

Magdalena SIELACHOWSKA*, Maciej ZAJKOWSKI*

SZACOWANIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM OD OBIEKTÓW SPORTOWYCH ZA POMOCĄ OPROGRAMOWANIA SYMULACYJNEGO DIALUX

W niniejszym artykule przedstawione zostały możliwości analizy poziomu zanieczyszczenia nieboskłonu nocnego światłem sztucznym, pochodzącym z obiektów sportowych, takich jak stadiony, czy boiska piłkarskie. Za pomocą oprogramowania symulacyjnego DIALux stworzono model komputerowy Stadionu Miejskiego, znajdującego się w Białymstoku oraz wykonano symulacje i obliczenia, na podstawie których określono ilość strumienia świetlnego, wydobywającego się poza obszar badanego obiektu. Pomiarzy przeprowadzono dla różnych wysokości chmur, uwzględniając odpowiedni współczynnik odbicia światła. Jednocześnie oznaczono poziom natężenia oświetlenia na powierzchni dróg, biegnących obok Stadionu Miejskiego oraz przeanalizowano możliwości wykorzystania światła pochodzącego z obiektu sportowego, w celu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego w okolicy badanego budynku.

SŁOWA KLUCZOWE: zanieczyszczenie światłem, natężenie oświetlenia, efektywność energetyczna, oświetlenie dróg.

1. PROBLEMATYKA

W ostatnich latach, coraz większą uwagę przykładą się do ekologii. Ochrona środowiska naturalnego, odnawialne źródła energii, zanieczyszczenie światłem to topowe tematy, które budzą duże zainteresowanie społeczeństwa.

Problematyka zanieczyszczenia nieba nocnego światłem sztucznym związana jest z nadmierną transmisją światła do atmosfery i dotyczy przede wszystkim obszarów o dużej gęstości zaludnienia. Szybko rozwijające się miejscowości, przodują w rankingach miejsc o wysokim zanieczyszczeniu świetlnym, przede wszystkim ze względu na coroczny wzrost poziomu luminancji otoczenia, spowodowany przez nadmierne rozświetlenie powierzchni użytkowych, reklamowych oraz silną iluminację budynków.

Obiektami, które emitują dużą ilość strumienia świetlnego do otoczenia, czym przyczyniają się do zanieczyszczenia światłem, są różnego rodzaju budynki sportowe, takie jak stadiony miejskie, boiska piłkarskie, czy korty tenisowe.

* Politechnika Białostocka

Niekontrolowany rozsył światła emitowany przez tego typu obiekty jest niestety nieunikniony. Imprezy sportowe, koncerty, festiwale, odbywające się na stadionach piłkarskich, wymagają odpowiedniego rozświetlenia. Organizowane są zwykle w późnych godzinach wieczornych, co zmusza do dodatkowego oświetlenia parkingów i terenów przyległych w celu zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu uczestnikom danego wydarzenia.

W przypadku obiektów sportowych nadmierna emisja strumienia świetlnego do atmosfery związana jest nie tylko z zewnętrzną iluminacją budynku, ale również z oświetleniem wewnątrz obiektu. Strumień świetlny padający na różne powierzchnie znajdujące się wewnątrz budynku odbija się i rozprasza w różnych kierunkach, co w dużej mierze przyczynia się do zanieczyszczenia nocnego nieba. Ilość światła, jaka wydostaje się z danego obiektu, zależy przede wszystkim od wartości współczynnika odbicia powierzchni wewnątrz, które zazwyczaj oscylują w granicach 0,2 – 0,8.

2. PRZEPISY PRAWNE I NORMATYWY

W celu osiągnięcia pożądaných warunków oświetleniowych, utrzymania wygody i bezpieczeństwa użytkownika, a także ograniczenia niekorzystnego wpływu światła na otoczenie, podczas projektowania systemów oświetleniowych należy kierować się ogólnie określonymi zasadami. Dla dróg oraz terenów zewnętrznych, zasady te określone zostały w czterech głównych normach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego:

- PN-EN 12464-2:2014-05 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz [1],
- PN-E-02034:1971 Oświetlenie elektryczne terenów budowy, przemysłowych, kolejowych i portowych oraz dworców i środków transportu publicznego [2] (norma wycofana i zastąpiona przez PN-EN 12464-1:2004),
- PN-EN 12193:2008 Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie [3],
- PN-EN 13201-2:2016 Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania oświetleniowe [4].

Dodatkowe informacje można również znaleźć w Raportach Technicznych Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE:

- CIE S 015/E:2005 Lighting of Outdoor Work Places [5],
- CIE 88-1990 Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses [6],
- CIE 115-2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic [7].

Powyższe normatywy przedstawiają wymagane wartości luminancji, natężenia oświetlenia oraz maksymalnej światłości kierunkowej oprawy dla dróg, ulic oraz terenów otwartych [8]. Niestety, żadne z powyższych przepisów nie określają zasad projektowania oświetlenia pod kątem zanieczyszczenia światłem. Większość normatyw skupia się przede wszystkim na zapewnieniu komfortu

i bezpieczeństwa kierowcom, pieszym oraz użytkownikom oświetlanych obiektów, zwykle niedostatecznie uwzględniając szkodliwe oddziaływanie sztucznego światła na środowisko.

W normie [3] dotyczącej oświetlenia w sporcie możemy znaleźć informację odnoszącą się do oświetlenia przeszkadzającego, czyli tego które może niekorzystnie wpływać na otoczenie, zwierzęta i ludzi. W tabeli 1. podane zostały maksymalne dopuszczalne wartości światła przeszkadzającego, pochodzącego od oświetlenia zewnętrznego przy uwzględnieniu czterech stref środowiskowych: E1 – całkowicie ciemna strefa (parki, miejsca chronione), E2 – strefa o niskiej jaskrawości (tereny przemysłowe i wiejskie), E3 – strefa o średniej jaskrawości (tereny przemysłowe i podmiejskie), oraz E4 – strefa o wysokiej jaskrawości (centra miast i obszary komercyjne).

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne światło przeszkadzające pochodzące od zewnętrznych instalacji oświetleniowych [3].

Strefa środowiskowa	Światło na nieruchomościach		Światłość oprawy oświetleniowej		Światło wypromieniowane w górę
	E_V [lx]		I [cd]		ULR [%]
	Przed czasem przyciemnienia*	Po czasie przyciemnienia	Przed czasem przyciemnienia	Po czasie przyciemnienia	
E1	2	0	2 500	0	0
E2	5	1	7 500	500	5
E3	10	2	10 000	1 000	15
E4	25	5	25 000	2 500	25

*W przypadku braku ustaleń czasu przyciemnienia, nie powinny być przekraczane wartości wyższe, a wartości niższe zaleca się jako granice preferowane

Zawarty w tabeli 1. współczynnik ULR określa procentową ilość strumienia świetlnego oprawy, emitowaną powyżej horyzontu. W przypadku instalacji, stanowi on sumę współczynników światła, określonych dla poszczególnych opraw [9].

Zgodnie z wymaganiami przedstawionymi w normie [3] część opraw oświetlenia zewnętrznego, między innymi oprawy o kloszu kulistym, powinny zostać wyłączone z użycia. W Polsce regulacje prawne nawiązujące do zanieczyszczenia światłem nie są jednak egzekwowane. Wciąż można zauważyć powstawanie nowych instalacji, wykorzystujących oprawy silnie zanieczyszczające nocne niebo.

3. WYZNACZANIE WYSOKOŚCI PODSTAWY CHMUR

Warunki atmosferyczne, takie jak zachmurzenie, deszcz, śnieg czy mgła w znacznym stopniu wpływają na kształtowanie rozsyłu strumienia świetlnego. Światło emitowane w kierunku nieboskłonu jest odbijane i załamywane, przez co zostaje rozproszone w różnych kierunkach.

W niniejszym artykule przeanalizowano możliwość wykorzystania światła pochodzącego z obiektów sportowych i odbijającego się od chmur do ograniczenia zużycia energii na potrzeby oświetlenia drogowego. Wykonanie tego typu badań wymaga znajomości wysokości na jakiej w danym dniu znajdują się chmury. Obliczenie wysokości podstawy chmur możliwe jest przy pomocy poniższego wzoru [10]:

$$H = 120 \cdot (t_a - t_d) \quad (1)$$

gdzie: t_a [°C] – temperatura powietrza, t_d [°C] – temperatura punktu rosy.

Wartość temperatury punktu rosy zależy od wartości wilgotności względnej powietrza oraz temperatury powietrza w danym dniu i wyraża się wzorem [11]:

$$t_d = t - \left[(14,55 + 0,114 \cdot t)(1 - 0,01 \cdot \phi) + ((2,5 + 0,007 \cdot t)(1 - 0,01 \cdot \phi))^3 + ((15,9 + 0,117 \cdot t)(1 - 0,01 \cdot \phi)^4) \right] \quad (2)$$

gdzie: ϕ [%] – względna wilgotność powietrzna.

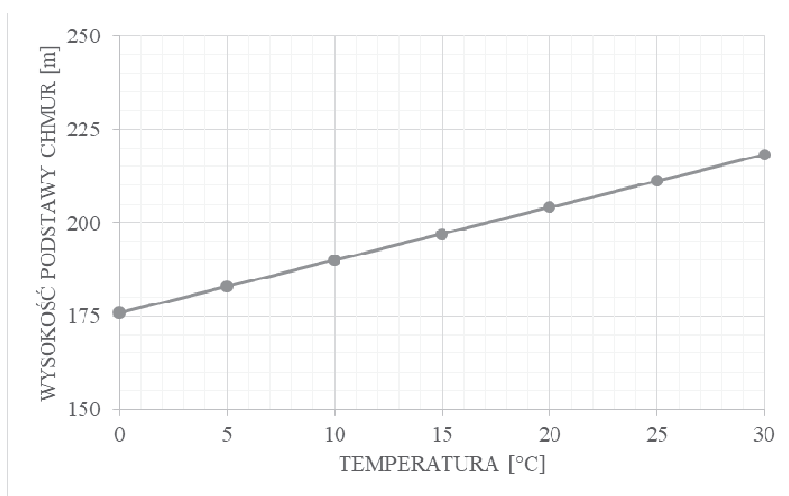
Tabela 2. Wartości wysokości podstawy chmur w miesiącu wrześniu 2017 roku.

Data	Wysokość podstawy chmur H [m]	Data	Wysokość podstawy chmur H [m]
01.09.2017	704,76	16.09.2017	525,33
02.09.2017	580,29	17.09.2017	374,42
03.09.2017	480,03	18.09.2017	751,82
04.09.2017	746,32	19.09.2017	457,83
05.09.2017	529,18	20.09.2017	371,70
06.09.2017	571,90	21.09.2017	389,99
07.09.2017	799,82	22.09.2017	325,27
08.09.2017	1032,91	23.09.2017	307,33
09.09.2017	1040,58	24.09.2017	454,48
10.09.2017	890,03	25.09.2017	473,01
11.09.2017	757,33	26.09.2017	348,22
12.09.2017	423,34	27.09.2017	735,32
13.09.2017	955,67	28.09.2017	836,18
14.09.2017	1311,16	29.09.2017	679,20
15.09.2017	883,49	30.09.2017	659,40

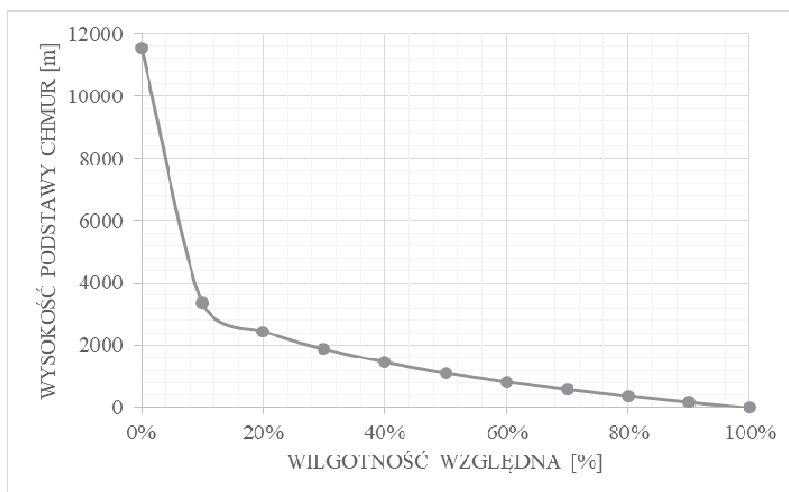
Przedstawione w tabeli 2. wartości, obliczone zostały na podstawie wzorów (1) i (2). Temperatura powietrza oraz względna wilgotność została przyjęta

zgodnie z danymi meteorologicznymi dla poszczególnych dni analizowanego miesiąca. Średnia wartość wysokości podstawy chmur we wrześniu 2017 roku wyniosła 646,54m.

Na poniższych rysunkach przedstawiono zależności wysokości podstawy chmur od temperatury powietrza oraz od względnej wilgotności.



Rys. 1. Zależność wysokości podstawy chmur od temperatury powietrza przy stałej wartości względnej wilgotności równej 90%



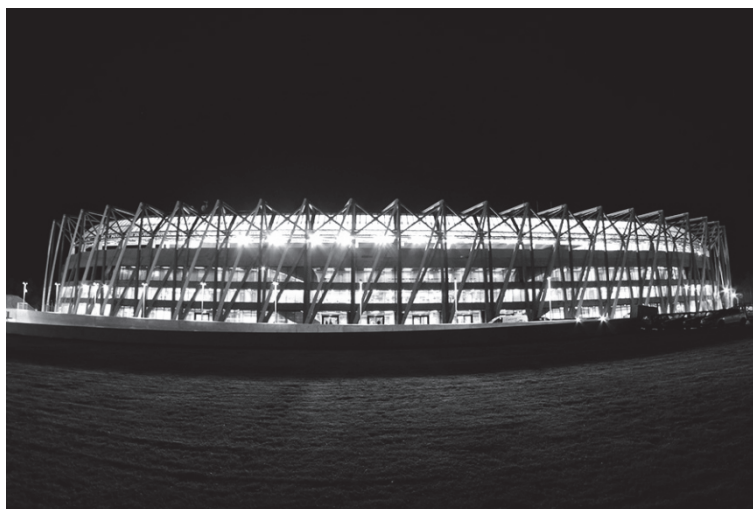
Rys. 2. Zależność wysokości podstawy chmur od względnej wilgotności przy stałej wartości temperaturze powietrza równej 0°C

Na podstawie powyższych wykresów możemy zauważyć, że wysokość chmur wzrasta wraz z przyrostem temperatury oraz spadkiem wilgotności. Na tej podstawie można stwierdzić, że w okresie jesienno-zimowym chmury znajdują się najniżej, co przyczynia się do wysokiego stopnia rozproszenia strumienia świetlnego. Ilość rozpraszanej światła również zwiększa się w tym okresie, ze względu na wcześniejsze uruchamianie całej instalacji oświetlenia zewnętrznego.

4. ANALIZA ZANIECZYSZCZENIA NIEBA NOCNEGO ŚWIATŁEM EMITOWANYM PRZEZ STADION MIEJSKI

4.1. Badany obiekt

Otwarty w 2014 roku Stadion Miejski w Białymstoku jest niewątpliwie jednym z obiektów emitującym znaczną ilość strumienia świetlnego do atmosfery. Analizę zanieczyszczenia nieba nocnego światłem sztucznym wykonano właśnie dla tego obiektu, wykorzystując oprogramowanie symulacyjne DIALux.

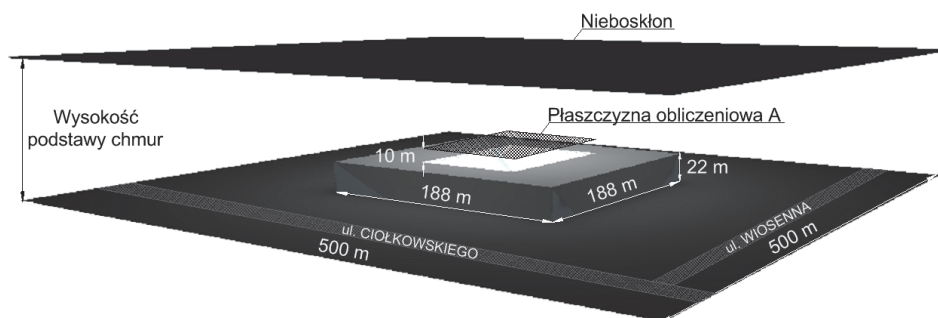


Rys. 3. Widok Stadionu Miejskiego w Białymstoku [12]

W celu przeprowadzenia badań, stworzono uproszczony model symulacyjny Stadionu Miejskiego w programie DIALux. Obiekt o wymiarach zewnętrznych 188m x 188m i wysokości 22m posiada otwór dachowy nad murawą o wymiarze 117m x 81m, wokół którego zamontowane są główne oprawy oświetleniowe PHILIPS MVF403 z lampami metalohalogenkowymi o mocy 2000 W.

4.2. Metodyka przeprowadzenia badań

Przeprowadzenie poprawnej analizy wymaga określenia jednakowych warunków oraz wyznaczenia właściwych dla danego obiektu płaszczyzn obliczeniowych. Uproszczony model Stadionu Miejskiego w Białymstoku, umieszczony został w centralnym punkcie rozpatrywanej płaszczyzny o powierzchni 2,50 km² (kwadrat o boku 500 m). Obszar badany został dobrany w taki sposób, aby na jego obrzeżach znalazły się pobliskie drogi, ulica Ciołkowskiego oddalona od Stadionu o około 85m oraz ulica Wiosenna, znajdująca się w odległości około 55m. Dodatkowo, do programu wprowadzono płaszczyznę symulującą nieboskłon, której wysokość oraz współczynnik odbicia zostały przyjęte w zależności od analizowanych warunków atmosferycznych.



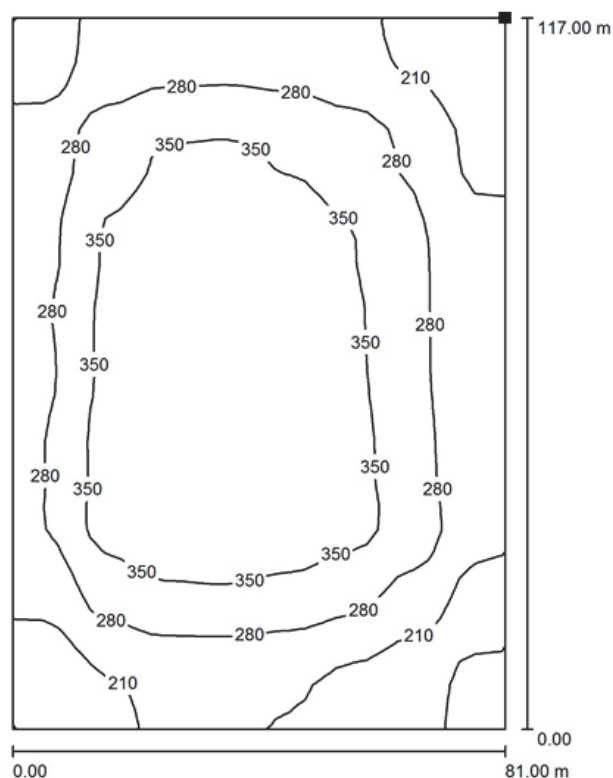
Rys. 4. Wizualizacja analizowanej płaszczyzny ze zlokalizowanym w centralnym punkcie Stadionem Miejskim oraz siatką obliczeniową

Aby określić ilość sztucznego światła wydostającego się z badanego obiektu sportowego, pierwszą siatkę obliczeniową umieszczono równoległe do podłoża w odległości 10m powyżej otworu dachowego Stadionu Miejskiego (płaszczyzna obliczeniowa A), zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w artykule "Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution" [13]. Kolejne płaszczyzny obliczeniowe poprowadzono wzdłuż ulicy Ciołkowskiego oraz ulicy Wiosennej, co umożliwiło określenie wartości natężenia oświetlenia również na tych powierzchniach.

4.3. Wyniki badań

Po przeprowadzeniu symulacji w programie DIALux, określono średnią wartość pionowego natężenia oświetlenia na powierzchni boiska, która wyniosła 1525 lx. Według normy [3] jest to właściwa wartość dla obiektów sportowych klasy mistrzowskiej, na których realizowane są imprezy masowe i wykorzystywane kamery. Dla tego typu obiektów, referencyjny poziom natężenia oświetle-

nia (E_v) powinien wynosić minimum 1400lx. Średnia wartość poziomego natężenia oświetlenia na powierzchni murawy wyniosła 1507 lx.



Rys. 5. Rozkład natężenia oświetlenia na płaszczyźnie obliczeniowej A przy wysokości podstawy chmur na poziomie 100 metrów

Na rysunku 5. przedstawiono rozkład natężenia oświetlenia na płaszczyźnie obliczeniowej, znajdującej się 10 metrów nad dachem budynku. Strumień świetlny odbija się od murawy o współczynniku odbicia równym 0,4 i ucieka poprzez zlokalizowany nad boiskiem otwór dachowy. Wykonanie obliczeń w programie pozwoliło na uzyskanie średniej wartości natężenia oświetlenia, wynoszącej 290 lx, na płaszczyźnie obliczeniowej A. Oznacza to, że około 20% strumienia świetlnego wydobywa się poza obszar boiska piłkarskiego oraz wpływa na zwiększenie efektu zanieczyszczenia nieboskłonu.

Efekt ten jest niekorzystny, jednakże w tym przypadku nieunikniony. W celu sprawdzenia, czy możliwe jest wykorzystanie sztucznego światła emitowanego przez Stadion Miejski do poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego, przeprowadzono również symulacje uwzględniające pobliskie drogi.

Obliczenia zrealizowano przy warunkach zachmurzenia nieboskłonu, przyjmując współczynnik odbicia światła dla chmur na poziomie 0,4.

Tabela 3. Średni rozkład natężenia oświetlenia na ulicy Ciołkowskiego oraz na ulicy Wiosennej, przy różnych wysokościach podstawy chmur w miesiącu wrześniu 2017 r.

Wysokość podstawy chmur [m]	Średnie natężenie oświetlenia na ulicy Ciołkowskiego [lx]	Średnie natężenie oświetlenia na ulicy Wiosennej [lx]
100	2,20	3,24
200	0,49	0,55
300	0,49	0,55
400	0,49	0,55
500	0,28	0,31
600	0,28	0,31
700	0,17	0,19
800	0,11	0,13
900	0,07	0,09
1000	0,04	0,05

W tabeli 3. zestawione zostały średnie wartości natężenia oświetlenia, uzyskane na ulicach znajdujących się w pobliżu Stadionu Miejskiego, przy różnych wysokościach podstawy chmur (od 100 do 1000 metrów). Najlepsze rezultaty osiągnięte zostały dla ulicy Wiosennej, która znajdowała się najbliższej badanego obiektu sportowego.

Tabela 4. Wartości natężenia oświetlenia i równomierności dla ulicy Wiosennej dla wysokości podstawy chmur równej 100 m.

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_{max}
3,24	1,20	5,20	0,371

Tabela 5. Wartości natężenia oświetlenia i równomierności dla ulicy Ciołkowskiego dla wysokości podstawy chmur równej 100 m.

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_{max}
2,20	0,65	3,86	0,296

Przy niskich chmurach, wartości natężenia oświetlenia na ulicy Wiosennej osiągały wartości nawet ponad 5 lx (tabela 4.), natomiast na ulicy Ciołkowskiego niecałe 4 lx (tabela 5.). Obie drogi można zakwalifikować do klasy oświetleniowej CE0, która stosowana jest w strefach konfliktowych (ronda, ulice handlowe skrzyżowania dróg, powierzchnie na których tworzą się koleжки pojazdów) oraz na powierzchniach użytkowanych przez pieszych i rowerzystów. Dla

obszarów tego typu wymagane średnie natężenie oświetlenia wynosi 50 lx [4]. Uzyskane 5 lx, emitowane przez Stadion Miejski stanowi już 10% wymaganego natężenia oświetlenia.

5. WNIOSKI

Przeanalizowany przypadek świadczy o skali problemu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem. Ilość strumienia świetlnego, emitowanego do atmosfery z badanego obiektu sportowego to około 20%. Jest to bardzo duża wartość, zważywszy na to, że w obliczeniach nie uwzględniono innego oświetlenia zainstalowanego w budynku i w okolicy Stadionu Miejskiego – oświetlenia parkingów, trybun, korytarzy, czy samej iluminacji obiektu. Na podstawie wykonanych symulacji możemy zauważyć, że strumień świetlny odbijając się od różnych powierzchni dociera do okolicznych dróg, pozwalając nawet na osiągnięcie wartości około 5 lx.

W artykule Piotra Michałka "Zanieczyszczenie światłem", zwrócono uwagę na fakt, iż emisja strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń powoduje również zwiększenie luminancji zamglenia [14]. Warto zauważyć, że ma to wpływ na zwiększenie poziomu średniej luminancji drogi oraz na poprawę równomierności oświetlenia.

Można więc pokusić się o stwierdzenie, iż możliwe jest wykorzystanie strumienia świetlnego, emitowanego przez istniejące obiekty sportowe, w celu ograniczenia zużycia energii na oświetlenie ulic i terenów przyległych do obiektów sportowych. Odpowiednie rozplanowanie oświetlenia oraz zastosowanie systemów sterowania mogłoby okazać się korzystne nie tylko dla środowiska, ale również przynieść oszczędności finansowe

Artykuł zrealizowany w Katedrze Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Światłowej Politechniki Białostockiej w ramach pracy statutowej S/WE/3/2018 oraz w ramach pracy MB/WE/5/2017 finansowanych ze środków MNiSW

LITERATURA

- [1] PN-EN 12464-2:2014-05 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [2] PN-E-02034:1971 Oświetlenie elektryczne terenów budowy, przemysłowych, kolejowych i portowych oraz dworców i środków transportu publicznego.
- [3] PN-EN 12193:2008 Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie.
- [4] PN-EN 13201-2:2016 Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania oświetleniowe.
- [5] CIE S 015/E:2005 Lighting of Outdoor Work Places.
- [6] CIE 88-1990 Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasse.
- [7] CIE 115-2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic.

- [8] Tabaka P., Fryc I., Wpływ właściwości odbiciowego podłoża na którym zainstalowano daną oprawę oświetleniową na względną wartość zanieczyszczenia jej otoczenia światłem, Polish Journal for Sustainable Development, Tom 21 (2), 2017.
- [9] Control of obtrusive light.
- [10] Maghrabi, A.H, R. Clay, N. Wild and B. Dawson, Design and development of a simple infrared monitor for cloud detection, Energy Conversion and Management, 50, 2009, 2732-2737.
- [11] D. R. Heldman, Encyclopedia of Agricultural Food and Biological Engineering, Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- [12] <http://stadion.bialystok.pl>, [Online], [dostęp: 24 styczeń 2018]
- [13] Brons J.A., Bullough J.D., Rea M.S. Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. Lighting Res. Technol. 40, 2008, 201-224.
- [14] Michałka P., Zanieczyszczenie Światłem, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 255, 2012.

**ANALYSIS OF NIGHT SKY POLLUTION WITH ARTIFICIAL LIGHT,
EMITTED BY EXISTING SPORTS BUILDINGS, USING DIALUX
SIMULATION SOFTWARE.**

This article presents the possibilities of analyzing the level of the night sky pollution by artificial light from sports buildings such as stadiums and football pitches. Using the DIALux simulation software, a computer model of the Municipal Stadium in Białystok was created and simulations and calculations were also made. On this basis, the number of luminous flux emitted outside the area of the tested object was determined. The measurements were carried out for different cloud heights, taking into account the appropriate light reflection coefficient. At the same time, the level of illuminance on the roads surfaces next to the Municipal Stadium was determined and the possibilities of using the light coming from the sports buildings were analyzed in order to improve the energy efficiency of road lighting in the area next to analyzed building.

(Received: 29.01.2018, revised: 05.03.2018)

