

Analiza rozkładów luminancji wybranych nieboskłonów

Streszczenie. Wykorzystanie światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń przyczynia się do ograniczenia energochłonności instalacji oświetleniowej. Analizę światła dziennego wewnątrz budynków opisują raporty CIE. W artykule zaprezentowano informacje o godzinowym rozkładzie natężenia oświetlenia światłem dziennym, dla trzech różnych typów nieboskłonów dla rzeczywistego budynku użyteczności publicznej zlokalizowanego w Białymstoku. Wykonano zdjęcia rzeczywistych nieboskłonów, które przekształcono do formatu obrazu HDR. Na ich podstawie określono luminancję poszczególnych fragmentów sfery niebieskiej. Uzyskane na podstawie zdjęć HDR wyniki rozkładów luminancji nieboskłonów rzeczywistych porównano z modelami nieboskłonów CIE.

Abstract. The use of daylight in rooms contributes to reducing the energy consumption of the lighting system. The analysis of daylight inside buildings described reports CIE. The article presents information on the hourly distribution of the intensity of daylight, for three different types of sky for real public building located in Białystok. Taken pictures of real sky which was converted to the format of HDR. On their basis the luminance of individual fragments of the celestial sphere. The obtained from HDR images results of real sky luminance distributions were compared with CIE sky models. **Analysis of luminance distributions of selected skylights**

Słowa kluczowe: oświetlenie wnętrz, światło dzienne, modele nieboskłonów CIE, technologia obrazu HDR,

Keywords: interior lighting, daylight, sky CIE models, HDR imaging technology,

Wstęp

Wpływ światła słonecznego na oświetlenie pomieszczeń w ciągu dnia, jest nie tylko ważne ze względu na komfort pracy wewnątrz budynku, ale też ze względu na odpowiednie zaprojektowanie pomieszczeń. Dotychczas obliczenia dotyczące luminancji i natężenia oświetlenia w danej lokalizacji określano głównie na podstawie nieba o całkowitym zachmurzeniu. Takie podejście jest niemiernodajne, ponieważ nie bierze pod uwagę warunków pośrednich jak np. różne stopnie zachmurzenia. Według obliczeń opartych jedynie na najgorszym scenariuszu, uwzględniającym całkowicie zachmurzony nieboskłon, wynikiem jest konieczność wyliczenia oświetlenie uzupełniającego (sztucznego), które w rzeczywistych warunkach może być pominięte. Efektem jest oszczędność energii użytej do oświetlenia w warunkach rzeczywistych, gdy światło sztuczne nie jest wymagane.

Miarą określającą oświetlenie pomieszczenia jest natężenie oświetlenia. Natężenie oświetlenia w głównej mierze zależy od ruchu Słońca w ciągu dnia oraz przepuszczalności i grubości warstwy chmur [3, 9, 12], ale też zależy od szeregu czynników geometryczno-architektonicznych związanych z budynkiem i pomieszczeniem. W niniejszej pracy zainteresowano się problemem wpływu zmienności warunków atmosferycznych na projektowanie oświetlenia wewnątrz światłem dziennym. Określono wycinek nieboskłonu oświetlający powierzchnię roboczą badanego pomieszczenia, wykorzystując modele matematyczne opracowane przez CIE (obliczenia analityczne), jak również rzeczywisty fragment nieboskłonu na podstawie analizy obrazowej HDR. Na podstawie zdjęć dokonano segmentacji nieboskłonu na podobszary o uśrednionej wartości luminancji na podstawie podziału Tregenza [5].

Obliczanie parametrów oświetlenia zewnętrznego

Analizę światła dziennego oparto na wykorzystaniu charakterystycznych standardowych modeli nieboskłonów, które mogą realizować oświetlenie dzienne, opisane w raporcie CIE [1]. W celu standaryzacji, w ostatniej dekadzie CIE opracowało 15 typów nieboskłonów o szerokim zakresie zjawisk atmosferycznych, a tym samym rozkładów luminancji. Określenie rozkładu natężenia oświetlenia światłem dziennym na dowolnej płaszczyźnie roboczej jest realizowane przede wszystkim przy wykorzystaniu metod numerycznych. Opracowane

modele nieboskłonów, z określonymi dla nich rozkładami luminancji w zenicie nieboskłonu L_{VZ} , odwzorowują stan nieba dla poszczególnych stopni zachmurzenia i dyfuzji cząstek w atmosferze. Wyznaczone dla nich zależności analityczne, umożliwiają obliczenie natężenia oświetlenia w zależności od zachmurzenia nieba, miesiąca, dnia i godziny, bez prowadzenia pomiarów terenowych. Opis ten umożliwia jeszcze efektywniejsze modelowanie i analizowanie zdolności do konwersji fotowoltaicznej lub fototermicznej promieniowania słonecznego, w określonym czasie, miejscu i przy zmiennych warunkach pogodowych.

Natężenie promieniowania światła słonecznego zależy w głównej mierze od warunków atmosferycznych. W pracy wzięto pod uwagę trzy modele nieboskłonów CIE opisujące największe różnice oddziaływań atmosferycznych: model nieboskłonu 1 - całkowite zachmurzenie nieboskłonu; 10 - częściowe zachmurzenie nieboskłonu, bez udziału słońca oraz model 12 - o nieboskłonie całkowicie bez zachmurzenia.

W celu dokładnego określenia udziału promieniowania słonecznego w postaci natężenia oświetlenia zastosowano procedurę obliczeniową opracowaną przez CIE [1]. Początkowo określa się współrzędne geograficzne oraz strefę czasową badanego miejsca. Kolejnym krokiem jest ustalenie położenia Słońca na nieboskłonie w danym dniu i o konkretnej godzinie. W tym celu należy obliczyć kolejny dzień w roku n oraz kąt deklinacji słonecznej poprzez średnią dziennego odchylenia wewnątrz pomieszczenia δ zależną od danego dnia roku według zależności [11]:

$$(1) \quad \delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right)$$

Obliczenie średniego czasu słonecznego τ_{sr} wymaga określenia poprawki czasu [1]:

$$(2) \quad \tau_{sr} = 0,17 \sin\left[4\pi \frac{(n-80)}{373}\right] - 0,129 \sin\left[2\pi \frac{(n-8)}{355}\right]$$

Prawdziwy czas słoneczny τ_{ps} jest obliczany w odstępach półgodzinnych według wzoru [1]:

$$(3) \quad \tau_{ps} = \tau_L + (\lambda_{T0} - \lambda_s) / 15 + \tau_{sr}$$

gdzie: τ_L - czas strefowy określony przez południk standardowy λ_{T0}

Luminancję dowolnego elementu danego nieboskłonu w konkretnym dniu, dla określonego miejsca (szerokość geograficzna ϕ i długość geograficzna λ_s), określa kąt horyzontalny γ_s położenia środka tarczy słonecznej na nieboskłonie, obliczany zależnością [1]:

$$(4) \quad \sin \gamma_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

Natężenia oświetlenia E_{VO} na powierzchni Ziemi dla danego nieboskłonu, w wybranym dniu roku wylicza się z relacji [1]:

$$(5) \quad E_{VO} = 133,8 \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{2\pi}{365} (n - 2) \right) \right]$$

zaś natężenie oświetlenia na powierzchni poziomej E_{Voh} w terenie otwartym w danym dniu wyznacza się ze wzoru [1]:

$$(6) \quad E_{Voh} = E_{VO} \cdot \delta \cdot \sin \gamma_s$$

W celu oszacowania światła wpadającego przez otwór okienny na powierzchnię roboczą korzysta się z założeń opracowanych przez Tregenza i Sharples w 1993 roku [3]. Po ustaleniu orientacji pokoju oraz położenia okna, wyznacza się kąt horyzontalny i kąt azymutalny środka tarczy słonecznej. Na podstawie analizy luminancji punktów krytycznych otworu okiennego określa się luminancję wycinka nieboskłonu oświetlającego dane pomieszczenie.

Następnie na podstawie zależności pomiędzy luminancją nieboskłonu w punkcie obliczeniowym L_{vz} podzieloną przez poziome natężenia oświetlenia E_{vd} światła dziennego dobiera się model nieboskłonu:

$$(7) \quad E_{vd} = \frac{1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\sin \gamma_s}\right)}{1 + a \cdot \exp(b)}$$

gdzie: a , b – charakterystyczne współczynniki dla danego modelu nieboskłonu opracowanego przez CIE.

Luminancję Słońca w zenicie oblicza się w tym przypadku z zależności [1]:

$$(8) \quad L_{vz} = B \frac{E_{vd}}{E_{Voh}} \cdot \sin \gamma_s$$

gdzie: B – charakterystyczny współczynnik dla danego modelu nieboskłonu w tabeli C.1. raportu CIE,

Proces obliczeniowy powtarza się, dążąc do określenia luminancji danego nieboskłonu widzianego przez otwór okienny, przy czym należy wyznaczyć graniczne kąty horyzontalne: położenia tarczy słonecznej na nieboskłonie, kątów γ_1 i γ_2 charakteryzujących rozmiar i położenie okna względem punktu obliczeniowego A. Na podstawie powyższych zależności (wzory 7 i 8) oblicza się luminancję nieboskłonu L_a , przy określonym azymucie.

Wykonano obliczenia według procedury opisanej w raporcie CIE [1] oraz przeprowadzono symulacje komputerowe w programie DIALux dla dnia (tabela 1) uwzględniając typowe i najczęściej występujące modele nieboskłonów: 1 - o niebie całkowicie zachmurzonym, 10 – o niebie częściowo zachmurzonym, bez udziału słońca, 12 – o niebie przejrzystym (bez zachmurzenia), w dniu 23 lipca przed południem słonecznym o godzinie 11:00 i po południu o godzinie 13:00 dla pomieszczenia o wymiarach: 3,27 m x 3,04 m x 2,77 m i otworze okiennym od strony południowej o wielkości: 1,74 x 1,45 i wysokości parapetu na 0,87 m od podłogi.

Najniższe wartości natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej osiągnięto uwzględniając model nieboskłonu 1 o niebie całkowicie zachmurzonym. Wartości uzyskane dla godziny 11:00 i 13:00 są porównywalne dla tego typu nieboskłonu. Największe wartości natężenia uzyskano dla nieboskłonu 12 w obydwu godzinach.

Natężenie oświetlenia na powierzchni roboczej w pomieszczeniu wzrosło o godzinie 13:00 w przypadkach nieboskłonu 10 oraz 1 ponad pięciokrotnie.

Tabela 1. Obliczone wartości maksymalne i minimalne natężenia oświetlenia na powierzchnię roboczą badanego pomieszczenia dla trzech rodzajów nieboskłonów według CIE

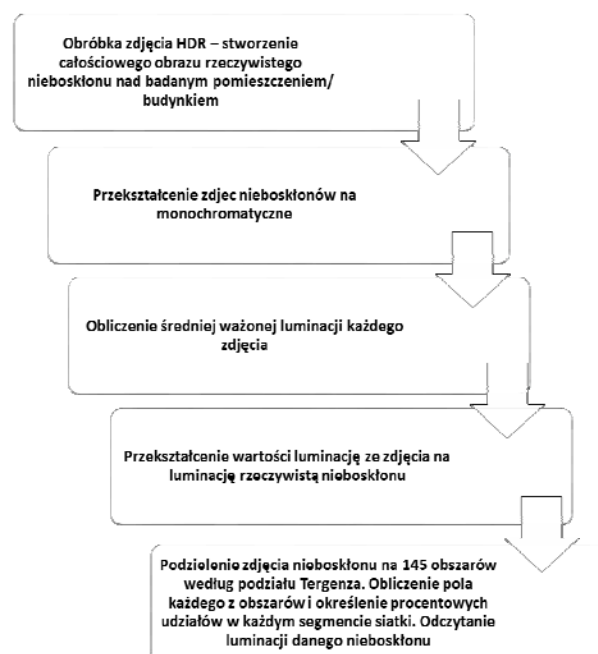
godzina		Model Nieboskłonu		
		1	10	12
11:00	natężenie oświetlenia E_p [lx]			
	max	117	479	572
	min	4	10	8
13:00	max	124	604	664
	min	5	37	8

Określenie luminancji nieboskłonu na podstawie zdjęć HDR

Każdy model nieboskłonu CIE określony jest na podstawie charakterystycznego rozkładu luminancji. Wychodząc z tego założenia i wykorzystując odwrotną procedurę działań można ustalić konkretny model nieboskłonu opracowany przez CIE, realizowany w warunkach rzeczywistych.

W zaprezentowanych badaniach wykorzystano zdjęcia nieboskłonów wykonane obiektywem rybie oko i na ich podstawie dokonano pomiarów luminancji według procedury:

1. Przygotowanie badanego terenu do wykonania zdjęcia, ustalenie współrzędnych XYZ;
2. Ustawienie i wypoziomowanie platformy (aparatu fotograficznego) według ustalanych współrzędnych XYZ;
3. Wykonanie fotografii HDR;
4. Pomiary terenowe i kalibracja w terenie;
5. Obróbka danych z kalibrowanych obrazów HDR: korekta zniekształceń obiektywu, transformacja i kalibracja obrazów oraz korekta danych synchronicznych do dalszej obróbki.

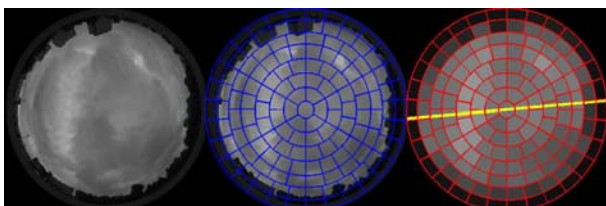


Rys. 1. Algorytm postępowania w odczytywaniu luminancji rzeczywistego nieboskłonu z opracowanych zdjęć HDR

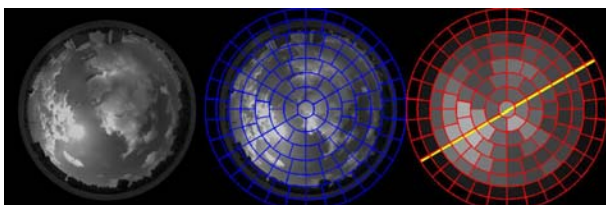
Kolejnym krokiem była obróbka uzyskanych obrazów rzeczywistych nieboskłonów. W tym celu Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa (CIE) proponuje podział sfery niebieskiej według Tregenza [3]. Dzieli on półsferyczny

nieboskłon na 8 pierścieni oraz 145 równych segmentów (rys. 1). Uzyskuje się w ten sposób równy podział obszarów nieboskłonu wynoszących około 0,2 radianów (11,5°). Na rysunku 1 zaprezentowano opracowany algorytm postępowania w przypadku obróbki zdjęć HDR według podziału Tregenza [6].

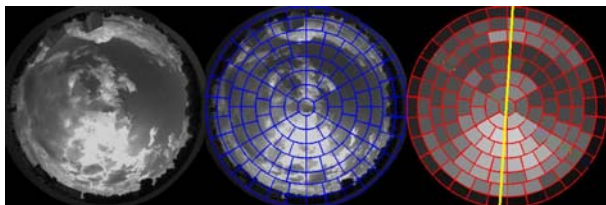
Rzeczywiste zdjęcia nieboskłonu wykonano w terenie otwartym, za pomocą obiektywu „rybie oko” dnia 23 lipca 2016 w Białymstoku (szerokość geograficzna 53°07'59"N oraz długości geograficznej 23°09'51"E). Po uzyskaniu zdjęć w formacie LDR przekształcono je do formatu HDR i narzucono siatkę podziału według Tregenza. Kolejne segmenty ponumerowano na każdym pierścieniu zgodnie z ruchem wskazówek zegara, zaczynając od wycinka znajdującego się centralnie na kierunku północnym.



Rys. 2. Przekształcenie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 9:00 na obszary według podziału Tregenza 23 lipca 2016



Rys. 3. Przekształcenie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 11:00 na obszary według podziału Tregenza 23 lipca 2016



Rys. 4. Przekształcenie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 13:00 na obszary według podziału Tregenza 23 lipca 2016

Przekształcono zdjęcia na monochromatyczne, dokonano obliczeń średniej ważonej luminancji każdego z podzielonych fragmentów nieboskłonów za pomocą procentowego udziału poszczególnych wartości luminancji. Obliczono powierzchnie danych obszarów i policzono procentowe udziały poszczególnych wartości luminancji w każdym segmencie siatki. Za pomocą średniej ważonej uzyskano uśrednione wartości luminancji dla poszczególnych segmentów w postaci palety szarości o skoku 1500 cd/m² (rys. 2), przy czym żółta linia na rysunkach od 3 do 5 informuje o płaszczyźnie przekroju nieboskłonu, w której analizowano rozkład luminancji, zaś kąt α na wykresach (rys. 6, 8 i 10) jest przybliżeniem opisu kąta azymutalnego, przy czym wartość 90° odnosi się do godziny górowania Słońca.

O godzinie 9.00 23 lipca 2016 występowało bardzo duże zachmurzenie, zaś wartości luminancji uzyskane dla tego nieboskłonu są niskie. Zauważalna jest zmiana typu nieboskłonu o godzinie 13:00, gdzie przez chmury widać tarczę Słońca. Luminancja nieboskłonu o godzinie 13:00 osiąga swoje najwyższe wartości w obszarze tarczy słonecznej i w bliskiej jej okolicy oraz w tle nieba. O

godzinie 11:00 słońce było umiejscowione za chmurami. Luminancja nieboskłonu o godzinie 11:00 jest znacznie mniejsza niż nieboskłonu zachmurzonego o godzinie 13:00, co potwierdza jak bardzo zmiany atmosferyczne, w tym przypadku zachmurzenie i widoczność tarczy Słońca na nieboskłonie, wpływają na luminancję nieboskłonu, a tym samym na poziom natężenia oświetlenia na analizowanej powierzchni.

Następnie dokonano bardziej szczegółowych badań uzyskanych nieboskłonów (rys. od 6 do 8). Odczytano wartości luminancji i sporządzono wykresy rozkładu luminancji w płaszczyźnie przechodzącej przez zenit i środek tarczy słonecznej w analizowanym czasie.



Rys. 5. Opracowane zdjęcie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 9:00 23 lipca 2016



Rys. 6. Wykres luminancji nieboskłonu o godzinie 9:00



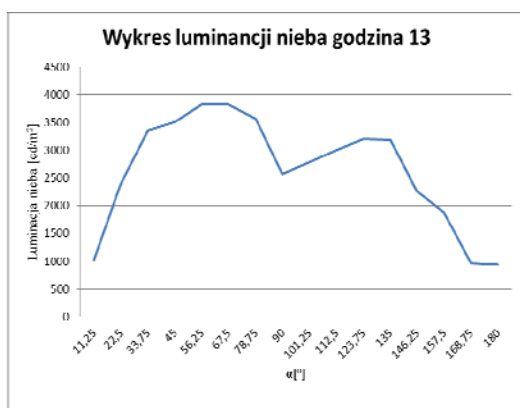
Rys. 7. Opracowane zdjęcie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 11:00 23 lipca 2016



Rys. 8. Wykres luminancji nieboskłonu o godzinie 11:00



Rys. 9. Opracowane zdjęcie rzeczywistego nieboskłonu nad badanym pomieszczeniem o godzinie 13:00 23 lipca 2016



Rys. 10. Wykres luminancji nieboskłonu o godzinie 13:00

Wykres przedstawiający zmianę luminancji (rys. 7) pokazuje ekstremum w okolicach zenitu, po czym stopniowo maleje, podobnie jak luminancja modelu 1 według CIE. Lokalne wzrosty luminancji o godzinie 9:00 świadczą o prześwitach tarczy słonecznej przez zachmurzony nieboskłon.

W przypadku godziny 11.00, warunki atmosferyczne uległy polepszeniu, co skutkowało jedynie częściowym zachmurzeniem, a w prześwicie widać tarczę Słońca (rys. 7). Poziom luminancji (rys. 8) w tym przypadku osiąga wyższe wartości w okolicach położenia tarczy słonecznej i dość gwałtownie spada od strony wschodniej, a łagodna zmiana luminancji występuje na zachód od tarczy słonecznej.

O godzinie 13.00 zauważyć można, iż oddziaływanie światła słonecznego wprowadza nieznacznie wyższy poziom luminancji w okolicach tarczy słonecznej, niż o godzinie 11.00 (rys. 9). Ze względu na niewielkie zachmurzenie, luminancja w tym przypadku rozkłada się bardziej równomiernie (rys. 10). Najniższe wartości nie są w tym przypadku zerowe osiągają poziom około 1000 cd/m^2 . Kształt rozkładu luminancji nieboskłonu popołudniowego jest wynikiem superpozycji dwóch typów nieboskłónów, rozproszonego (rys. 6) oraz przedstawionego na rysunku 8 (częściowo zachmurzony z widoczną tarczą słoneczną).

Przedstawione analizy rozkładów luminancji pozwalają przypuszczać, że możliwe jest analizowanie obrazu nieba w czasie rzeczywistym i natychmiastowe określenie typu nieboskłónu wg CIE. Dodatkowe uzbrojenie mechanizmu obliczeniowego o wiedzę z zakresu ruchu tarczy słonecznej po sferze niebieskiej może stanowić doskonały model obliczeniowy rozkładu światła od rzeczywistego nieboskłónu. Sprzężenie takiego mechanizmu kalkulacyjnego z systemem sterowania opraw skutkować może poprawą efektywności gospodarowania energią na cele oświetleniowe.

Wnioski

W prowadzonych badaniach dokonano analizy luminancji nieboskłónów zarejestrowanych kamerą i poddanych obróbce HDR. Badania posłużyły do oceny typu nieba sklasyfikowanego według CIE. Badania terenowe, poprzez określenie rozkładu luminancji nieboskłónu, mogą wskazać metody sterowania oświetleniem sztucznym, przy udziale światła naturalnego. Zarejestrowane przebiegi są zbliżone z wybranymi układami modelowymi nieba dziennego. Ekstrema luminancji występują w miejscach wynikających z lokalizacji tarczy słonecznej na sferze niebieskiej, a w sytuacji całkowitego zachmurzenia wykazano monotoniczny przebieg średniej wartości luminancji nieboskłónu w szerokim zakresie kąta obserwacji (minima w na granicy obrazu). Należy przypuszczać, że opracowany algorytm analizy obrazu nieba może posłużyć jako pakiet danych wejściowych w systemach sterowania oświetleniem, bazujących na modelach predykcyjnych z uwzględnieniem prognozy pogody, zawierającej informację o grubości i rodzaju chmur, rodzaju i czasu opadów oraz czasu wschodów i zachodów Słońca.

Dalsze badania rzeczywistych obrazów nieboskłónów mogą pozwolić na zautomatyzowanie procesu wyznaczania współczynnika światła dziennego i wpływać na energochłonność instalacji oświetleniowych we wnętrzach.

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Zarządzania Produkcją na Wydziale Zarządzania Politechniki Białostockiej, w ramach pracy statutowej S/WZ/1/2015 oraz w ramach pracy własnej MB/WE/3/2017 na Wydziale Elektrycznym".

Autorzy: mgr inż. Ewa Piotrowska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, E-mail: e.piotrowska@onet.pl
dr hab. inż. Maciej Zajkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, tel.: , E-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] CIE Standard General Sky Guide: Technical Report, (2015).
- [2] Darula S., Kittler R., *CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions*, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences
- [3] Darula S., Kittler R., *Guidelines for more realistic daylight exterior conditions in energy conscious designs*, Bratislava, Athens 2000
- [4] Gryaditskaya Y., Pouli T., Reinhard E., Seidel H. P., *Sky Based Light Metering for High Dynamic Range Images* Pacific Graphics 2014 Volume 33 Number 7
- [5] Heim D., Szczepańska E., *Luminacja Świetlna Nieboskłónu – Dyskretyzacja przestrzenna dla potrzeb energetycznych obliczeń Budynków*, Budownictwo Czasopismo Techniczne, 2-B/2012 zeszyt 3, rok 109.
- [6] Hongyi C., Linjie L., *Measuring Light and Geometry Data of Roadway Environments with a Camera*, Journal of Transportation Technologies, 2014, 4, 44-62
- [7] Jacobs A., *Glare Measurement with HDR Photography*, 11th International Radiance Workshop, Copenhagen, September 2012
- [8] Kroelinger M., *Light from a Changing Source: Climate and Daylight*, DSC 558: Spring 2011
- [9] Kittler Richard, Darula Stanislav: *The simultaneous occurrence and relationship of sunlight and skylight under ISO/CIE standard sky types*, Lighting Research and Technology, June 2014
- [10] Mardaljevic J., *Daylight Simulation*, Chapter 6, str. 341-390
- [11] Pluta Z., *Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, (2000).
- [12] Piotrowska E., *Modelowanie Natężenia Oświetlenia Dziennego w programie Dialux*, Electrical Engineering 2016
- [13] Szczepańska- Rosiak E., *Metoda oceny oświetlenia wnętrzem światłem dziennym w warunkach nieboskłónu zachmurzonego*, Łódź 2013