

# DAYLIGHT AVAILABILITY AND DIRECT ILLUMINATION UNDER CLEAR SKY CONDITIONS IN GREECE

**TSIKALOUDAKI Katerina, ARAVANTINOS Dimitris**  
Aristotle University of Thessaloniki, Greece

*For centuries, architecture and daylighting were inseparable, since daylight was the only efficient source of light available. After the Industrial Revolution the wide use of artificial light liberated designers from the constraints of the past. Nowadays, in a world newly concerned about carbon emissions, global warming and sustainable design, the use of natural light in buildings has become an important strategy to improve energy efficiency by minimizing lighting, heating, and cooling loads. However, the integration of common or advanced daylight strategies at each phase of the building design requires information regarding the daylight climate of the region, as well as the illumination levels outdoors.*

*This paper focuses on the study of daylight availability, as well as on the development of a luminous efficacy model for predicting the direct illumination levels under clear sky conditions Greece. The study of these matters was considered necessary, since daylight data are rare to find in Greece. Furthermore, the existing luminous efficacy models failed to represent the real conditions, since their development was based on data of Northern Europe or America, where the climate is much different than that of Greece. The study was based on irradiation and illumination measurements conducted by the National Observatory of Athens during the years 1996-2000. The data was tested according to C.I.E. recommendations and processed with the help of the widely known statistical program S.P.S.S. Daylight availability was derived from the available data on an annual basis, as well as under clear sky conditions. The proposed luminous efficacy models were developed through the analysis, correlation and linear regression of the observed data and were validated both numerically and graphically. Their accuracy in the estimation of direct illuminance was compared with that achieved by other existing luminous efficacy models; the results showed that the former performed better under the specific climatic characteristics.*

## 1. Introduction

A good understanding of the daylight climate typical for a given location is essential for the local architecture, the energy conservation and the environmental policies in general. In fact, the knowledge of daylight availability can be a useful tool for the engineers towards the optimal selection of daylight strategies applied on a building, in order to achieve the maximum utilization of daylight with minimum energy consumption for lighting, cooling and heating. Daylight availability depends on the geographical coordinates of the building site and the climatic characteristics of the region [1]; in combination with the conditions surrounding the building -e.g. its orientation and the presence of obstructions- it determines the operating conditions of the building's façade.

Furthermore, in sunny climates the knowledge of direct illuminance outdoors is key to estimating the indoor daylight levels. Although the direct daylight is rarely

taken into consideration for the calculation of the indoor daylight adequacy, it affects the reflected components of daylight factor indirectly. In particular, under clear sky conditions the internally and externally reflected daylight contributes to the determination of the final illuminance levels on the reference plane. Furthermore, in the Mediterranean countries, where clear sky conditions dominate, the knowledge of direct illuminance plays an important role for the estimation of glare.

Daylight availability is usually derived from measured illuminance data. However, in Greece, as well in the world as a whole, a lack of daylight data is observed. On the contrary, there is a plethora of other meteorological parameters, such as irradiance, air temperature, wet and dry bulb temperature, etc., which are recorded at most of the meteorological stations worldwide. Therefore, it was considered necessary to resort to luminous efficacy models, which enable the estimation of global, diffuse and direct illuminance outdoors from other measured or

calculated parameters.

The luminous efficacy of daylight is expressed as the ratio of illuminance (lx) to irradiance ( $\text{Wm}^{-2}$ ), which can be found through the integration of the whole spectrum [2]:

$$K = \frac{683 \times \int_{380}^{780} V(\lambda) \times E_e(\lambda) d\lambda}{\int E_e(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

where:

$\lambda$ : the wavelength of the incident radiation,

$V(\lambda)$ : the CIE spectral sensitivity of the human eye at wavelength  $\lambda$ ,

$E_e(\lambda)$ : the solar spectrum irradiance of radiation

$K_m$ : the constant of luminous efficacy for photopic vision, equal to 683 lm/W.

Consequently, the luminous efficacy of solar radiation can reach theoretically the value of 683 lm/W during the day. However, the solar radiation is not monochromatic, but consists of various wavelengths, resulting to lower luminous efficacy values. Specifically, if all the incident solar radiation were visible, its luminous efficacy would be less than 204 lm/W [3].

As beam radiation passes through the atmosphere, it encounters absorption and scattering processes, which cause attenuation and modifications of energy. Rayleigh scattering by air molecules depends on the wavelength and affects mostly the visible radiation. Furthermore, the dust and particulate matters suspended in the atmosphere reduce the direct radiation (Mie scattering). Both Rayleigh and Mie scattering are more prevalent at low solar altitudes. Attenuation of beam radiation is also affected by water vapour absorption, which is mainly confined to the infrared region of solar radiation. The overall effect of these mechanisms is the reduction of beam radiation reaching the earth and the decrease of its luminous efficacy [4].

Many researchers have utilized the physics of these processes in the development of luminous efficacy models. Navvab et al. developed a semi-empirical formula for a range of turbidities and produced a relationship for the estimation of direct luminous efficacy  $K_b$  through the use of an exponential term of solar altitude  $\gamma_s$  [5]:

$$K_b = 104.59 \times (1 - e^{-0.139 \gamma_s}) \quad (2)$$

Aydinli and Krochmann developed a polynomial relationship between direct luminous efficacy  $K_b$  and solar altitude  $\gamma_s$  [6]:

$$K_b = 17.72 + 4.4585 \times \gamma_s - 8.7563 \times 10^{-2} \times \gamma_s^2 + 7.3948 \times 10^{-4} \times \gamma_s^3 - 2.167 \times 10^{-6} \times \gamma_s^4 - 8.4132 \times 10^{-10} \times \gamma_s^5 \quad (3)$$

For Page the expression of direct luminous efficacy depends on solar altitude [7]:

$$\begin{aligned} K_b &= 62.134 - 0.75885 \times \gamma_s + 0.27749 \times \gamma_s^2 - 0.012108 \times \gamma_s^3 + \\ &\quad 2.052 \times 10^{-4} \times \gamma_s^4 - 1.22785 \times 10^{-6} \times \gamma_s^5 \quad \text{for } \gamma_s < 50^\circ, \\ K_b &= 103 + 0.2 \times (\gamma_s - 50) \quad \text{for } 50^\circ < \gamma_s < 60^\circ \quad (4) \\ K_b &= 105 \text{ lm/W} \quad \text{for } \gamma_s > 60^\circ \end{aligned}$$

Robledo et al. modeled mean hourly values of direct luminous efficacy for clear skies in Madrid using solar elevation as the only independent variable [8]:

$$K_b = 137.27 \times (\sin \gamma_s)^{0.268} \times e^{-0.0045 \gamma_s} \quad (5)$$

Furthermore, several authors often adopt a single value of direct luminous efficacy instead of the rather complex mathematical models presented above. An average value between 93 lm/W and 115 lm/W is quoted for direct luminous efficacy in the bibliography [4]. Practically, luminous efficacy can be estimated by calculating the quotient of measured direct illuminance and irradiance on a horizontal plane.

## 2. Estimation of daylight availability and direct luminous efficacy

### 2.1 Experimental data-methodology

As has already been mentioned, few meteorological stations worldwide record daylight parameters. The National Observatory of Athens (N.O.A.) is the only research establishment in Greece, which has a long and complete solar illuminance database. It is situated on the Hill of Nymphs within the urban area of Athens (latitude: 37.97°N, longitude: 23.72°E, altitude: 107m above mean sea level). The climate of Athens is Mediterranean, with hot summers and mild winters. The average temperature during the summer is 25.80°C and during the winter is 9.90°C [9]. N.O.A. is equipped with a first class meteorological station and a research class daylight station, which complies with CIE recommendations. The necessary shadow band corrections are made according to Littlefair.

For the study of direct luminous efficacy, N.O.A. has provided climatic data of 5 years (1996-2000). More specifically, 14603 hourly mean values of global and diffuse irradiance, global and diffuse illuminance, relative humidity, air temperature and atmospheric pressure were used for the analysis. All data were subjected to the quality control recommended by CIE (Table 1). After the quality control there were 13.275 “safe” data sets of irradiance and illuminance, 35% of which were observed under clear sky conditions. The frequency of overcast sky was found approximately equal to 18%, while the remaining referred to intermediate sky conditions.

| For irradiance:                                       | For illuminance:                                                                                                       | For intercomparisons between irradiance and illuminance components: |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $0 < I_g < 1.2 \times I_a$                            | $0 < E_g < 1.2 \times E_a$                                                                                             | $E_g / I_g = a_1 \mp b_1 (c_1)$                                     |
| $0 < I_d < 0.8 \times I_a$                            | $0 < E_d < 0.8 \times E_a$                                                                                             | $E_d / I_d = a_2 \mp b_2 (c_2)$                                     |
| $I_d < 1.1 \times I_g$                                | $E_d < 1.1 \times E_g$                                                                                                 | $E_h / I_h = a_3 \mp b_3 (c_3)$                                     |
| $I_g \geq 10 \text{ W/m}^2$                           | $E_g \geq 500 \text{ lx}$                                                                                              |                                                                     |
| <b>Test limits:</b>                                   |                                                                                                                        |                                                                     |
| <i>If <math>(90 - \gamma_s) &gt; 30^\circ</math>:</i> | $a_1 = 120 \text{ lm/W}, b_1 = 30 \text{ lm/W}, c_1 = 60 \text{ lm/W}$                                                 |                                                                     |
|                                                       | $a_2 = 140 \text{ lm/W}, b_2 = 40 \text{ lm/W}, c_2 = 60 \text{ lm/W}$                                                 |                                                                     |
|                                                       | $a_3 = 105 \text{ lm/W}, b_3 = 30 \text{ lm/W}, c_3 = 50 \text{ lm/W}$                                                 |                                                                     |
| <i>If <math>(90 - \gamma_s) &lt; 30^\circ</math>:</i> | $a_1 = 543 \times (90 - \gamma_s)^3 + 1639 \times (90 - \gamma_s)^2 - 1652 \times (90 - \gamma_s) + 661 [\text{lm/W}]$ |                                                                     |
|                                                       | $b_1 = 30 \text{ lm/W}, c_1 = 60 \text{ lm/W}$                                                                         |                                                                     |
| $I_g - I_d$ :                                         | Global - diffuse irradiance                                                                                            |                                                                     |
| $E_g - E_d$ :                                         | Global - diffuse illuminance                                                                                           |                                                                     |
| $I_a - E_a$ :                                         | Horizontal extraterrestrial irradiance - illuminance                                                                   |                                                                     |

**Table 1** The criteria for the quality control for irradiance and illuminance data according to CIE recommendations [10].

The availability of global, diffuse and direct illuminance was derived from the cumulative frequency of measured data and was studied on an annual basis, as well as under clear sky conditions.

In order to investigate the relationship between direct luminous efficacy and other parameters, the data was processed with the aid of the widely used computer program for statistical analysis SPSS, which is one of the most advanced tools for statistical analysis and includes all types of statistical techniques. Due to the need for simplicity, the analysis was carried out considering solar altitude  $\gamma_s$  as the only independent variable. The statistical evaluation of the proposed models was based on the calculation of the Correlation Coefficient (R) between the observed and the estimated values of direct luminous efficacy, which displays the level of confidence on the model's results. Furthermore, the accuracy of the proposed models in predicting direct illuminance was tested by means of the Mean Bias Error (M.B.E.) and Root Mean Square Error (R.M.S.E.). M.B.E. provides information whether the model has a tendency to underpredict or overpredict, while R.M.S.E. indicates the level of scatter that the model produces. These useful and commonly used indices are particularly important, as they highlight the reliability and the repeatability of the model [6]. Furthermore, the adequacy of the developed models was evaluated graphically by plotting the estimated values of direct illuminance, as well as the residuals, against the observed values of direct illuminance.

## 2.2 The availability of daylight in the region

In order to characterize the daylight climate of the region, daylight availability was studied. Figure 1 shows the probability to observe global, diffuse and direct daylight illuminance lower than a datum level on horizontal plane during the year. The x-axis refers to the illumination level intervals, while on y-axis the cumulative frequency of their occurrence is plotted.

According to the diagram, there is a probability of 22% to observe values of global illumination lower than 20 klx during the year. For the same level of illuminance, the probability for direct and diffuse daylight is equal to 46% and 60% respectively. In general, during the year global illuminance is distributed over a greater range and direct illuminance is higher than diffuse.

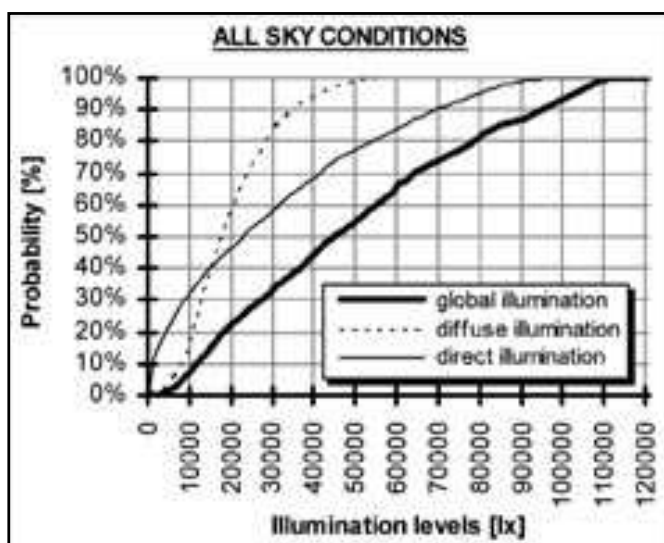
By comparing daylight availability in Athens with relevant data from other European cities [11] it is derived that there is a higher probability to observe high global illuminance values in Athens than at other northern cities. For example, a global illuminance lower than 20 klx is exceeded for only 50% at Aberporth, UK, compared with 22% at Athens. The higher daylight availability in Athens can be attributed to the limited appearance of overcast sky conditions in Athens compared to northern European regions and to the extended sunshine probability during the year.

Figure 2 indicates the availability of global, diffuse and direct illuminance under clear sky conditions. The curves for global and direct illuminance have narrower inclination than that of Figure 1, demonstrating that they

reach much higher levels under clear sky conditions. On the contrary, the range of diffuse illuminance is limited, since under clear skies the scattering of radiation is confined.

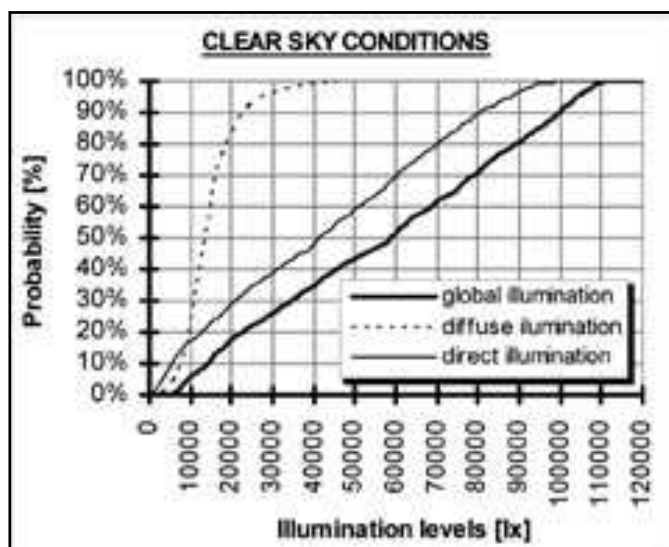
### 2.3 New models for direct luminous efficacy developed for Greek climatic data

The direct luminous efficacy was estimated from the safe data sets under clear sky conditions as the ratio of direct illuminance and direct irradiance. The histogram of Figure 3 indicates the cumulative frequency, while the descriptive statistics of the parameter are presented in Table 2.



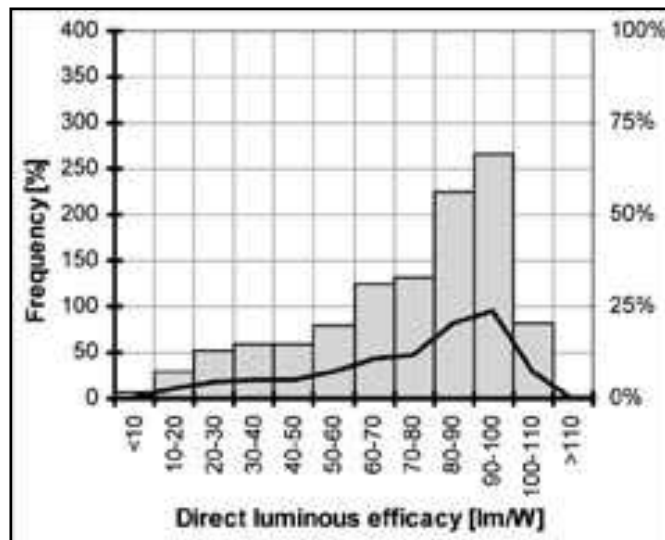
**Figure 1**

The probability to observe values of global, diffuse and direct illuminance lower than a datum level on a horizontal plane in Athens during the year (all sky conditions).



**Figure 2**

The probability to observe values of global, diffuse and direct illuminance lower than a datum level on a horizontal plane in Athens during the year under clear sky conditions.



**Figure 3** The histogram and the cumulative frequency of observed direct luminous efficacy under clear sky conditions

| Parameters                   | Values      |
|------------------------------|-------------|
| Sample                       | 1120.00     |
| Mean                         | 73.61 lm/W  |
| -standard error              | 0.72 lm/W   |
| Minimum                      | 2.25 lm/W   |
| Maximum                      | 134.92 lm/W |
| Mode                         | 81.00 lm/W  |
| Median                       | 36.00 lm/W  |
| Standard deviation           | 24.21 lm/W  |
| Variance                     | 586.28 lm/W |
| Skewness                     | -0.85 lm/W  |
| - standard error of skewness | 0.073 lm/W  |
| Kurtosis                     | -0.18 lm/W  |
| - standard error of kurtosis | 0.15 lm/W   |
| Range                        | 134.92 lm/W |

**Table 2** The descriptive statistics of direct luminous efficacy.

The range of direct luminous efficacy is wide and has a mean value equal to 73.6 lm/W. The mode value is higher than the mean, while more than 50% of the derived values range from 80 to 100 lm/W. Skewness and kurtosis are negative, indicating that there is a negative asymmetry.

The correlation of direct luminous efficacy  $K_b$  against solar altitude  $\gamma_s$  showed that there is a linear association between the two variables: The Pearson Correlation Coefficient was found equal to 0.837, indicating that the relationship between the two parameters is strong. Besides, the observed significance level of the correlation is equal to 0.000, leading thus to the rejection of the null hypothesis.

Figure 4 shows the variation of direct luminous efficacy with respect to solar altitude  $\gamma_s$ . It is obvious that there is a strong relationship between the two parameters, since luminous efficacy values are scattered very close to their trendline. Direct luminous efficacy seems to increase with solar elevation, till  $\gamma_s$  reaches 50°-60°, where a smooth maximum is obtained. Afterward, there is a slight decrease of  $K_b$  with increasing values of  $\gamma_s$ .

The rapid increase of direct luminous efficacy for solar elevation lower than 50° can be explained via Raleigh scattering of solar radiation by air molecules, which reduces the direct radiation in the visible range. The reduction is more important for low values of  $\gamma_s$ , because the relative optical air mass decreases as  $\gamma_s$  increases. Furthermore, scattering by aerosols (known as Mie scattering) has a similar, although smaller effect; direct luminous efficacy is reduced, as the amount of

aerosols in the atmosphere increases.

It is particularly interesting to study the decreasing tendency of the direct luminous efficacy observed at higher solar altitudes, which are obtained in Greece during summer months. The summer months in Athens are characterized by low wind speeds, high temperatures and high concentrations of ozone and ozone oxides in the atmosphere [12]. According to Mie's theory for the scattering of solar radiation by aerosols, the increase of the amount of particulates in the atmosphere attenuates the direct radiation in the visible spectrum. Therefore, the decrease of direct luminous efficacy at the highest solar elevations can be attributed to the effect of Mie scattering.

Using linear regression techniques the following luminous efficacy models have been derived:

$$K_b = 8.0967 + 3.05035 \times \gamma_s - 0.0261 \times \gamma_s^2 \quad (6)$$

$$K_b = -6.685478 + 4.7926 \times \gamma_s - 0.07942 \times \gamma_s^2 - 4.64 \times 10^{-5} \times \gamma_s^3 \quad (7)$$

Following the common approach for simplicity in calculation, an average value of direct luminous efficacy was also tested:

$$K_b = 73.614 \text{ lm/W} \quad (8)$$

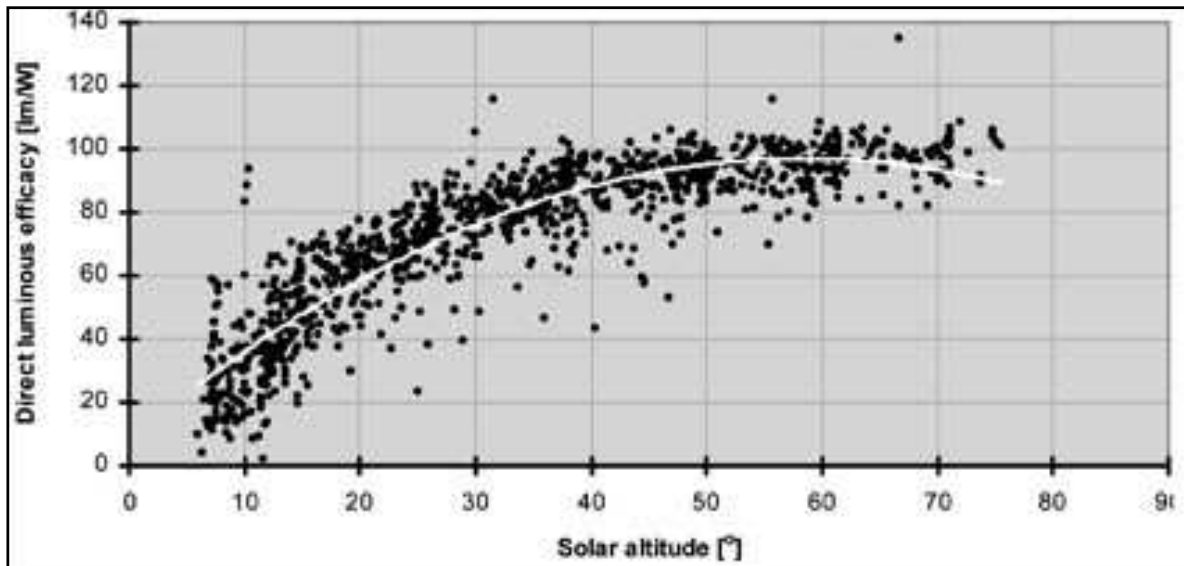
The regression analysis of the models proposed above is presented in table 3. Both polynomials appear to have good performance. The correlation coefficient is slightly higher for the trinomial equation (7) without affecting significantly the overall performance of the model. The

2<sup>nd</sup> degree polynomial (6) predicts safely the 81.33% of the population, while the 3<sup>rd</sup> degree model (7) explains 82.4% of the observed values, which practically accounts for only 12 values more than the former.

The statistical evaluation of the above proposed models indicated that model 6 slightly underestimates direct illuminance (MBE=-0.15%). On the contrary, direct

which has an inclination approximately equal to 45° (Figure 5a). The residuals are scattered uniformly around the X-axis of figure 5b, indicating the robustness and the adequacy of model 6.

The respective diagrams for model 7 (figures 6a, 6b) demonstrate that the trinomial model is also adequate, yet not so accurate as the binomial. On the other hand, model



**Figure 4** Direct luminous efficacy against solar altitude for clear sky conditions.

illuminance is overestimated by model (7) (MBE=4.55%) and significantly underpredicted by model 8 (MBE=-12.45%). Moreover, the best agreement between the estimated and the observed values of direct daylight illuminance was achieved by the use of model 6. RMSE for model 7 is slightly higher than that for model 6, but much lower than for model 8.

In Figures 5-7 the performance of the models 6, 7, 8 is presented. Specifically, in Figures 5a, 6a and 7a the estimated direct illuminance is plotted against the observed values, while in Figures 5b, 6b and 7b the distribution of the respective residuals is displayed. It is obvious that model 6 has the best performance: the estimated values of direct illumination scatter slightly around the trendline,

8 seems to perform inadequately, since the inclination of the trendline in figure 7a is much lower than 45° and the respective residuals do not fall in a horizontal band. The actual distribution of the residuals indicates the absence of an independent variable in the model [7].

Taking into account the overall statistical analysis, it is concluded that the proposed polynomial models perform reasonably well. Direct horizontal illuminance can be estimated more precisely when model 6 is used for the calculation of direct luminous efficacy. The use of a single, averaged value for direct luminous efficacy can lead to significant errors when user for the estimation of direct daylight illuminance under clear skies.

| Model         | Variables  | R       | R <sup>2</sup> | MBE     | RMSE    |
|---------------|------------|---------|----------------|---------|---------|
| 6 (binomial)  | $\gamma_s$ | 0,90182 | 0,8133         | -0,15 % | 10,97 % |
| 7 (trinomial) | $\gamma_s$ | 0,90779 | 0,8240         | 4,55 %  | 13,14 % |
| 8 (constant)  | -          | -       | -              | -12,45% | 27,22 % |

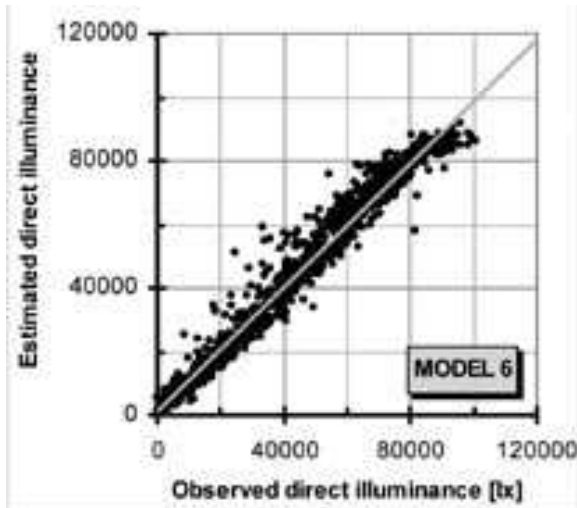
**Table 3** The statistical evaluation of the proposed models against observed illuminance data.

## 2.4 New model's performance compared to other existing models

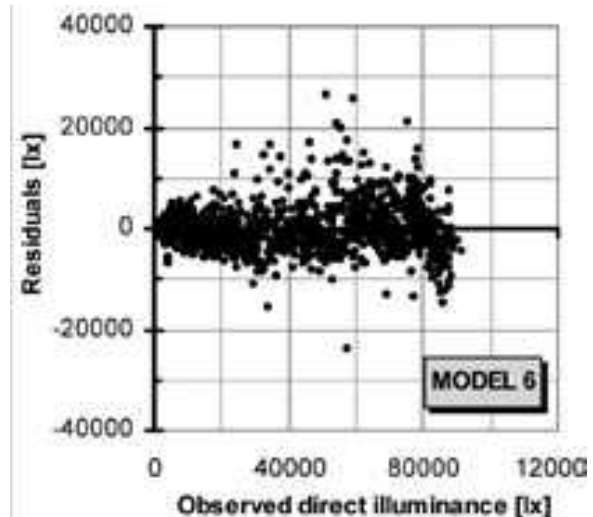
As mentioned earlier, several models have been developed for the estimation of direct luminous efficacy, which are used widely in the research community, as well as in computer programs. However, these models are based on data of Northern Europe or America, regions with climatic characteristics much different than the

Mediterranean. Therefore, it was considered necessary to examine if these models are site-dependent, as well as to estimate their accuracy when applied in Greek climatic data.

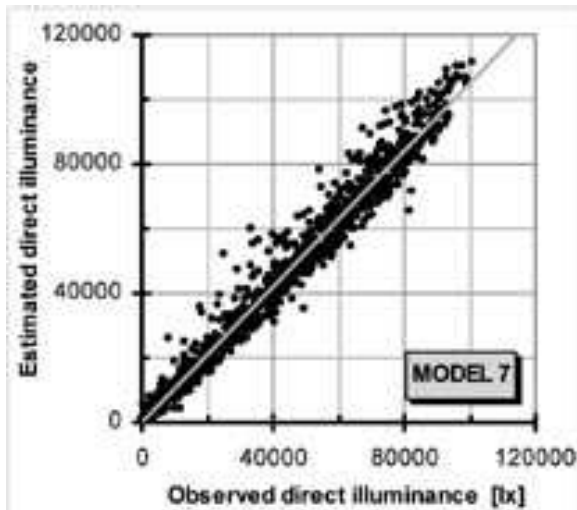
More specifically, the accuracy in the prediction of direct illuminance with the luminous efficacy models



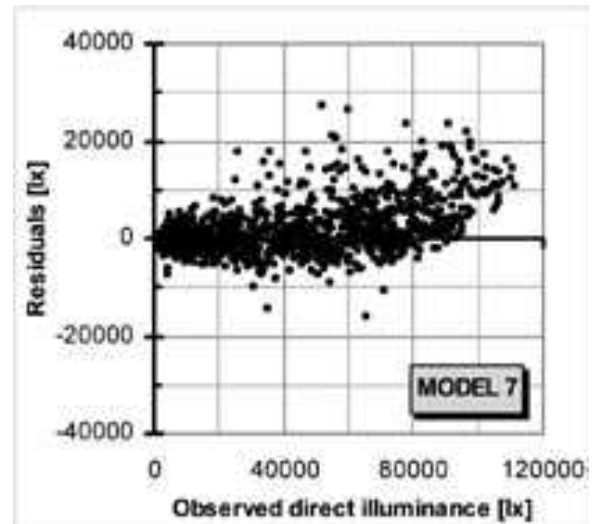
**Figure 5a** Graphical display of direct illuminance estimated with model 6 plotted against measured direct illuminance



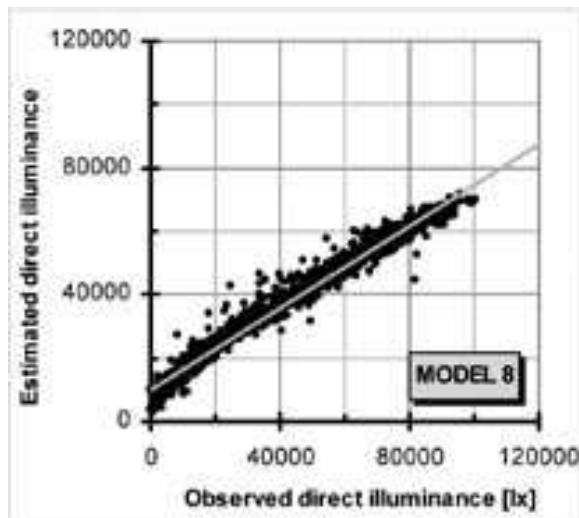
**Figure 5b** Graphical display of residuals from model 6 plotted against measured direct illuminance.



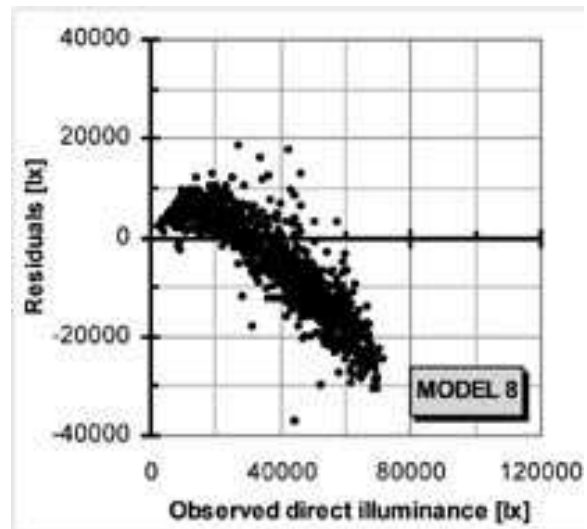
**Figure 6a** Graphical display of direct illuminance estimated with model 7 plotted against measured direct illuminance.



**Figure 6b** Graphical display of residuals from model 7 plotted against measured direct illuminance.



**Figure 7a** Graphical display of direct illuminance estimated with model 8 plotted against measured direct illuminance.

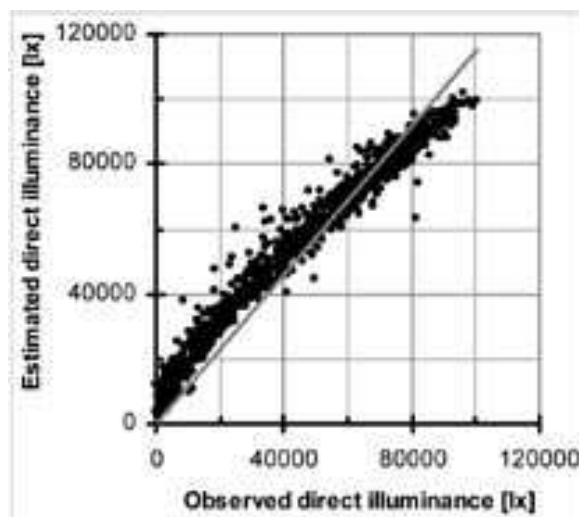


**Figure 7b** Graphical display of residuals from model 8 plotted against measured direct illuminance.

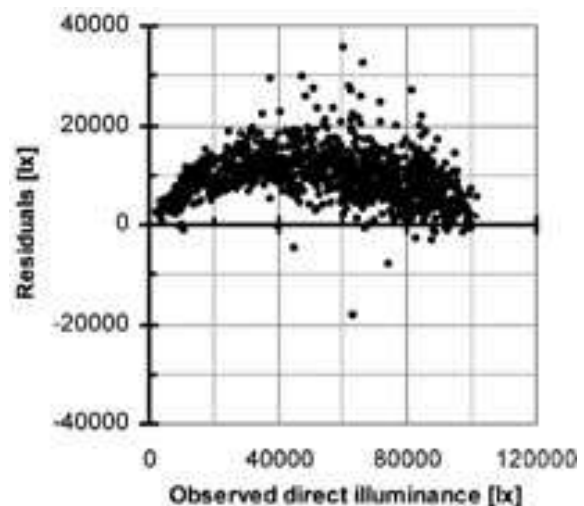
developed by Navvab, Aydinli & Krochmann, Page, Robledo (presented in the Introduction) is examined and compared with the new luminous efficacy model mentioned earlier. The study was carried out using the data recorded by the National Observatory of Athens for the years 1996-2000 and referred to clear sky conditions. The statistical analysis is based on the estimation of Mean Bias Error (M.B.E.) and Root Mean Square Error (RMSE) (Table 4). The adequacy and the overall performance of the models are also examined by displaying graphically the distribution of the estimated direct illuminance, as well as the relevant residuals, against the measured values

(Figures 8-11).

The minimum values of MBE and RMSE are provided by the model of Aydinli & Krochmann (eq. 3), demonstrating that among the other existing models it fits better to the real conditions. Furthermore, the estimated values have limited dispersion around their trendline (Figure 9a), while the residuals do not follow any particular distribution (Figure 9b). However, the residuals are not uniformly scattered around X-axis, indicating that the use of Aydinli & Krochmann's model results in calculating higher values than the measured one's.

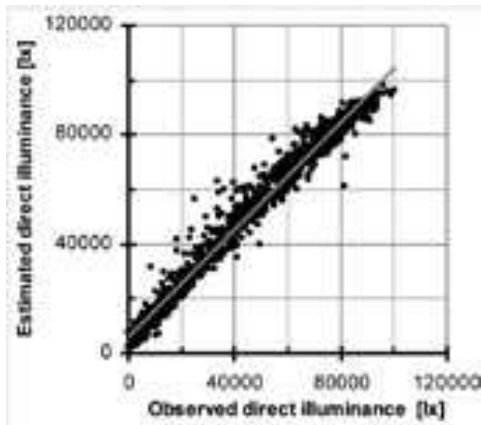


**Figure 8a** Direct illuminance estimated with Navvab's model plotted against measured direct illuminance under clear sky conditions.

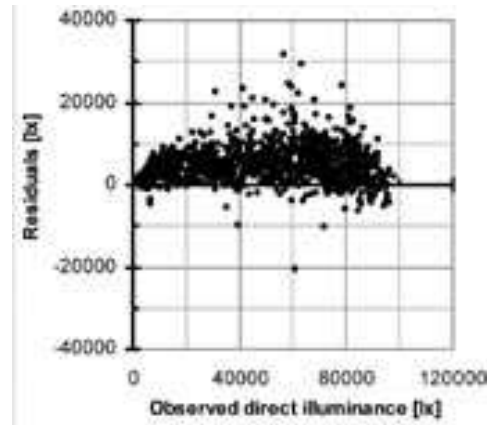


**Figure 8b** Graphical display of residuals from Navvab's model plotted against measured direct illuminance.

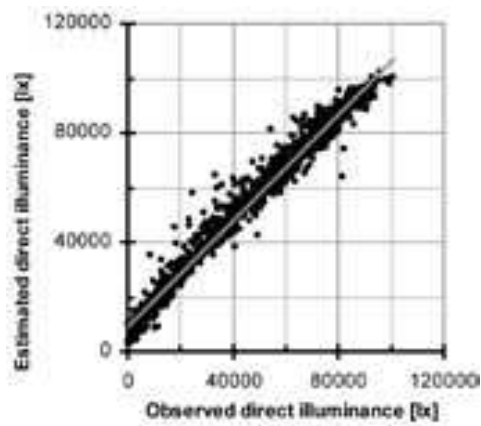




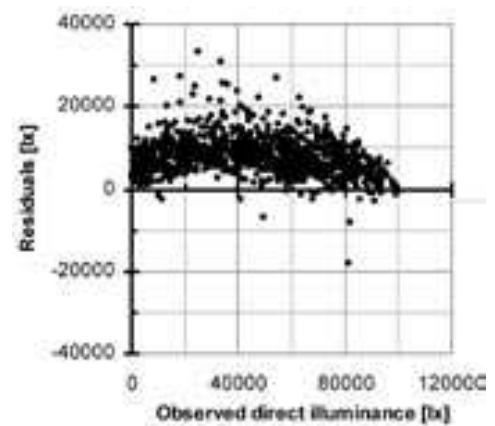
**Figure 9a** Direct illuminance estimated with Aydinli & Krochmann's model plotted against measured direct illuminance clear sky conditions.



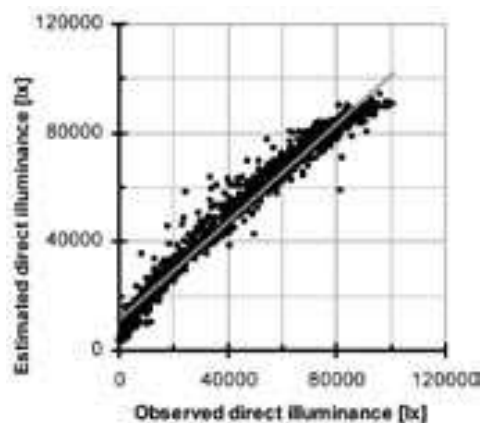
**Figure 9b** Graphical display of residuals from Aydinli & Krochmann's model plotted against measured direct illuminance.



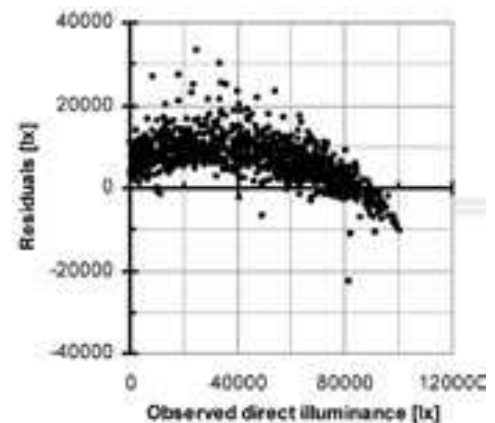
**Figure 10a** Direct illuminance estimated with Page's model plotted against measured direct illuminance under clear sky conditions.



**Figure 10b-** Graphical display of residuals from Page's model plotted against measured direct illuminance.



**Figure 11a** Direct illuminance estimated with Robledo's model plotted against measured direct illuminance under clear sky conditions.



**Figure 11b** Graphical display of residuals from Robledo model plotted against measured direct illuminance.

The respective diagrams for the other 3 luminous efficacy models show the weakness of their performance; their residuals seem to follow a non-random distribution (Figures 8a, 10a, 11a) and the inclination of the trendline of estimated values is not close to 45° (Figures 8b, 10b, 11b).

The comparison of the statistical performance of the above models with the respective analysis for the proposed luminous efficacy model demonstrates the superiority of the latter under the specific conditions. MBE as well as RMSE values are much lower than the respective values of the other models.

Figure 12 represents the direct luminous efficacy estimated with all models examined above against solar altitude. It is obvious that only the new suggested model, as well as Aydinli & Krochmann's model approach satisfactorily the direct illuminance in Athens under clear sky conditions. Particularly, the model of Aydinli and Krochmann follows the distribution of the observed luminous efficacy values, presenting though a shift of about 20 lm/W upwards. The other models fail to imprint

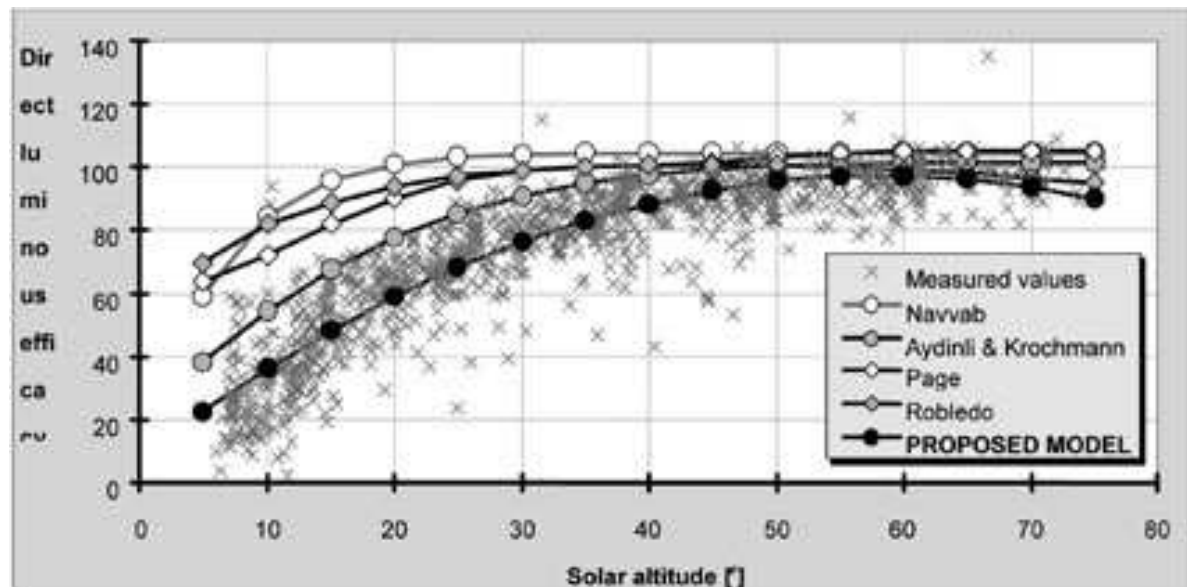
accurately the examined parameter.

More specifically:

- For solar elevation lower than 45°, luminous efficacy values derived from the models of Navvab, Page and Robledo are relatively higher compared to the observed one's. Also the above models do not imprint the intense growth rate of direct luminous efficacy, which is observed at these solar altitudes.
- The models of Aydinli and Krochmann, Navvab and Page do not follow the slightly decreasing trend of direct luminous efficacy for solar altitude angles greater than 70°. Nevertheless, it worth noticing that these models were based on meteorological data of Poland, USA and England, where solar elevation does not reach so high values.
- The deviation between the luminous efficacy estimated with the existing models and the observed values is reduced at solar altitudes between 45-70 degrees; however the existing models still provide higher values than the observed.

| Model                 | Equation No | Variable                     | MBE            | RMSE           |
|-----------------------|-------------|------------------------------|----------------|----------------|
| Navvab                | 2           | $\gamma_s$                   | 22,55%         | 25,27%         |
| Aydinli & Krochmann   | 3           | $\gamma_s$                   | 11,32 %        | 15,50%         |
| Page                  | 4           | $\gamma_s$                   | 18,15 %        | 20,99 %        |
| Robledo               | 5           | $\gamma_s$                   | 16,46 %        | 20,63 %        |
| <b>proposed model</b> | <b>6</b>    | <b><math>\gamma_s</math></b> | <b>-0,15 %</b> | <b>10,97 %</b> |

**Table 4** The statistical performance of various direct luminous efficacy models for clear sky conditions.



**Figure 12** The direct luminous efficacy values, which were observed in Athens during 1996-2000 under clear sky conditions and which were estimated using the existing models of Navvab, Aydinli & Krochmann, Page, Robledo, as well as the new proposed model for direct luminous efficacy developed by the author.

### 3. Conclusions

From all the above it can be concluded that direct luminous efficacy under clear sky conditions depends on the climate of the region and the position of the sun in the sky vault. With the help of statistical and graphical analysis it has been proved that the existing models cannot describe precisely direct luminous efficacy in Greece. Therefore, a new model suitable for Greek climatic data was developed, which performs reasonably well and provides very good accuracy for the estimation of direct illuminance levels under clear sky conditions.

This model, combined with the analysis of daylight availability, can be an important tool for engineers and designers in order to accomplish wider use of daylight in buildings, leading thus to reduced energy consumption and better indoor conditions.

### 4. References

- [1]: IEA, "Daylight in buildings: a source book on daylight systems and components", report of IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29, July 2000.
- [2]: CIE, International Lighting Vocabulary, Paris, 1970.
- [3]: Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems, Thermal use of Solar Energy in Buildings, Freiburg, Germany, 1994.
- [4]: Littlefair Paul J., "The luminous efficacy of daylight: a review", Lighting Research and Technology, Vol. 17, issue 4, pp. 162-182, 1985.
- [5]: Navvab M., Karayel M., Ne'eman E., Selkowitz S., "Luminous efficacy of daylight", Proc. CIBSE Natural Lighting Conference, pp. 409-420, 1988.
- [6]: T. Muneer, "Luminous efficacy: Evaluation of models for the United Kingdom", Lighting Research and Technology, Vol. 27, Issue 2, pp. 71-77, 1995.
- [7]: Muneer T., Tregenza P., Kambezidis H., Solar radiation and Daylight Models for the energy efficient design of buildings, 1997.
- [8]: Robledo L., Soler A., "Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies", Energy, Vol. 25, pp. 689-701, 2000.
- [9]: Kambezidis H., Muneer T., Tzortzis M., Arvanitaki S., "Global and diffuse horizontal illuminance: month-hour distribution for Athens, Greece in 1992", Lighting Research and Technology, Vol. 30, issue 2, pp. 69-74, 1998.
- [10]: CIE Technical report, "Guide to recommended practice of daylight measurement", 1994.
- [11]: Commission of the European Communities, DG XII for Science, Research and Development,

"Daylighting in Architecture, a European reference book", James & James, London 1993.

- [12]: Website of the Hellenic Ministry for the Environment, Physical Planning and Public Works: [www.minenv.gr](http://www.minenv.gr).

#### TSIKALOUDAKI Katerina



Laboratory of Building  
Construction and Physics,  
Faculty of Civil Engineering,  
Aristotle University of  
Thessaloniki.  
P.O. Box 429, 541 24  
Thessaloniki, Greece.

Tel: 0030 2310 832402.

Fax: 0030 2310 995603.

e-mail: [katgt@civil.auth.gr](mailto:katgt@civil.auth.gr)

Graduated from the Department of Civil Engineering of the Aristotle University of Thessaloniki in 1997 and obtained PhD from the same institution in 2003. Her research interests focus on the area of bioclimatic architecture and in particular on the indoor comfort, the estimation of daylight levels in the exterior and the interior environment of the buildings as well as the evaluation of daylight strategies.

#### ARAVANTINOS Dimitris

Laboratory of Building Construction and Physics,  
Faculty of Civil Engineering,  
Aristotle University of Thessaloniki.  
P.O. Box 429, 541 24 Thessaloniki, Greece

Tel: 0030 2310 995794

Fax: 0030 2310 995603

e-mail: [katgt@civil.auth.gr](mailto:katgt@civil.auth.gr)

Civil engineer (1982), PhD (1988), Associate professor (2003) with the Faculty of Civil Engineering of the Aristotle University of Thessaloniki. His research interests include energy efficient design, thermal and hydro- insulation of constructions and particularly the confrontation of humidity problems established in historic buildings and monuments. He has participated in 12 National and European research projects.

Received 1 February 2004

Reviewers Dr. David CARTER, Prof. Liisa HALONEN,  
Prof. Koichi IKEDA

## Disponibilitatea de lumină naturală și iluminare directă în condiții de cer senin în Grecia

*Timp de secole, arhitectura și iluminatul natural au fost inseparabile, deoarece lumina naturală era singura sursă eficientă și disponibilă de lumină. După Revoluția industrială, utilizarea pe scară largă a luminii artificiale a eliberat proiectanții de constrângerile din trecut. În prezent, într-o lume preocupată, mai nou, de emisiile de carbon, încălzire globală și proiectare durabilă, utilizarea luminii naturale în interiorul clădirilor a devenit o strategie importantă de îmbunătățire a randamentului energetic prin reducerea sarcinilor de iluminat, încălzire și răcire. Cu toate acestea, integrarea strategiilor comune sau avansate de iluminat natural în fiecare fază a proiectării construcției necesită informații referitoare la regimul de iluminare al regiunii și respectiv la nivelul de iluminare exterioră.*

*Acest articol se concentrează asupra disponibilității luminii naturale, precum și asupra dezvoltării modelului de eficiență luminoasă pentru prognozarea nivelurilor de iluminare directă în condiții de cer senin în Grecia. Studiul acestor chestiuni a fost considerat necesar datorită faptului că datele referitoare la iluminatul natural sunt greu de găsit în Grecia. În plus, modelele existente de eficiență luminoasă nu au reușit să reproducă condițiile reale, datorită faptului că au fost dezvoltate pe baza unor date provenind din Europa de Nord sau America, regiuni în care clima este mult diferită față de cea a Greciei. Studiul s-a bazat pe măsurările de iradiere și iluminare efectuate de Observatorul Național din Atena între 1996-2000. Datele au fost testate în conformitate cu recomandările C.I.E. și au fost prelucrate cu ajutorul programului de statistică SPSS. Pe baza datelor disponibile, a fost calculată disponibilitatea anuală a luminii naturale, precum și cea în condiții de cer senin. Modelele propuse de eficiență luminoasă au fost dezvoltate prin analiza, corelarea și regresia liniară a datelor colectate și au fost validate numeric și grafic. Precizia acestora în estimarea iluminării directe a fost comparată cu cea obținută de alte modele de eficiență luminoasă existente; rezultatele au arătat faptul că cele dintâi s-au comportat mai bine în caracteristicile specifice de climă.*

### 1. Introducere

Înțelegerea climatului de lumină naturală specific pentru o anumită zonă este esențială pentru arhitectura locală, conservarea energiei și politicile de mediu în general. De fapt, cunoașterea disponibilității de lumină naturală poate fi un instrument util pentru ingineri, la alegerea strategiilor optime de iluminat natural aplicate unei clădiri, pentru a obține utilizarea maximă a luminii naturale cu un consum minim de energie pentru iluminat, răcire și încălzire. Disponibilitatea luminii naturale depinde de coordonatele geografice ale amplasamentului și de caracteristicile climatice ale regiunii [1]; împreună cu condițiile din jurul clădirii, cum ar fi orientarea acesteia și prezența obstacolelor, determină condițiile de operare pentru fațada clădirii.

Mai mult, într-un climat însorit, cunoașterea iluminării exterioare directe este esențială pentru estimarea nivelului de lumină naturală în interior. Cu toate că lumina naturală directă este rareori luată în considerare pentru calculul iluminatului natural interior, ea afectează indirect componentele reflectate ale factorului de lumină naturală. În cazul particular al condițiilor de cer senin, lumina

naturală interioară și exterioară reflectată contribuie la determinarea nivelurilor finale de iluminare pe planul de referință. În plus, în țările mediteraneene, unde condițiile de cer senin sunt dominante, cunoașterea iluminării directe are un rol major în estimarea orbirii.

Disponibilitatea de lumină naturală este obținută în general din datele de măsurare a iluminării. Cu toate acestea, în Grecia, precum și în restul lumii, se remarcă o lipsă a datelor referitoare la lumina naturală. Pe de altă parte, există o multitudine de alți parametri meteorologici, cum ar fi iradierea, temperatura aerului, temperatura uscată și umedă, care sunt înregistrate în majoritatea stațiilor meteorologice din lume. În consecință, s-a considerat necesar să se recurgă la modele de eficiență luminoasă, care permit estimarea iluminării globale, difuze și directe în exterior, pe baza altor parametri măsurați sau calculați.

Eficiența luminoasă a luminii naturale este exprimată ca un raport între iluminare ( $lx$ ) și iradiere ( $Wm^{-2}$ ), care poate fi găsit prin integrarea întregului spectru [2] (rel. 1)

În consecință, eficiența luminoasă a radiației solare poate atinge teoretic valoarea de  $683 \text{ lm/W}$  pe timpul zilei. Cu toate acestea, radiația solară nu este monocromă,

ci este formată din diverse lungimi de undă, determinând valori mai scăzute pentru eficiența luminoasă. Mai exact, dacă toată radiația solară incidentă ar fi vizibilă, eficiența sa luminoasă ar fi mai mică de 204 lm/W [3].

Fasciculul de radiație, la trecerea sa prin atmosferă, suferă procese de absorbție și disipare, care determină atenuarea și modificarea energiei. Disiparea Rayleigh în moleculele de aer depinde de lungimea de undă și afectează cel mai mult radiația vizibilă. În plus, praful și particulele în suspensie din atmosferă reduc radiația directă (disipare Mie). Atât disiparea Rayleigh cât și Mie sunt mai accentuate la altitudini solare reduse. Atenuarea fasciculului de radiație este, de asemenea, afectată de absorbția vaporilor de apă, care este limitată în principal la regiunea infraroșie a radiației solare. Efectul general al acestor mecanisme este de reducere a radiației care ajunge la sol și de scădere a eficienței luminoase [4].

Mulți cercetători au utilizat mecanismele acestor procese în dezvoltarea modelelor de eficiență luminoasă. Navvab et al. au dezvoltat o formulă semi-empirică pentru o gamă de turbidități și au determinat o relație pentru estimarea eficienței luminoase directe  $K_b$  prin utilizarea unui termen exponențial al altitudinii solare  $\gamma_s$  [5] (rel. 2)

Aydinli și Krochmann au dezvoltat o relație polinomială între eficiența luminoasă directă  $K_b$  și altitudinea solară  $\gamma_s$  [6] (rel. 3)

Pentru Page, expresia eficienței luminoase directe depinde de altitudinea solară [7] (rel. 4).

Robledo et al. au modelat valorile medii orare ale eficienței luminoase directe pentru cer senin în Madrid utilizând elevația solară ca singura variabilă independentă [8] (rel. 5)

În plus, unii autori adoptă adesea o singură valoare pentru eficiența luminoasă directă, în locul modelelor matematice complexe prezentate mai sus. Valoarea medie menționată în bibliografie pentru eficiența luminoasă directă este între 93 lm/W și 115 lm/W [4]. Din punct de vedere practic, eficiența luminoasă poate fi estimată prin calcularea coeficientului iluminării directe măsurate și al iradierii pe un plan orizontal.

## **2. Estimarea disponibilității de lumină naturală și a eficienței luminoase directe**

### **2.1 Date experimentale – metodologie**

După cum s-a menționat anterior, doar câteva stații meteorologice din lume înregistrează parametri ai luminii naturale. Observatorul Național din Atena (N.O.A.) este

singura instituție de cercetare din Grecia care are o bază de date completă, pentru o perioadă îndelungată, referitoare la iluminarea solară. Observatorul este situat pe Dealul Nimfelor, din zona urbană a Atenei (latitudine: 37,97°N, longitudine: 23,72°E, altitudine: 107 m deasupra nivelului mediu al mării). Clima Atenei este mediteraneană, cu veri calde și ierni blânde. Temperatura medie în timpul verii este de 25,80°C și pe timpul iernii de 9,90°C [9]. N.O.A. este echipat cu o stație meteorologică de primă clasă și cu o stație de cercetare a luminii naturale, conformă cu recomandările CIE Corecțiile necesare ale benzii de umbră sunt realizate după Littlefair.

Pentru studierea eficienței luminoase directe, N.O.A. a furnizat date climaterice pentru cinci ani (1996-2000). Mai exact, pentru analiză au fost utilizate 14.603 valori orare medii pentru radianța globală și difuză, iluminarea globală și difuză, umiditatea relativă, temperatura aerului și presiunea atmosferică. Toate datele au fost supuse controlului calității recomandat de CIE (Tabel 1). După controlul de calitate s-au păstrat 13.275 seturi de date “sigure” pentru iradiere și iluminare, din care 35% au fost măsurate în condiții de cer senin. Frecvența situațiilor de cer acoperit a fost determinată la aproximativ 18%, iar restul datelor se referă la situații intermediare.

Disponibilitatea luminanței globale, difuze și directe a fost calculată din frecvența cumulată a datelor măsurate, și s-a studiat pentru perioade anuale, respectiv pentru condiții de cer senin.

Pentru a investiga relația dintre eficiența luminoasă directă și alți parametri, datele au fost prelucrate cu ajutorul cunoscutului program de statistică SPSS, care este unul din cele mai avansate instrumente de analiză statistică și care include toate tipurile de tehnici statistice. Din nevoia de simplitate, analiza s-a realizat considerând altitudinea solară  $\gamma_s$  ca singura variabilă independentă. Evaluarea statistică a modelelor propuse s-a bazat pe calcularea Coeficientului de corelare ( $R$ ) între datele măsurate și cele estimate pentru eficiența luminoasă directă, care arată nivelul de confidență pentru rezultatele modelului. În plus, precizia modelelor propuse în prognozarea luminanței directe a fost testată cu ajutorul erorii de abatere medie (MBE) al erorii pătratice medii (RSME). MBE arată dacă modelul are tendința de a subestima sau supraestima, în timp ce RMSE indică nivelul de dispersie pe care îl produce modelul. Acești indici obișnuiți și utili sunt importanți deoarece arată viabilitatea și repetabilitatea modelului [6]. În plus, acuratețea modelelor dezvoltate a fost evaluată grafic prin

reprezentarea valorilor estimate pentru iluminarea directă și respectiv a valorilor reziduale, în comparație cu valorile observate ale iluminării directe. (Tabel 1)

## 2.2 Disponibilitatea luminii naturale în regiune

Pentru a caracteriza climatul luminii naturale în regiune, s-a studiat disponibilitatea luminii naturale. Figura 1 arată probabilitatea de a măsura o iluminare globală, difuză și directă a luminii naturale mai redusă decât nivelul de date pe un plan orizontal pe parcursul anului. Axa abscisă indică intervalele de iluminare, în timp ce pe axa ordonată sunt reprezentate frecvențele cumulate ale apariției lor.

Conform diagramei, există o probabilitate de 22% de a măsura valori ale iluminării globale sub 20 klx pe parcursul anului. Pentru același nivel de iluminare, probabilitatea pentru lumină naturală directă și difuză este egală cu 46% și respectiv 60%. În general, pe parcursul anului, iluminarea globală este distribuită pe un interval mai larg, iar iluminarea directă este mai mare decât cea difuză.

Prin compararea disponibilității de lumină naturală în Atena cu date relevante din alte orașe europene [11] s-a remarcat că există o mai mare probabilitate de a înregistra valori ridicate ale iluminării globale în Atena decât în alte orașe nordice. De exemplu, o iluminare globală mai scăzută de 20 klx are o probabilitate de 50% în Aberporth, UK, în comparație cu 22% în Atena. Disponibilitatea mai mare a luminii naturale în Atena poate fi explicată prin frecvența redusă a condițiilor de cer acoperit în Atena, în comparație cu regiunile Europei de Nord și, respectiv, prin probabilitatea ridicată de cer senin pe parcursul anului.

Figura 2 arată disponibilitatea iluminării globale, difuze și directe în condiții de cer senin. Curbele pentru iluminarea globală și directă au o înclinație mai mare decât în Figura 1, demonstrând faptul că se ating niveluri mult mai ridicate în condiții de cer senin. Pe de altă parte, domeniul iluminării difuze este limitat, deoarece în condiții de cer senin disiparea radiației este limitată.

## 2.3 Modele noi pentru eficiența luminoasă directă dezvoltate pentru datele climatice ale Greciei

Eficiența luminoasă directă a fost estimată pe baza seturilor de date sigure pentru cer senin, ca fiind raportul dintre iluminarea directă și radianța directă. Histograma din Figura 3 arată frecvența cumulată, în timp ce valorile statistice descriptive ale parametrului sunt prezentate în Tabelul 2.

Domeniul eficienței luminoase directe este larg și are o valoare medie egală cu 73,6 lm/W. Valoarea în modul este mai ridicată decât valoarea medie, iar mai mult de 50% din valorile derivate variază între 80 și 100 lm/W. Valorile pentru asimetrie și curbura sunt negative, arătând o asimetrie negativă.

Corelarea eficienței luminoase directe  $K_b$  cu altitudinea solară  $\gamma_s$  a arătat existența unei dependențe liniare între cele două variabile: coeficientul de corelație Pearson a fost calculat la 0,837, indicând o relație strânsă între cei doi parametri. Pe de altă parte, nivelul măsurat de semnificație al corelației este 0,000, determinând respingerea ipotezei nule.

Figura 4 arată variația eficienței luminoase directe în funcție de altitudinea solară  $\gamma_s$ . Este evident faptul că există o relație strânsă între cei doi parametri, deoarece valorile pentru eficiența luminoasă sunt grupate foarte strâns în jurul liniei de regresie. Eficiența luminoasă directă pare să crească odată cu elevația solară, până când  $\gamma_s$  atinge 50°-60°, valoare la care se obține un maxim fin. După aceasta, apare o scădere ușoară a  $K_b$  cu creșterea valorilor lui  $\gamma_s$ .

Creșterea rapidă a eficienței luminoase directe pentru elevație solară mai mică de 50° poate fi explicată prin dispersia Raleigh a radiației solare în molecule de aer, care reduce radiația directă în spectrul vizibil. Reducerea este mai semnificativă pentru valori scăzute ale  $\gamma_s$ , deoarece masa optică relativă a aerului scade odată cu creșterea lui  $\gamma_s$ . În plus, dispersia în aerosoli (cunoscută ca dispersie Mie) are un efect similar, dar mai redus; eficiența luminoasă directă este redusă odată cu creșterea cantității de aerosoli din atmosferă.

Este în mod special interesant de studiat tendința descrescătoare a eficienței luminoase directe observată la altitudini solare ridicate, care sunt atinse în Grecia în lunile de vară. Lunile de vară în Atena sunt caracterizate prin viteza scăzută a vântului, temperaturi ridicate și concentrații ridicate de ozon și oxizi ai ozonului în atmosferă [12]. Conform teoriei lui Mie referitoare la dispersia radiației solare în aerosoli, creșterea cantității de particule în atmosferă atenuază radiația directă în spectrul vizibil. În consecință, scăderea eficienței luminoase directe la elevații solare maxime poate fi atribuită efectului de dispersie Mie.

Cu ajutorul tehnicilor de regresie liniară s-au obținut următoarele modele de eficiență luminoasă (rel. 6, 7).

Urmând abordarea comună de simplitate a calculului, s-a testat și o valoare medie a eficienței luminoase directe

(rel. 8).

Analiza de regresie a modelelor propuse mai sus este prezentată în Tabelul 3. Ambele curbe polinomiale au o comportare bună. Coeficientul de corelare este puțin mai ridicat pentru ecuația trinomială (7) fără a afecta semnificativ comportarea generală a modelului. Curba polinomială de gradul 2 (6) prognozează cu siguranță 81,33% din populație, în timp ce modelul de grad 3 (7) explică 82,4% din valorile observate, ceea ce înseamnă, practic, mai mult cu numai 12 valori decât cel anterior.

Evaluarea statistică a modelelor propuse mai sus arată faptul că modelul 6 subestimează ușor iluminarea directă ( $MBE=-0,15\%$ ). Pe de altă parte, iluminarea directă este supraestimată de modelul 7 ( $MBE=4,55\%$ ) și în mod semnificativ subestimată de modelul 8 ( $MBE=-12,45\%$ ). În plus, cea mai bună concordanță între valorile estimate și cele măsurate pentru iluminarea directă a luminii naturale a fost obținută cu ajutorul modelului 6. RMSE pentru modelul 7 este puțin mai mare decât pentru modelul 6, dar mult mai scăzută decât pentru modelul 8.

În Figurile 5-7 este prezentată performanța modelelor 6, 7, 8. În Figurile 5a, 6a și 7a este reprezentată iluminarea directă estimată în comparație cu valorile observate, iar în Figurile 5b, 6b și 7b este prezentată distribuția valorilor reziduale. Este evident faptul că modelul 6 are cea mai bună performanță: valorile estimate ale iluminării directe se distribuie în jurul liniei de regresie, care are o înclinație de aproximativ  $45^\circ$  (Figura 5a). Valorile reziduale sunt distribuite uniform în jurul axei abscisă a Figurii 5b, arătând robustețea și acuratețea modelului 6.

Diagramele pentru modelul 7 (Figurile 6a, 6b) demonstrează faptul că modelul trinomial este de asemenea potrivit, deși nu este atât de exact ca cel binomial. Pe de altă parte, modelul 8 pare să evolueze inadecvat, deoarece înclinarea dreptei de regresie din Figura 7a este mult mai mică de  $45^\circ$  iar valorile reziduale nu se distribuie într-o bandă orizontală. Distribuția valorilor reziduale indică absența unei variabile independente în model [7].

Având în vedere analiza statistică generală, se poate concluziona că modelele polinomiale propuse au performanțe rezonabil de bune. Iluminarea directă orizontală poate fi estimată mai exact atunci când se utilizează modelul 6 pentru calcularea eficienței luminoase directe. Utilizarea unei singure valori medii pentru eficiența luminoasă directă poate conduce la erori majore, dacă se utilizează la estimarea luminanței naturale directe în condiții de cer senin. (Tabel 3)

## 2.4 Performanțele modelului nou în comparație cu alte modele existente

După cum s-a menționat anterior, au fost dezvoltate mai multe modele pentru estimarea eficienței luminoase directe, care sunt utilizate pe scară largă în comunitatea științifică, precum și în programe de calculator. Totuși, aceste modele se bazează pe date din Europa sau America de Nord, regiuni cu caracteristici climatice mult diferite de cele mediteraneene. De aceea, s-a considerat necesară să se examineze dacă aceste modele depind de locație, precum și să se estimeze precizia lor aplicându-le pe date climatice din Grecia.

Mai exact, precizia de prognozare a luminanței directe cu modelele de eficiență luminoasă dezvoltate de Navvab, Aydinli & Krochmann, Page, Robledo (prezentate în Introducere) este examinată și comparată cu noul model de eficiență luminoasă menționat anterior. Studiul a fost realizat cu ajutorul datelor înregistrate de Observatorul Național din Atena pentru anii 1996-2000 și s-a referit la condiții de cer senin. Analiza statistică se bazează pe estimarea erorii de abatere medie (MBE) și a erorii pătratice medii (RMSE) (Tabel 4). Precizia și performanțele generale ale modelelor sunt, de asemenea, examinate prin reprezentarea grafică a distribuției luminanței directe estimate și, respectiv, a valorilor reziduale relevante, în comparație cu valorile măsurate (Figurile 8-11).

Valorile minime pentru MBE și RMSE sunt furnizate de modelul lui Aydinli & Krochmann (ec. 3), demonstrând că dintre celelalte modele existente se potrivește cel mai bine cu condițiile reale. În plus, valorile estimate au o dispersie limitată în jurul dreptei de regresie (Figura 9a), în timp ce valorile reziduale nu urmează vreo anumită distribuție (Figura 9b). totuși, valorile reziduale nu sunt uniform distribuite în jurul axei abscisă, arătând faptul că prin utilizarea modelului lui Aydinli & Krochmann se obțin valori mai mari decât cele măsurate.

Diagramele pentru celelalte 3 modele de eficiență luminoasă arată punctele lor slabe; valorile lor reziduale par să urmeze o distribuție nealeatoare (Figurile 8a, 10a, 11a) iar înclinația dreptei de regresie a valorilor estimate nu se apropie de  $45^\circ$  (Figurile 8b, 10b, 11b).

Compararea performanțelor statistice ale modelelor de mai sus cu analiza modelului propus pentru eficiența luminoasă demonstrează superioritatea acestuia din urmă în condiții specifice. Valorile MBE și RMSE sunt mult mai scăzute decât valorile obținute de celelalte modele.

Figura 12 reprezintă eficiența luminoasă directă

estimată cu toate modelele examinate, în funcție de altitudinea solară. Este evident faptul că numai modelul propus, precum și modelul Aydinli & Krochmann estimează în mod satisfăcător iluminarea directă în Atena în condiții de cer senin. În special, modelul lui Aydinli și Krochmann urmărește distribuția valorilor măsurate ale eficienței luminoase, având totuși o deplasare de circa 20 lm/W în sus. Celelalte modele nu reușesc să urmărească exact parametrul examinat.

Mai exact:

- Pentru elevație solară sub 45°, valorile eficienței luminoase obținute din modelele lui Navvab, Page și Robledo sunt relativ mai mari decât cele măsurate. De asemenea, aceste modele nu prezintă rata de creștere intensă a eficienței luminoase directe, care este observată la aceste altitudini solare.
- Modelele lui Aydinli și Krochmann, Navvab și Page nu urmăresc tendința ușor descrescătoare a eficienței luminoase directe pentru altitudinea solară mai mare de 70°. Cu toate acestea, trebuie menționat faptul că aceste modele s-au bazat pe date meteorologice din Polonia, SUA și Anglia, unde elevația solară nu atinge valori atât de mari.

- Deviația dintre eficiența luminoasă estimată cu modelele existente și valorile observate este redusă la altitudini solare între 45-70 grade; totuși, modelele existente furnizează valori mai mari decât cele observate.

### 3. Concluzii

Din cele enumerate mai sus se poate concluziona faptul că eficiența luminoasă directă în condiții de cer senin depinde de clima regiunii și de poziția soarelui pe boltă. Cu ajutorul analizei statistice și grafice s-a dovedit faptul că modelele existente nu pot descrie cu acuratețe eficiența luminoasă directă din Grecia. În consecință, s-a dezvoltat un nou model adaptat datelor climaterice din Grecia, care are performanțe rezonabile și care oferă o precizie foarte bună pentru estimarea nivelurilor de iluminare directă în condiții de cer senin.

Acest model, combinat cu analiza disponibilității de lumină naturală, poate fi un instrument important pentru ingineri și proiectanți, cu scopul de a utiliza mai mult lumina naturală în clădiri, conducând astfel la un consum energetic redus și condiții interioare mai bune.