

Adam MARKOWICZ¹

Tomasz BINKOWSKI²

ANALIZA WPŁYWU WSPÓŁCZYNNIKÓW ODBICIA ŚWIATŁA OD POWIERZCHNI NA OBLICZENIA FOTOMETRYCZNE

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych w programie DIALux dotyczących wpływu współczynników odbicia światła na obliczenia fotometryczne. Analizę dokonano dla dwóch przykładowych pomieszczeń o różnym przeznaczeniu oraz różnej kubaturze. Dla każdego z pomieszczeń zdefiniowano parametry płaszczyzny obliczeniowej. Oprawy oświetleniowe zostały dobrane w zależności od pracy wykonywanej w każdym z pomieszczeń oraz wysokości sufitu. Założono wstępnie standardowe współczynniki odbicia światła dla każdego z pomieszczeń. Liczbę opraw oraz rozmieszczenie zaplanowano zgodnie z normą oświetleniową. Wykonano kalkulacje fotometryczne dla różnych wartości współczynników, przy jednoczesnym zachowaniu wartości początkowych pozostałych dwóch współczynników. Otrzymane wyniki zestawiono i porównano pod kątem wpływu zmienności współczynników na średnie natężenie oświetlenia oraz jego równomierność. Dla skrajnych przypadków niespełniających warunków normy oświetleniowej zaproponowano zoptymalizowane rozmieszczenia opraw oraz przedstawiono uzyskane wyniki. Badania wykazały, że w omawianych przypadkach pomieszczeń największy wpływ na wyniki obliczeń fotometrycznych ma współczynnik odbicia światła od ścian. Rozbieżności pomiędzy uzyskanym natężeniem w przypadku mniejszych pomieszczeń wskazuje jak ważnym czynnikiem w procesie projektowania oświetlenia ma informacja na temat planowanego wykończenia wnętrza.

Słowa kluczowe: projektowanie oświetlenia, badania symulacyjne, fotometria, DIALux

¹ Adam Markowicz, Politechnika Rzeszowska, student II stopnia WEiI PRz, adam.markowicz@live.com.

² Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 17 865 19 74, tbinkow@prz.edu.pl.

1. Wprowadzenie

Źródła światła stanowią ważną część bilansu energetycznego każdego budynku. Od ich doboru i rozmieszczenia zależy, czy uzyskamy w danym pomieszczeniu wymagane przez normy warunki oświetlenia. Podstawową normą określającą oświetlenie miejsc pracy jest norma *PN-EN 12464-1:2012* [4]. W procesie projektowania oświetlenia dla budynków wykonywane są symulacje określające rozkład światła w pomieszczeniach. Zadaniem takich symulacji jest optymalizacja ilości opraw przy jednoczesnym spełnieniu zadanych przez normę [4] wymagań.

Ważnym aspektem w procesie kalkulacji fotometrycznej jest selekcja odpowiednich współczynników odbicia światła od powierzchni sufitu, ścian oraz podłogi. We wczesnym etapie projektowania często nie są znane kolory, gramatury ścian, czy rodzaje podłogi. W związku z tym zakładane współczynniki, choć nie są narzucane przez normy, muszą być dobrane z pewnym zapasem.

Współczynnik odbicia światła określa jaka część strumienia świetlnego padającego na powierzchnię jest odbijana [1]. Jego wartość wyrażona jest w procentach.

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi} * 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- ϕ_p – strumień świetlny odbity,
- ϕ – strumień świetlny padający

Do obliczeń fotometrycznych określa się trzy współczynniki:

- współczynnik odbicia światła od powierzchni sufitu,
- współczynnik odbicia światła od powierzchni ścian,
- współczynnik odbicia światła od powierzchni podłogi

2. Badania symulacyjne

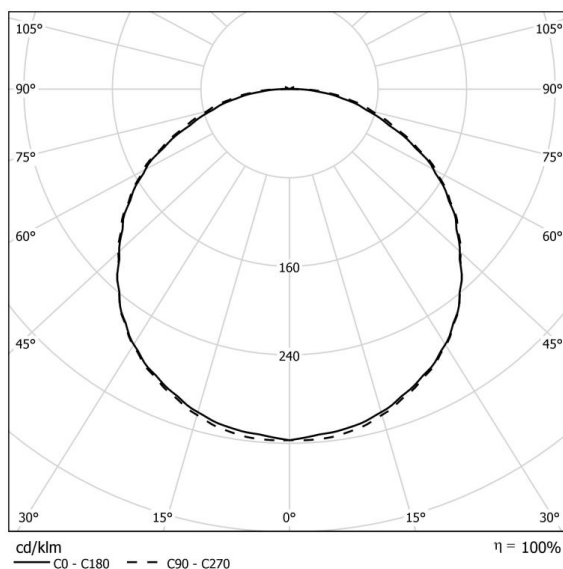
2.1. Założenia ogólne

Przedmiotem obliczeń symulacyjnych są pomieszczenia o różnych funkcjach (biuro, hala sportowa).

Celem badań jest analiza wpływu dobranych współczynników odbicia światła na obliczenia fotometryczne. Obliczenia zostały przeprowadzone w programie DIALux w wersji 4.13. Przyjęta płaszczyzna pracy dla obliczeń wynosi $h = 0,85$ m (biuro) oraz $h = 0$ (hala sportowa).

2.2. Pomieszczenie biurowe

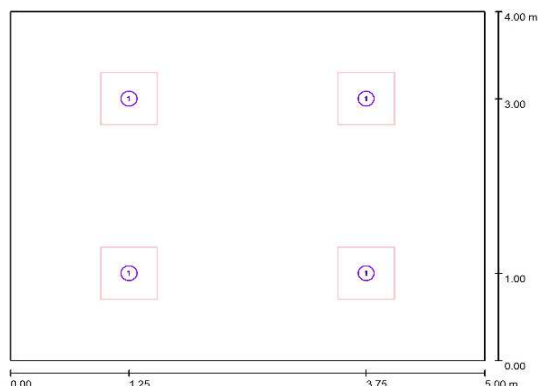
Pierwszym analizowanym obiektem jest model pomieszczenia biurowego o długości 5 metrów, szerokości 4 metrów i wysokości 2,5 metra. Oprawa zaproponowana do tego typu pomieszczeń to FLAT LED [3] o mocy 43 W i strumieniu 4300 lm. Jest to oprawa kasetonowa, z możliwością montażu nastropowego (ramka nastropowa). Skuteczność świetlna na poziomie 100 lm/W. Wskaźnik oddawania barw R_a przekracza 80, temperatura barwowa 4000K, rozsył oprawy symetryczny. Krzywa rozsyłu tej oprawy przedstawiona jest na rys. 1.



Rys. 1. Krzywa rozsyłu światłości oprawy FLAT LED [3]

Fig. 1. Light distribution curve of FLAT LED luminaire [3]

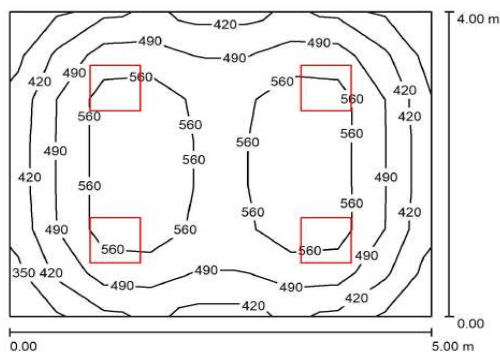
Jako standardowy dla pomieszczenia biurowego przyjęto zestaw współczynników odbicia 70/50/20 (sufit/ściany/podłoga). Korzystając z wbudowanego w program DIALux kreatora rozmieszczenia opraw dobrano optymalną liczbę opraw dla której będą spełnione wytyczne normy $PN-EN 12464-1:2012$ dla płaszczyzn pracy biurowej (średnie natężenie oświetlenia większe lub równe 500 lx, równomierność oświetlenia co najmniej 0,6) [4]. Uzyskane rozmieszczenie opraw przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Plan rozmieszczenia opraw [2]

Fig. 2. Luminaire layout plan [2]

Dla powyższego rozmieszczenia opraw i standardowych współczynników obliczono średnie natężenie oświetlenia równe 508 lx, natomiast równomierność oświetlenia wyniosła 0,653. Dla tego pomieszczenia płaszczyzna pracy została umieszczona na wysokości 0,85 m nad poziomem podłogi. Obliczenia natężenia oświetlenia wykonano na podstawie określonej płaszczyzny pracy o rastrze obliczeń 9x7 punktów. Raster siatki obliczeniowej dobrano zgodnie z normą *PN-EN 12464-1:2012 (Tablica A.1)* [4]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3.



Wysokość pomieszczenia: 2.500 m, Wysokość montażu: 2.500 m,
Współczynnik konserwacji: 0.80

Wartości Lux, Skala 1:52

Powierzchnia	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Płaszczyzna pracy	/	508	331	635	0.653
Podłoga	20	399	274	473	0.688
Sufit	70	128	95	351	0.746
Ściany (4)	50	290	142	499	/

Rys. 3. Wyniki obliczeń dla pomieszczenia biurowego o współczynnikach 70/50/20 [2]

Fig. 3. Calculation results for an office room with coefficients 70/50/20 [2]

Po uzyskaniu obliczeń dla przyjętego standardowego zestawu współczynników wykonano obliczenia dla różnych współczynników odbicia światła od sufitu (90...10...0) z zachowaniem stałych wartości współczynników odbicia światła od powierzchni ścian (50%) oraz podłogi (20%). Adekwatne symulacje wykonano dla zmiennych współczynników odbicia światła od ścian oraz podłogi. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

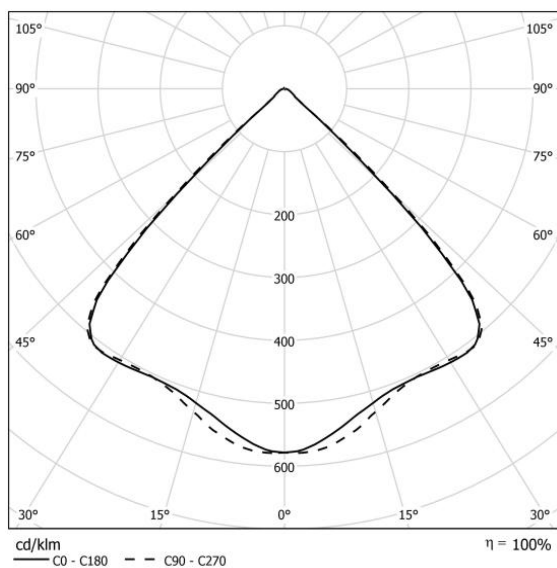
Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń dla pomieszczenia biurowego

Table 1. List of calculation results for an office room

Współczynnik odbicia światła od ...			Em [lx]	d [-]
Sufitu	Ścian	Podłogi		
90	50	20	525	0.668
80			517	0.667
70			508	0.653
60			499	0.651
50			491	0.65
40			482	0.649
30			475	0.646
20			467	0.644
10			459	0.657
0			452	0.655
70			90	20
	80	644	0.762	
	70	584	0.704	
	60	542	0.679	
	50	508	0.653	
	40	479	0.627	
	30	454	0.608	
	20	433	0.584	
	10	414	0.567	
70	50	90	625	0.688
		80	604	0.685
		70	583	0.663
		60	566	0.66
		50	549	0.661
		40	534	0.656
		30	521	0.655
		20	508	0.653
		10	495	0.663
0	483	0.662		

2.3. Hala Sportowa

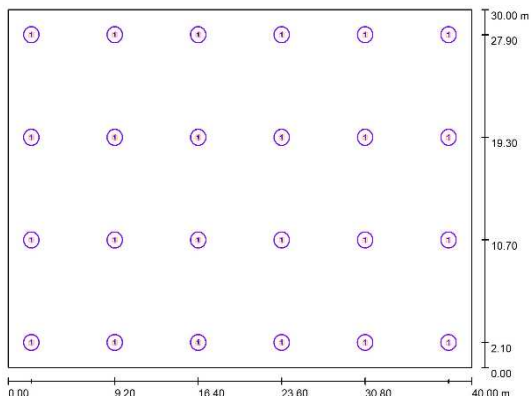
Drugim badanym przypadkiem jest model hali sportowej o długości 40 metrów, szerokości 30 metrów i wysokości 10 metrów. Oprawą przeznaczoną do tego typu pomieszczeń jest CYBERIA FX o mocy 210 W i strumieniu świetlnym 25500 lm. Jest to oprawa typu *highbay*, z możliwością montażu nastropowego oraz zwieszanego. Skuteczność świetlna tej oprawy wynosi 121 lm/W. Wskaźnik oddawania barw Ra wynosi co najmniej 80, temperatura barwowa 4000K, rozsył oprawy symetryczny, kąt rozsyłu 90 stopni. Krzywa rozsyłu tej oprawy przedstawiona jest na rys. 4.



Rys. 4. Krzywa rozsyłu światłości oprawy CYBERIA FX [3]

Fig. 4. Light distribution curve of CYBERIA FX luminaire [3]

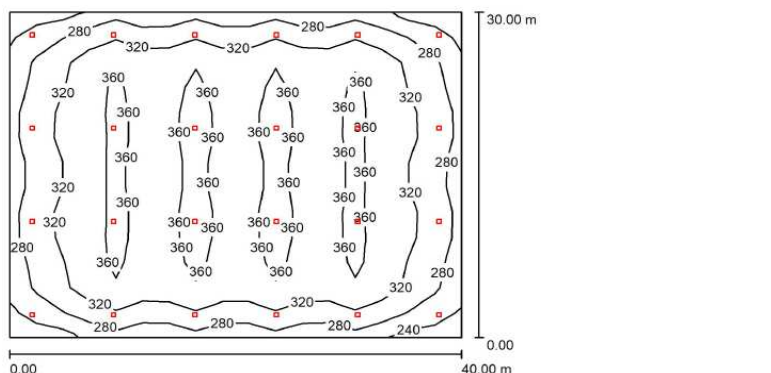
Jako standardowy dla hali sportowej przyjęto zestaw współczynników odbicia 50/30/20 (sufit/ściany/podłoga). Rozmieszczenie opraw dobrano dla optymalnej liczby opraw dla której będą spełnione wytyczne normy *PN-EN 12464-1:2012* dla płaszczyzn pracy hali sportowej (średnie natężenie oświetlenia większe lub równe 300 lx, równomierność oświetlenia co najmniej 0,6) [4]. Uzyskane rozmieszczenie opraw przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Plan rozmieszczenia opraw [2]

Fig. 5. Luminaire layout plan [2]

Dla powyższego rozmieszczenia opraw i standardowych współczynników obliczono średnie natężenie oświetlenia równe 326 lx, natomiast równomierność oświetlenia wyniosła 0,691. Dla tego pomieszczenia płaszczyzna pracy została umieszczona na wysokości podłogi. Obliczenia natężenia oświetlenia wykonano na podstawie określonej płaszczyzny pracy o rastrze obliczeń 17x13 punktów. Raster siatki obliczeniowej dobrano zgodnie z normą *PN-EN 12464-1:2012 (Tabela A.1)* [4]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6.



Wysokość pomieszczenia: 10.000 m, Wysokość montażu: 10.000 m,
Współczynnik konserwacji: 0.80

Wartości Lux, Skala 1:386

Powierzchnia	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Płaszczyzna pracy	/	326	224	378	0.687
Podłoga	20	327	181	389	0.554
Sufit	50	55	47	62	0.843
Ściany (4)	30	144	42	730	/

Rys. 6. Wyniki obliczeń dla hali sportowej o współczynnikach 50/30/20 [2]

Fig. 6. Calculation results for a sports hall with coefficients 50/30/20 [2]

Podobnie jak dla pomieszczenia biurowego wykonano symulacje dla różnych wartości współczynników odbicia światła, przy jednoczesnym zachowaniu standardowych wartości pozostałych dwóch współczynników. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń dla hali sportowej

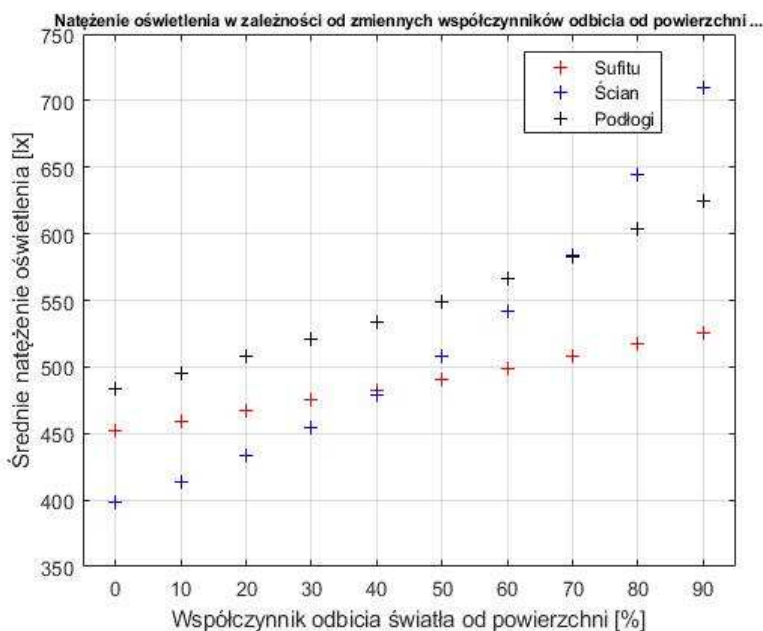
Table 2. List of calculation results for a sports hall

Współczynnik odbicia światła od ...			Em [lx]	d [-]
Sufitu	Ścian	Podłogi		
90	30	20	343	0.684
80			338	0.685
70			334	0.685
60			330	0.686
50			326	0.687
40			322	0.695
30			319	0.695
20			315	0.696
10			312	0.696
0			308	0.695
50			90	20
	80	383	0.782	
	70	370	0.779	
	60	357	0.758	
	50	346	0.735	
	40	335	0.712	
	30	326	0.687	
	20	318	0.674	
	10	310	0.654	
50	30	90	406	0.692
		80	393	0.695
		70	380	0.694
		60	368	0.694
		50	356	0.695
		40	346	0.697
		30	336	0.686
		20	326	0.687
		10	318	0.684
0	309	0.688		

3. Analiza wyników

3.1. Pomieszczenie biurowe

Wyniki obliczeń średniego natężenia oświetlenia uzyskane w efekcie przeprowadzonej symulacji dla pomieszczenia biurowego przedstawiono na rys. 7.

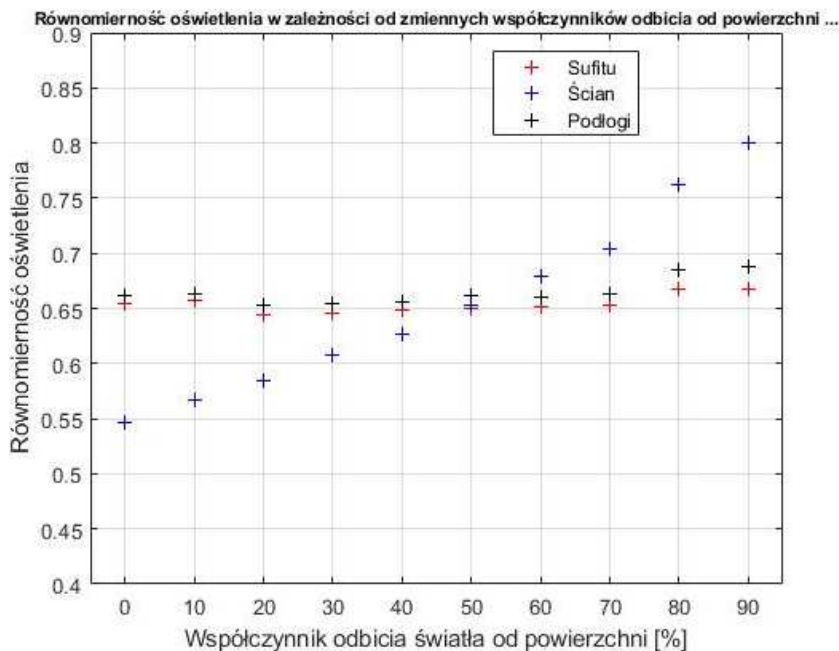


Rys. 7. Wyniki obliczeń dla pomieszczenia biurowego w zależności od zmieniających współczynników odbicia światła [2]

Fig. 7. Calculation results for an office room depending on the change in light reflectance [2]

Jak można zauważyć na wykresie największy wpływ na natężenie oświetlenia w pomieszczeniu biurowym o zadanych parametrach ma współczynnik odbicia od powierzchni ścian. W wariancie z wartością tego współczynnika równą 0, średnie natężenie oświetlenia na płaszczyźnie pracy wynosi 398 lx, natomiast dla wariantu optymistyczniejszego (90%) natężenie osiąga wartość 710 lx. Drugim pod względem dynamiki wartości jest współczynnik odbicia światła od podłogi, natomiast najmniejszy wpływ na obliczenia natężenia oświetlenia w pomieszczeniu ma rodzaj i kolor sufitu.

Na rysunku 8. zestawiono uzyskane wartości równomierności dla zmienianych współczynników odbicia światła od powierzchni.

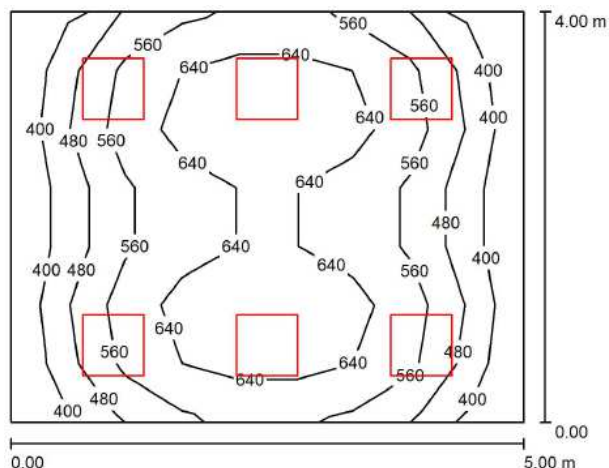


Rys. 8. Równomierność oświetlenia pomieszczenia biurowego w zależności od zmienianych współczynników odbicia światła [2]

Fig. 8. Uniformity of office room lighting depending on variable light reflection coefficients [2]

Największy wpływ na równomierność oświetlenia pomieszczenia, podobnie jak dla obliczeń natężenia, miał współczynnik odbicia od powierzchni ścian. Dla wartości 0, 10, 20 rozmieszczenie opraw nie spełnia warunków normy mówiących o równomierności oświetlenia dla pomieszczeń biurowych (co najmniej 0,6) [4]. Spełnia ten warunek dla wszystkich badanych wartości współczynników odbicia od powierzchni sufitu i podłogi.

W celu sprawdzenia możliwości skorygowania wyników modyfikacją rozmieszczenia opraw, wybrano konfigurację o najbardziej skrajnych wynikach obliczeń (pomieszczenie o współczynnikach 70/0/20), a następnie przeprowadzono optymalizację. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 9.



Wysokość pomieszczenia: 2.500 m, Wysokość montażu: 2.500 m,
Współczynnik konserwacji: 0.80

Wartości Lux, Skala 1:52

Powierzchnia	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Płaszczyzna pracy	/	556	344	733	0.619
Podłoga	20	402	229	506	0.569
Sufit	70	40	20	261	0.503
Ściany (4)	0	309	62	762	/

Rys. 9. Wyniki obliczeń dla pomieszczenia biurowego o współczynnikach 70/0/20 po modyfikacji rozmieszczenia opraw [2]

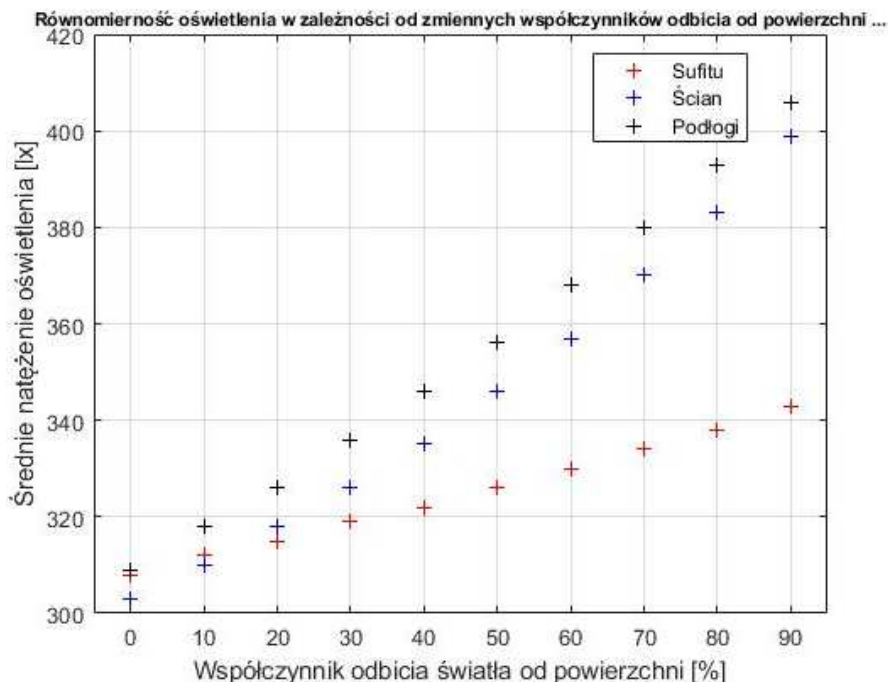
Fig. 9. Calculation results for an office room with 70/0/20 coefficients after modifying the layout of luminaires [2]

Aby uzyskać wymagane przez normę warunki oświetlenia, w pomieszczeniu umieszczono dodatkowe dwie oprawy. Oznacza to, że w niekorzystnych warunkach (niski współczynnik odbicia światła od ścian), konieczne jest zwiększenie liczby opraw, co oznacza również wzrost zapotrzebowanej mocy (w tym przypadku aż o 50%).

3.2. Hala Sportowa

W przypadku hali sportowej, założone jako standard współczynniki okazały się wystarczające, aby zapewnić zarówno średnie natężenie zgodne z normą [4] jak i równomierność oświetlenia nawet w skrajnych przypadkach wartości jednego ze współczynników (przy zachowaniu pozostałych dwóch równych wartości przyjętej za standardową).

Wyniki obliczeń natężenia oświetlenia zostały przedstawione na rys. 10.

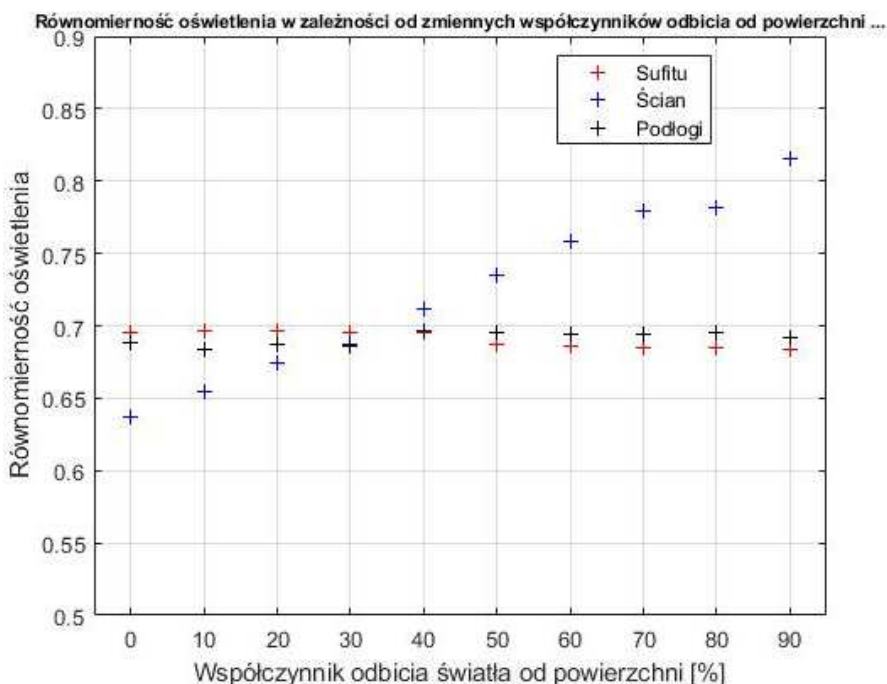


Rys. 10. Wyniki obliczeń dla hali sportowej w zależności od zmienianych współczynników odbicia światła [2]

Fig. 10. Calculation results for a sports hall depending on the change in light reflectance [2]

Porównywalny wpływ na wyniki obliczeń miał współczynnik odbicia światła od powierzchni podłogi oraz współczynnik odbicia światła od powierzchni ścian. Dla zerowych wartości współczynników osiągnięto odpowiednio 309 lx i 303 lx, natomiast dla wartości maksymalnych (90) kolejno 406 lx oraz 399 lx. Znacznie mniejsze różnice między skrajnymi wartościami zauważono dla zmiennego współczynnika odbicia światła od sufitu (przedział od 308 lx do 343 lx).

Na rysunku 11. zestawiono uzyskane wartości równomierności dla zmiennych współczynników odbicia światła od danych powierzchni.

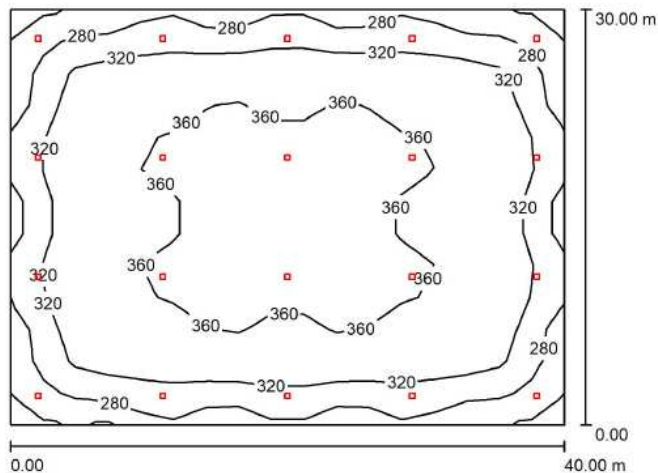


Rys. 11. Równomierność oświetlenia hali sportowej w zależności od zmienianych współczynników odbicia światła [2]

Fig. 11. Uniformity of sports hall lighting depending on the change in light reflectance [2]

Równomierność oświetlenia hali sportowej, podobnie jak wymagane średnie natężenie oświetlenia we wszystkich badanych przypadkach, okazała się zgodna z normą [4].

Największe natężenie oświetlenia hali sportowej (406 lx) uzyskano w konfiguracji współczynników odbicia światła od poszczególnych powierzchni 50/30/90, przy odpowiedniej równomierności oświetlenia (0,692). Natężenie oświetlenia znacznie przekracza normę [4], co możemy wykorzystać jako margines w procesie optymalizacji ilości opraw. Mniejsza ich ilość oznacza jednocześnie oszczędzenie części energii przeznaczonej do oświetlenia hali. Wyniki uzyskane w procesie optymalizacji przedstawiono na rys. 12.



Wysokość pomieszczenia: 10.000 m, Wysokość montażu: 10.000 m,
Współczynnik konserwacji: 0.80

Wartości Lux, Skala 1:386

Powierzchnia	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Płaszczyzna pracy	/	332	238	392	0.716
Podłoga	90	332	197	393	0.594
Sufit	50	208	125	263	0.597
Ściany (4)	30	248	124	836	/

Rys. 12. Wyniki obliczeń dla hali sportowej o współczynnikach 50/30/90 po modyfikacji rozmieszczenia opraw [2]

Fig. 12. Calculation results for a sports hall with 50/30/90 coefficients after modifying the layout of luminaires [2]

Usunięcie jednego rzędu opraw spowodowało spadek średniego natężenia oświetlenia, jednak w dalszym ciągu spełniało ono wymagania normy [4]. Równomierność uległa nieznacznej poprawie, jej wartość jest zgodna z wymaganiami dla płaszczyzny pracy. Liczba opraw po optymalizacji zmalała z 24 sztuk do 20 sztuk (o około 16 %), podobnie moc łączna potrzebna do zasilania oświetlenia spadła o około 16 %.

3. Podsumowanie

W ramach artykułu przeprowadzono obliczenia symulacyjne mające na celu analizę wpływu doboru współczynników odbicia światła od powierzchni sufitu, ścian, podłogi. Przeanalizowano dwa typy pomieszczeń o różnej kubaturze (nie-wielkie pomieszczenie biurowe oraz duża hala sportowa).

W wyniku obliczeń zauważono, że największy wpływ na obliczenia fotometryczne ma współczynnik odbicia światła od powierzchni ścian. Przestrzega to przed zakładaniem zbyt wysokich jego wartości za standardowe do obliczeń,

kiedy nieznanym jest materiał, którym zostaną ozdobione ściany pomieszczenia. Jednocześnie jest to wskazówką dla projektantów wnętrz, do stosowania materiałów o względnie wysokim współczynniku odbicia światła, celem optymalizacji kosztów utrzymania oświetlenia.

Bardzo duży wpływ na warunki oświetleniowe ma przede wszystkim objętość pomieszczenia. W przypadku pomieszczenia biurowego, zakres natężenia uzyskanego w obliczeniach zawierał się w przedziale od 398 lx do 710 lx, podczas gdy dla obiektów o dużej kubaturze (hala sportowa) uzyskane średnie natężenia oświetlenia wyniosły od 303 lx do 406 lx.

Literatura

- [1] Woźniak W.A.: Techniki świetlne. Wykład 5. Reakcja światła z materią. Politechnika Wroclawska
- [2] Markowicz A.: Analiza wpływu współczynników odbicia światła na obliczenia fotometryczne, praca dyplomowa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2019
- [3] www.essystem.pl (dostęp 20 czerwca 2019)
- [4] PN-EN 12464-1, Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach. Polski Komitet Normalizacyjny, grudzień 2012

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LIGHT REFLECTION COEFFICIENTS ON PHOTOMETRIC CALCULATIONS

Summary

The article presents the results of simulation tests carried out in the DIALux program concerning the influence of light reflection coefficients on photometric calculations. The analysis was made for two exemplary rooms for various purposes and for different capacities. For each of the rooms, the parameters of the calculation plane have been defined. The lighting fixtures were good depending on the work being done in each of the rooms and the height of the ceiling. The standard reflection coefficients for each room have been pre-assigned. The number of fittings and placement is planned in accordance with the lighting standard. Photometric calculations were made for different values of co-factors, while maintaining the initial values of the other two coefficients. The results obtained were compiled and compared in terms of the impact of variability of coefficients on average illumination and its uniformity. For extreme cases that do not meet the lighting standards, the optimized arrangement of the luminaires was proposed and the results obtained were presented. The research has shown that in the case of the rooms in question, the biggest influence on the results of photometric calculations has the reflectivity of light from the walls. Discrepancies between the intensity obtained in the case of smaller rooms indicate how important factor in the lighting design process is information about the planned interior design.

Keywords: lighting design, simulation studies, photometry, DIALux

DOI: 10.7862/re.2020.5

Przesłano do redakcji: czerwiec 2019 r.

Przyjęto do druku: luty 2021 r.