ДИСКРЕТИЗАЦИЯ НА ПРОЕКЦИЯТА НА ИЗЛЪЧВАНАТА ОТ НЕБОСВОДА ДИРЕКТНА СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ

Ст. Иванова¹

Ключови думи: слънчева енергия, директна слънчева радиация, излъчване от небосвода, fisheye ортографска проекция, PVGIS

РЕЗЮМЕ

В по-ранни публикации авторът разработи методика за изчисляване на падащата глобална слънчева радиация върху хоризонтални, вертикални и наклонени равнини, базирана на определяне на кумулативното излъчване на небосвода за произволни периоди. Беше показано, че тази методика е много подходяща за прилагане в урбанизирана среда, където има множество обекти със сложна конфигурация, които засенчват небосвода. Така могат да бъдат решавани огромен брой задачи, свързани с определянето на количеството падаща за определен период слънчева радиация върху повърхностите от сградната обвивка под частично засенчено небе. Подобряването на точността на тази методика налага по-внимателно разглеждане на излъчването на директна слънчева радиация от небосвода. Проекцията на целия небосвод върху хоризонтална равнина във вид на кръг в методиката се представя като растерно изображение. Зоната около слънчевия диск с ъглов диаметър 5° , източник на директна слънчева радиация, се проектира като съвкупност от точки, оформящи елипса. В настоящата разработка се предлага начин за по-коректно и по-точно растерно дискретизиране на тази проекция на излъчваната от небосвода директна слънчева радиация.

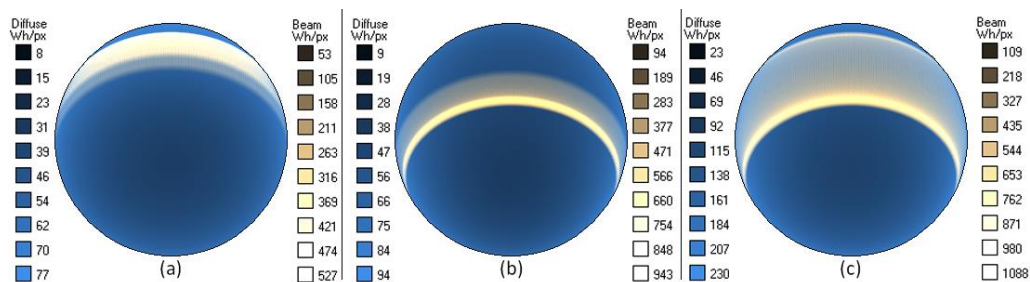
¹Стоянка Иванова, доц. д-р арх., кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: solarina@mail.bg

1. Въведение

Пасивният слънчев дизайн, както и много други задачи в строителната физика, се нуждаят от изчислителни методи за определяне на количеството слънчева енергия, която пада върху сградните повърхности и прониква във вътрешността на сградата. В урбанизирана среда обаче решението на тази задача не е лесно, като включва определянето на три компонента – директна, дифузна и отразена от други повърхности слънчева радиация с отчитане на засенчванията.

В по-ранни публикации [1 – 3] авторът разработи методика за изчисляване на падащата глобална слънчева радиация върху хоризонтални, вертикални и наклонени повърхности, базирана на определяне на кумулативното излъчване на небосвода за зададени периоди. Беше показано, че тази методика е много подходяща за прилагане в урбанизирана среда, където има множество обекти със сложна конфигурация, които засенчват небосвода.

Разработената методика изисква първоначално с програма пре-процесор да се изготвят целодневни подробни схеми на излъчването на небосвода (sky radiance patterns), за всички дни от годината. Тази задача се изпълнява еднократно за всяко ново местоположение и резултатите от нея се използват в следваща програма, която може да обобщава небесното излъчване за произволни периоди (седмици, месеци, сезони, година, вж. фиг. 1), както и да отчита засенчванията на небосвода от тримерни обекти, разположени около приемната повърхност (вж. фиг. 2 и 3).



Фиг. 1. Ортографска хоризонтална проекция тип „рибешко око“ на кумулативно небе, излъчващо глобална слънчева радиация: а) за зимния период; б) за летния период; в) за цялата година

Програмата пре-процесор се нуждае от данни за излъчването на слънцето по часове за всеки ден от годината, както и за дифузната слънчева радиация, идваща от небосвода. Тези данни могат да се получат например от програми като RADIANCE [4], libRadtran [5], DISORT [6] и др., които моделират излъчването на радиация от всеки небесен фрагмент. Друг начин е тези данни да се генерират въз основа на соларни модели, които определят небесното излъчване на базата на компонентите на слънчевата радиация, получени от измервания в продължителен период от 20 – 30 години.

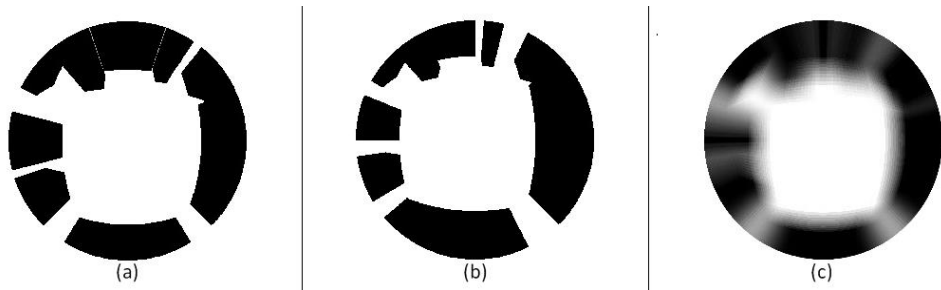
Сред различните соларни модели значително по-сложни са тези, които описват дифузната слънчева радиация. В сравнение с тях моделирането на излъчването на директната слънчева радиация е относително по-просто.

В настоящата публикация ще бъде обърнато по-голямо внимание на директната слънчева радиация. На теория би трябвало тя да представлява само излъчването от слънчевия диск с ъглов диаметър $0,5^\circ$. На практика обаче е доста трудно да се създадат измервателни уреди, които да следват толкова прецизно движението на слънчевия диск по

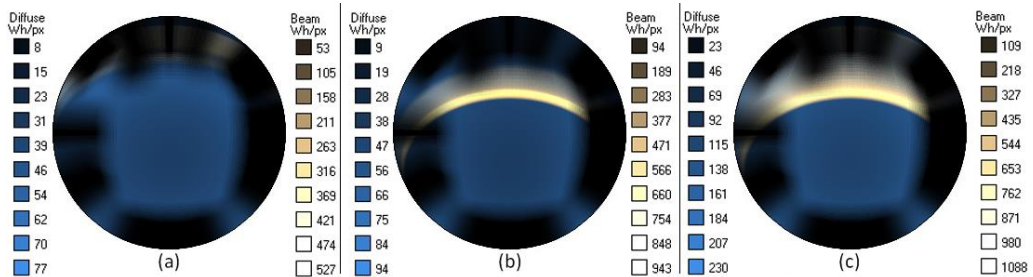
небосвода, където неговата траектория е различна във всеки ден от годината. По тази причина директната слънчева радиация се измерва с уреди, наречени пирхелиометри, чийто ъгъл на отвора е 5° , т.е. 10 пъти по-голям от ъгловия размер на слънчевия диск. Така измерваната радиация всъщност включва две части – директна (beam) радиация, която идва от зоната на слънчевия диск, и околослънчева (circumsolar) радиация, която идва от зоната около слънцето (аугеол, ореол) с ъглов радиус $2,5^\circ$. Общото между слънчевите лъчи, които идват от слънчевия диск и от зоната около него, е, че те се движат почти праволинейно и с много леко разсейване и за тях важи формулата:

$$B_h = B_n \sin(\text{SolAlt}), \quad (1)$$

където B_h е хоризонталната проекция на директната слънчева радиация, B_n е интензитетът на потока директна слънчева радиация, измерен перпендикулярно на посоката на слънчевите лъчи, а SolAlt е височинният ъгъл на слънцето над хоризонта.



Фиг. 2. Матрица на засенчванията спрямо хоризонтална повърхност: а, б) засенчвания спрямо точка; в) усреднено засенчване спрямо цяла повърхност



Фиг. 3. Ортографска хоризонтална проекция тип „рибешко око” на кумулативно небе, излъчващо глобална слънчева радиация – комбинация на матрица с усреднени засенчвания с кумулативно небе за различни периоди: а) зимен период; б) летен период; в) цяла година

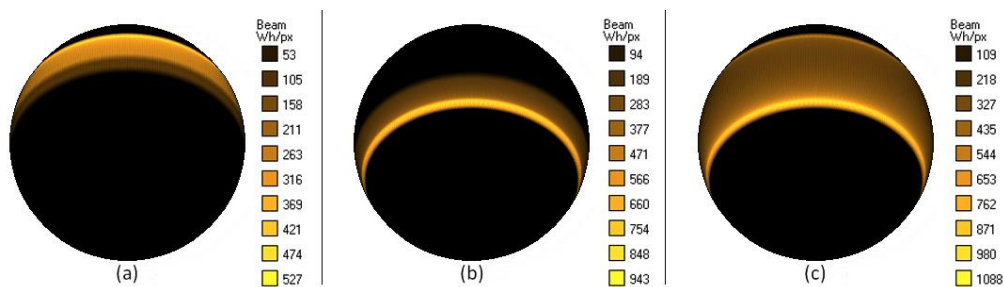
В по-ранни разработки [1 – 3] авторът показва колко удачно е използването на т.нар. ортографска проекция, тип „рибешко око” (fisheye orthographic projection) на небосвода върху хоризонтални, вертикални или наклонени равнини за определяне на получената слънчева енергия върху тях в даден момент или за период. В настоящата методика проекцията на небосвода върху произволна равнина в разработената методика се представя като кръг, позициониран в средата на квадратно растрено изображение.

При модел с т.нар. изотропно небе, определянето на общото излъчване на небосвода е свързано с преброяване на всички видими точки от небосвода с отчитане на тяхното равномерно излъчване, характерно за този модел.

При определяне на общото излъчване на анизотропно излъчващо небе пак се сумират всички видими точки, но с отчитане на тяхното индивидуално излъчване на глобална слънчева радиация (global solar radiance), която се съхранява в квадратна матрица, запълнена частично в кръгова форма, съответстваща на визуалния кумулативен образ на небосвода, както е изобразен във фиг. 1 и 3.

Стойностите в тази матрица се получават от сумиране на две други матрици, съдържащи съответно излъчваната от небосвода директна (вж. фиг. 4) и дифузна радиация.

В тази работа ще обърнем основно внимание на генерирането на матрицата на директната радиация.



Фиг. 4. Ортографска хоризонтална проекция тип „рибешко око“ на кумулативно небе, излъчващо само директна слънчева радиация: а) за зимния период; б) за летния период; в) за цялата година

Определянето на стойностите в матрицата на директната радиация за определен период (седмица, месец, сезон, година) става със сумиране на съответните стойности на всички дневни матрици на директната радиация в зададения период.

Размерът на матрицата трябва да бъде достатъчно голям, за да даде желаната точност на резултата, но не прекалено голям, за да не отнема прекалено много изчислително време за всяко изследване.

В конкретната реализация авторът се е спрял на оптимален размер на матриците 250×250 елемента, които се визуализират в изображение с 250×250 точки. Този размер има още едно предимство – такава матрица може без проблем да се онагледява и в MS Excel.

2. Анализ на досегашната методика, използвана в пре-процесора

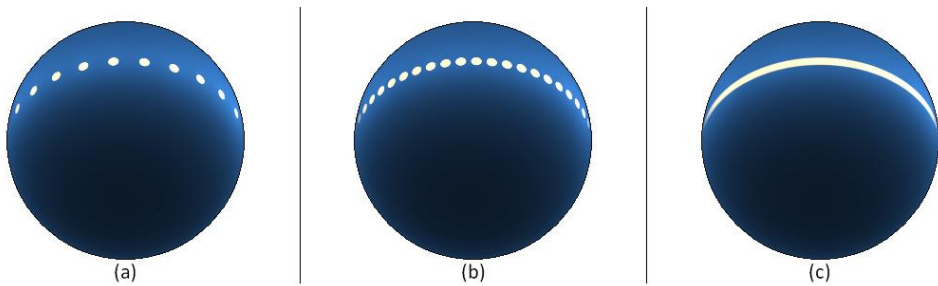
Исходните данни, въз основа на които се изгражда всяка дневна матрица на кумулативната директна радиация, са почасовите стойности на директната радиация, получени от база данни на PVGIS. В по-ранната версия на пре-процесора се работеше с по-стара база данни, базирана на измервания в периода 1981 до 1990 г. Впоследствие беше разработена нова версия на пре-процесора, която да използва една по-нова база данни, пак на PVGIS, с името TMY (Typical Meteorological Year) [7]. Тези стойности са изчислени на базата на сателитни наблюдения през последните години (от 2005 до 2014 г.) и показват завишаване на падащата върху земната повърхност слънчева радиация [8].

За да се получи визуално плавна и гладка траектория на слънцето на небосвода, изчислителна стъпка от един или половин час е твърде голяма (вж. фиг. 5). Затова се изчислява соларната позиция, състояща се от две ъглови координати – височинен ъгъл (solar altitude) и азимут (solar azimuth) на слънцето на всеки 5 минути, т.е. изчислителната стъпка е 1/12 часа. Съответната стойност на потока директна радиация B_n в тази реал-

лизация се определя чрез линейно интерполиране между две часови стойности. Видът на интерполиране (линейно, кубично, полиномиално или др.) е друга интересна задача, която ще бъде допълнително изследвана.

Така за всеки 5 минути се изпълнява операция по генериране на стойности във временна матрица, стойностите на която се натрупват в дневната матрица на директната радиация.

При размер на матрицата от 250×250 елемента, която обхваща небосвод с 360 градуса, ъгловият размер $0,5^\circ$ на слънцето е твърде малък, за да бъде прецизно отразен в нея. Затова беше решено, стойността на директната радиация, излъчвана от слънчевия диск и околослънчевата област, да бъде равномерно разпределена в целия кръг с ъглов диаметър $A_{beam} = 5^\circ$, за който се приема, че е източник на тази радиация. Тази кръгла зона около слънчевия диск обикновено се проектира върху различни равнини като елипса и се изобразява като съвкупност от точки, оформящи елипса (вж. фиг. 5). При хоризонтална проекция, колкото по-ниско над хоризонта е слънцето, толкова по-ексцентрична (сплескана) е елипсата. Генерирането на този образ представлява растерно дискретизиране на зоната, излъчваща директна слънчева радиация.



Фиг. 5. Ортографска хоризонтална проекция тип „рибешко око” на еднодневно кумулативно небе за 22 март: а) при изчислителна стъпка 1 час; б) при изчислителна стъпка 30 минути; в) при изчислителна стъпка 5 минути

В предишната версия на пре-процесора за всяка точка в близост до слънчевата позиция се проверяваше дали ъгловото ѝ разстояние A_D до центъра на слънцето е по-малко от $2,5^\circ$ и ако това условие е изпълнено, на съответстващия ѝ елемент в матрицата се присвоява стойността B – среден интензитет на излъчваната директна радиация от околослънчевата област, измерен в W/sr (Wat за стерадиан) и изчислен по следната формула (2):

$$B = \frac{B_n}{2\pi(1 - \cos(A_{beam} / 2))} . \quad (2)$$

Ъгловото разстояние A_D между изследваната точка с ъглови координати (Alt_1, Az_1) и центъра на слънцето с координати (Alt_2, Az_2) се изчислява с помощта на формули (3) и (4):

$$A_D = 2 \arcsin\left(\frac{D}{2}\right) , \quad (3)$$

$$D = \sqrt{\left[\cos(Alt_2)\sin(Az_2) - \cos(Alt_1)\sin(Az_1) \right]^2 + \left[\cos(Alt_2)\cos(Az_2) - \cos(Alt_1)\cos(Az_1) \right]^2 + \left[\sin(Alt_2) - \sin(Alt_1) \right]^2} \quad (4)$$

В табл. 1 са показани стойностите на директната слънчева радиация в елементите, отразяващи позицията на слънцето в 11:55 на 22.03, изчислени в kW/sr. Трябва да се обърне внимание, че всички ненулеви стойности са равни помежду си. На фиг. 6 са визуализирани всички соларни позиции по часове за същия ден, петата от тях отляво надясно отговаря на 11:55 часа.

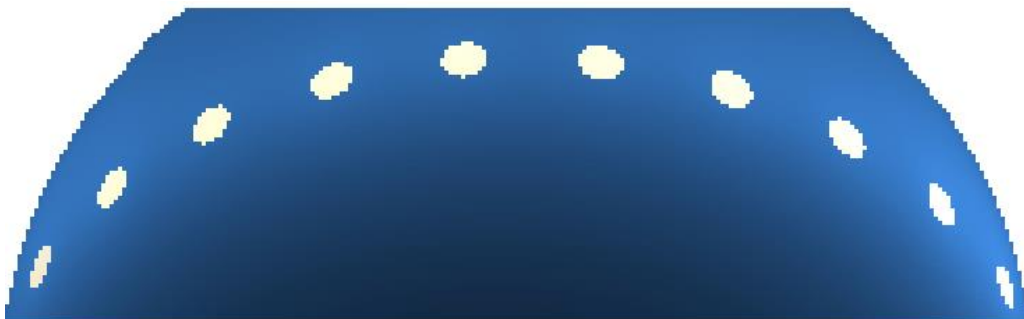
Таблица 1. Стойности в част от моментната матрица за директна радиация, изчислени в kW/sr от предишната версия на пре-процесора. Всички ненулеви стойности са равни

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	138	138	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	138	138	138	138	138	0	0	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	0	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	0	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	0	0	0
0	0	138	138	138	138	138	138	138	138	138	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	138	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	138	0	0
0	0	0	138	138	138	138	138	138	138	138	0	0
0	0	0	0	138	138	138	138	138	138	0	0	0
0	0	0	0	0	138	138	138	138	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3. Подобряване на точността

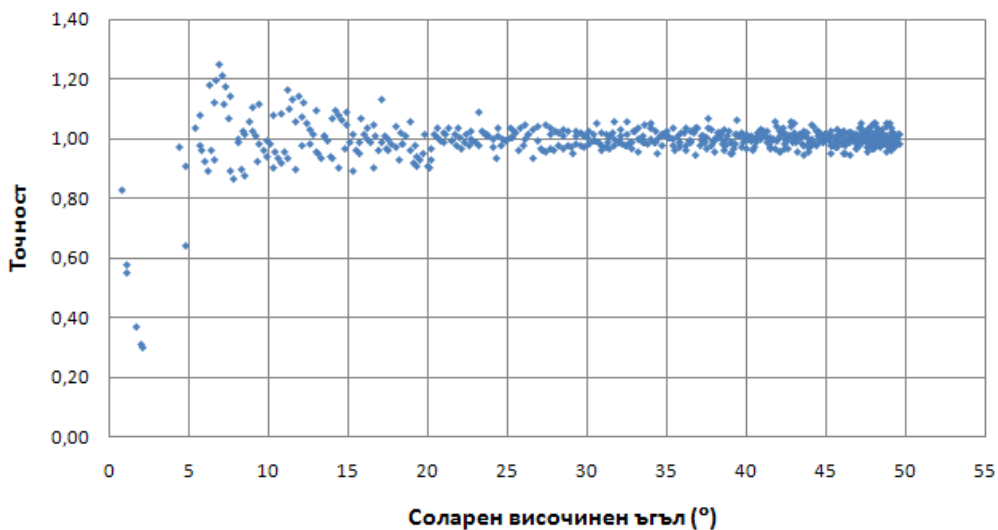
В предишната версия на пре-процесора при размер на матрицата (и на съответстващото изображение) 250×250 , размерът на зоната, излъчваща директна радиация, е елипса, която се вписва в квадрат с максимален размер 13×13 елемента (и точки), които имат еднаква стойност, равна на B . При това положение често се случва, особено при пониско слънце, сумарната проектирана радиация да е по-малка от стойността на B_h ,

изчислена по формула (1). С натрупване това води до по-ниски стойности за деня и за различни периоди, в това число по месеци и за годината.



Фиг. 6. Увеличен фрагмент от проекция, която визуализира образите по часове на източника на директна слънчева радиация в предишната версия на пре-процесора за 22 март

На фиг. 7 е изобразена зависимостта на точността на растрното дискретизиране като функция от височинния ъгъл на слънцето при изследвани 588 слънчеви позиции през месец март. Вижда се, че с увеличаването на ъгъла точността е по-голяма – от 20° до 50° грешката е от -10% до $+10\%$. Колкото по-малък е височинният ъгъл, толкова по-голямо е отклонението на проектираната върху хоризонталната равнина директна слънчева радиация от вярната стойност. При ъгли между 5° и 10° грешката е между -15% и $+25\%$, а при ъгли под 5° достига до значителна грешка от -70% .



Фиг. 7. Графика на зависимостта на точността на растрното дискретизиране на директната радиация от височинния ъгъл на слънцето в градуси при предишната методика

Тази графика показва, че има нужда от подобряване на точността при тази версия на софтуера, а това налага по-внимателно разглеждане на излъчването на директна слънчева радиация от небосвода. Така целта на настоящата разработка е да предложи начин за по-коректно и по-точно растрно дискретизиране на проекцията на излъчваната от

небосвода директна слънчева радиация. Желателно е този начин да работи достатъчно добре при приемни повърхности с всякакъв наклон.

За целта зоната на контакт между изобразената елипса и околните точки трябва да се изследва с по-голяма прецизност.

Нужно е да се анализират точките в околослънчевата зона с размер 13×13 точки, за да се определи за всяка от тях коефициентът T , по който трябва да се умножи средният интензитет B на излъчваната директна радиация от околослънчевата област. Всяка точка се изследва дали попада в зоната на слънчевия ореол изцяло или частично. Възможностите са 3: а) пълно попадение на точката в соларния ореол, в този случай $T = 1$; б) частично попадение и $0 < T < 1$; в) точката е изцяло извън слънчевия ореол, тогава $T = 0$.

За да се изпълни това, небесният фрагмент, отговарящ за всеки от четирите ъгъла на точката, се проверява дали попада в соларния ореол. Ако и четирите ъгъла са отвън, налице е случай в). Ако и четирите ъгъла са вътре, налице е случай а). Ако поне един ъгъл е вътре, а другите отвън, налице е случай б). Тогава небесният фрагмент, съответстващ на изследваната точка, се дели с допълнителна мрежа (10×10 или по-дребна в зависимост от желаната точност) и за всеки елемент от нея се проверява дали попада или не в соларния ореол. Накрая T се изчислява въз основа на това колко процента от небесния фрагмент зад точката попадат в ореола. След като T се умножи по B , за всяка точка в изследваната зона 13×13 , се получават стойности като в табл. 2.

Таблица 2. Стойности в моментната матрица за директна радиация, изчислени в kW/sr в новата версия. Стойностите по контура са по-малки

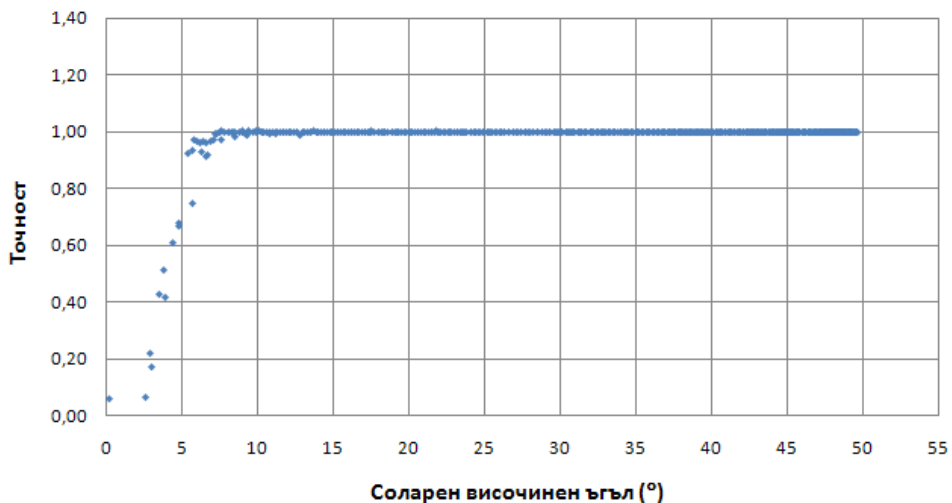
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	20	74	83	45	0	0	0	0	0
0	0	0	34	133	138	138	138	94	3	0	0	0
0	0	3	121	138	138	138	138	138	73	0	0	0
0	0	39	138	138	138	138	138	138	134	11	0	0
0	0	66	138	138	138	138	138	138	138	53	0	0
0	0	73	138	138	138	138	138	138	138	78	0	0
0	0	59	138	138	138	138	138	138	138	83	0	0
0	0	25	138	138	138	138	138	138	138	69	0	0
0	0	0	107	138	138	138	138	138	138	32	0	0
0	0	0	26	133	138	138	138	138	102	0	0	0
0	0	0	0	33	119	138	138	103	12	0	0	0
0	0	0	0	0	1	24	20	0	0	0	0	0

На фиг. 8 са визуализирани в новата версия на софтуера всички соларни позиции по часове за 22 март. Както може да се очаква, точките в контактната зона между соларните елипси и фона са по-малко ярки от самите елипси. Петата елипса отляво надясно отговаря на позицията на слънцето в 11:55 часа и стойностите ѝ са представени в табл. 2. Елипсите, отговарящи на по-ниско слънце, имат по-голям процент гранични точки в контактната зона с по-ниска яркост.



Фиг. 8. Увеличен фрагмент от проекция, която визуализира часовите образи на източника на директна слънчева радиация по новата методика. Точките по контура са с по-ниска яркост

На фиг. 9, която е подобна на фиг. 7, е изобразена зависимостта на точността на растерното дискретизиране като функция от височинния ъгъл на слънцето. За разлика от предишната методика, се вижда, че при височинен ъгъл над 10° грешката е под 1%. Малко по-проблемна е зоната от 5° до 10° – там грешката е от -1% до -8% (т.е. имаме по-нисък изчислен резултат от нужния), а в един от случаите достига -25%. При ъгли под 5° грешката продължава да е значителна (до -94%). Тази графика показва, че има нужда от подобряването на точността и при тази методика в зоната с височинни ъгли на слънцето под 5° . Това ще бъде оставено за по-късно.



Фиг. 9. Графика на зависимостта на точността на растерното дискретизиране на директната радиация от височинния ъгъл на слънцето в градуси при новата методика

4. Изводи и бъдеща работа

Целта на настоящата разработка е да предложи начин за по-коректно и по-точно растерно дискретизиране на проекцията на излъчваната от небосвода директна слънчева радиация, който да бъде използван в новата версия на разработвания пре-процесор. След направен анализ на досегашната методика и нейните недостатъци беше разработена нова, която има по-внимателно и прецизно отношение към контактните точки (и съответстващите им елементи в матрицата с данни) между зоната, излъчваща слънчева радиация и тази извън нея. Изследваната зависимост на точността на растерното дискретизиране от височинния ъгъл на слънцето показва – отлична точност от 100% при височинна на слънцето над хоризонта над 10° и задоволителна точност при ъгли от 5° до 10° . При ъгли под 5° грешката е голяма и това налага работата върху методиката да продължи, като се фокусира върху ъгли под $6 - 7^\circ$.

Благодарности

Авторът благодари на Dr. Christian Gueymard за мотивацията да бъде подобрена точността на досегашната версия на софтуера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanova, S.* Use of fisheye orthographic projection for cumulative estimation of direct and diffuse irradiation under partially obstructed sky. // Proc. of 7th Int. Conf. on solar radiation and daylighting Solaris 2015 (Celje, Slovenia, 21–22 May 2015), pp 16-21, 2015.
2. *Ivanova, S.* Using fisheye orthographic projection for cumulative estimation of direct and diffuse radiation on building surfaces in urban environment. // Proc. of World Renewable Energy Congress XIV (Bucharest, Romania, 8–12 June 2015).
3. *Ivanova, S.* Using cumulative sky approach for variant analysis of the seasonal vertical solar radiation for different types of urban street canyons. // Proc. of World Renewable Energy Congress XIV (Bucharest, Romania, 8–12 June 2015).
4. *Luebkehan, C., Simondetti, A.* Practice 2006: Toolkit 2020, Intelligent Computing in Engineering and Architecture: 13th EG-ICE Workshop, Springer, p. 442, ISBN 3540462465, June 25–30, 2006.
5. *Mayer, B., Kylling, A.* Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. // Atmospheric Chemistry and Physics. 5 (7): pp. 1855–1877. doi:10.5194/acp-5-1855-2005, 2005.
6. *Stannes, K., Tsay, S. C., Wiscombe, W., Jayaweera, K.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. // Applied Optics 27 (12): pp. 2502–2509, 1988.
7. See http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html for: Photovoltaic Geographical Information System – Tools of PVGIS-4.
8. See http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/PVGIS_new_features.html for: New features in PVGIS-4.

RASTER DISCRETIZATION OF THE INCIDENT DIRECT SOLAR IRRADIANCE

St. Ivanova¹

Keywords: solar energy, direct solar irradiance, sky radiance pattern, fisheye orthographic projection, PVGIS

ABSTRACT

In earlier publications, the author developed a methodology for an estimation of the incident solar irradiation on horizontal, vertical and inclined surfaces using cumulative fisheye orthographic projections for arbitrary periods. It has been shown that this methodology is very suitable for application in urban environments where there are many objects with complex shapes that obstruct the sky. Thus, a considerable number of tasks can be solved, related to the estimation of the amount of incident solar irradiation over a period on the surfaces of the building envelope under a partially shaded sky. The improvement of the accuracy of this methodology requires a closer look at the direct sky radiance. The projection of the whole sky on a horizontal surface is represented as a raster image. The area of the solar disk and solar aureole with an angular diameter of 5° as a source of direct solar irradiance is projected as a set of pixels in the elliptical shape. In the present study, a more accurate raster discretization of the projection of direct solar irradiance is discussed.

¹ Stoyanka Ivanova, Assoc. Prof. Dr. Arch., Dept. “Computer-Aided Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnovski Blvd., Sofia 1046, e-mail: solaria@mail.bg

