

CAŁKOWITY WSKAŹNIK OŚWIECENIA DZIENNEGO – TDI A WYMAGANE OŚWIECENIE UZUPEŁNIAJĄCE

Eliza SZCZEPAŃSKA*, Dariusz HEIM*

* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mails: eliza.szczepanska@gmail.com, dariusz.heim@p.lodz.pl

Streszczenie: Niniejsze opracowanie jest opisem ostatniego etapu prac nad autorską metodą oceny wykorzystania światła dziennego do oświetlania wnętrz. Prezentowane wyniki określają wymagania dla oświetlenia uzupełniającego w zależności od Całkowitego Wskaźnika Oświetlenia Dziennego *TDI*. Na tej podstawie możliwe jest oszacowanie zapotrzebowania na energię elektryczną niezbędną do zapewnienia wymaganego poziomu natężenia oświetlenia w charakterystycznych punktach pomieszczenia. W pracy zamieszczono wyniki obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem Metody Wstecznego Śledzenia Promienia. W analizowanym przypadku założono źródło światła sztucznego wysokiej mocy o symetrycznym promieniu rozsyłu obejmującym swoim zasięgiem cały badany obszar pomiędzy punktami kontrolnymi.

Słowa kluczowe: komfort wizualny, natężenie oświetlenia, oświetlenie uzupełniające, wskaźnik oświetlenia dziennego.

1. WPROWADZENIE

Oświetlenie wnętrz światłem dziennym decyduje o jednym z czterech podstawowych parametrów komfortu wewnętrznego – komforcie wizualnym. Zagadnienia oświetlenia są złożone i mają charakter interdyscyplinarny z zakresu współczesnej Fizyki Budowli, Architektury i Elektroenergetyki. Patrząc na kierunki rozwoju powyższych nauk i najnowsze trendy światowe dotyczące jakości obiektów budowlanych oraz zrównoważonego rozwoju, niezwykle istotne staje się właściwe podejście do zagadnień oświetlenia. Podejście, które na pierwszym miejscu stawiać będzie zdrowie i bezpieczeństwo użytkowników budynków pamiętając jednocześnie o relacjach budynku a środowisko zewnętrzne. Na tym tle, szczególnie znaczenia nabiera właściwe wykorzystanie zarówno światła słonecznego jak i uzupełniającego światła elektrycznego w celu spełnienia podstawowych wymagań związanych z jakością środowiska wewnętrznego (komfort wizualny) oraz aspektami oszczędności energii.

2. CAŁKOWITY WSKAŹNIK OŚWIECENIA DZIENNEGO - TDI

Podejście oparte na proponowanej metodzie wprowadza pojęcie Całkowitego Wskaźnika Oświetlenia Dziennego – *TDI* (ang. *Total Daylight Index*) [1]. Polega ono na ilościowej ocenie stopnia wykorzystania światła dziennego w projektowanym budynku już na etapie projektu koncepcyjnego. Potrzebne dane ograniczają się do znajomości geometrii obudowy budynku, podstawowych wymiarów obiektu oraz jego funkcji. W zależności od przyszłego sposobu użytkowania obiektu oraz wymaganych wartości poziomu natężenia oświetlenia możliwe jest określenie przepuszczalności obudowy oraz stopnia dystrybucji światła we wnętrzu. *TDI* jest wskaźnikiem bezwymiarowym będącym iloczynem współczynnika przenikania światła do wnętrza obiektu przez jego obudowę T oraz współczynnika przenoszenia światła od jego źródła do punktu na płaszczyźnie roboczej D . Jego wartość może zmieniać się od 0 do 1. Wymagane wartości *TDI* powinny być ustalane indywidualnie w zależności od położenia geograficznego (długość i szerokość geograficzna) jednak bez uwzględniania dodatkowych uwarunkowań zewnętrznych a w tym sąsiedniej zabudowy, elementów zacieniających, zieleni itp. Wszystkie dodatkowe czynniki uwzględniane są poprzez współczynnik korygujący C . Dodatkowo współczynnik korygujący pozwala uwzględnić zróżnicowaną geometrię elewacji i znajdujących się w niej otworów oraz nietypowy sposób rozprowadzania światła we wnętrzu. W pierwszym przypadku uwzględniane jest ewentualne przesunięcie źródła światła względem płaszczyzny roboczej oraz stosunek powierzchni przeszklonej do pełnej. W drugim odbicie od przeciwległej ściany. Szczegółowy opis proponowanej metodologii obliczeniowej zamieszczono w pracy [1].

3. OŚWIETLENIE UZUPEŁNIAJĄCE

Ze względu na swoją specyfikę prawidłowe oszacowanie energochłonności oświetlenia uzupełniającego jest zadaniem wymagającym uwzględnienia wielu dodatkowych czynników. Różnice wynikają zarówno ze sposobu dystrybucji światła we wnętrzu, usytuowaniem względem siebie źródeł, różnych systemów sterowania jak i specyficznych i indywidualnych wymagań użytkowników. Dlatego jednym z celów badań prowadzonych w ramach szerszego projektu naukowego jest opracowanie metody szacowania oszczędności energii dla oświetlenia uzupełniającego wynikających z wykorzystania światła naturalnego. Proponowana metoda jest rozwinięciem zaproponowanej metodologii [1] poprzez rozbudowanie wskaźnika TDI o dwa dodatkowe parametry związane z oświetleniem sztucznym: mocy oraz ogólną sprawnością oświetlenia. Są one związane z energochłonnością oświetlenia uzupełniającego a jednocześnie z wymaganiami dotyczącymi spełnienia podstawowych parametrów komfortu wizualnego we wnętrzach budowlanych. Ostateczną postać wskaźnika zdefiniowano jako:

$$TDI_y^x(P, \eta) \quad (1)$$

gdzie:

x - określa położenie danego punktu (w metrach) względem źródła światła dziennego,

y - jest wymaganym natężeniem oświetlenia w luksach,

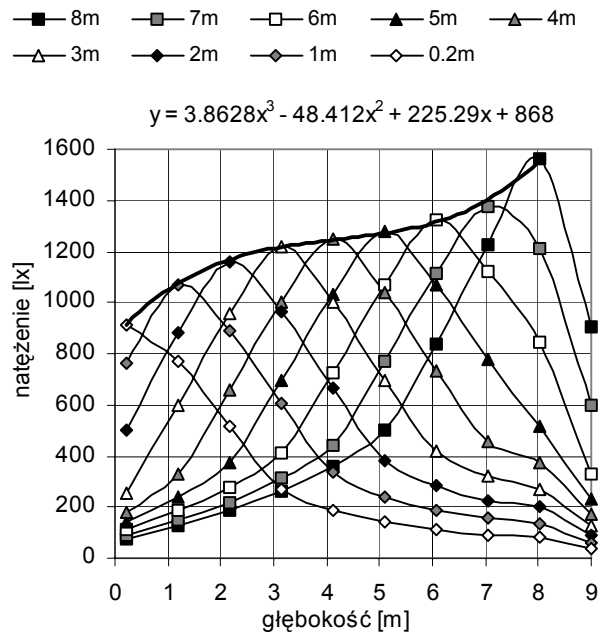
P - jest mocą źródła światła w Watach,

η - jest sprawnością oświetlenia sztucznego.

Proponowane podejście do oceny wykorzystania światła dziennego przy oświetleniu wnętrz nie tylko pozwoli liczbowo określić poziom natężenia oświetlenia w badanym miejscu wnętrza lecz również da odpowiedź jaką ilość światła należy dodatkowo zapewnić poprzez oświetlenie uzupełniające. Dodatkową informacją będzie ilość energii niezbędnej w przypadku zastosowania oświetlenia uzupełniającego, która jest pochodną rozwiązań architektonicznych i materiałowo konstrukcyjnych.

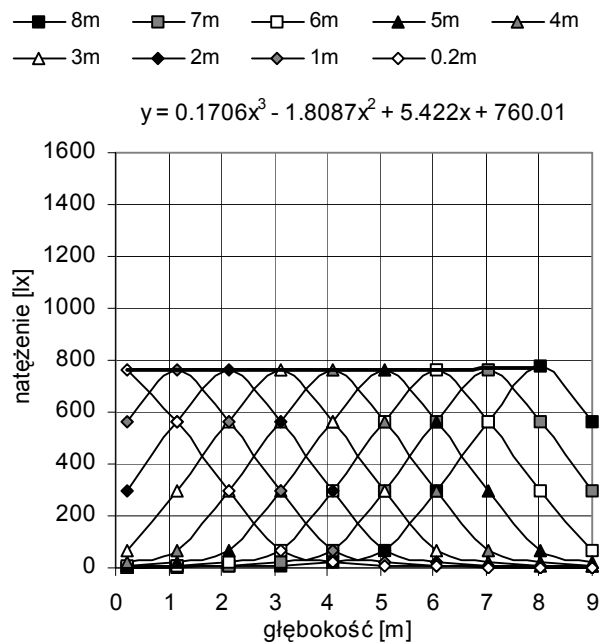
3.1. Wpływ usytuowania opraw

Ze względu na koszty oraz rozwiązania przestrzenne w większości pomieszczeń nie jest możliwe zastosowanie niezależnych systemów oświetlenia sztucznego i uzupełniającego. Niezbędne jest natomiast rozdzielenie systemów sterowania na tryb dzienny i nocny. Sposób rozmieszczenia opraw w systemach oświetlenia uzupełniającego określony jest zawsze poprzez: dostęp w danym punkcie światła dziennego (zależny od parametrów T i D) oraz rozsył światła sztucznego (określony poprzez parametr D bezpośrednio związany z charakterystyką emisyjną powierzchni).



Rys. 1. Rozkład natężenia oświetlenia uzupełniającego dla pojedynczych opraw o sprawności 100% oraz $D=1,0$.

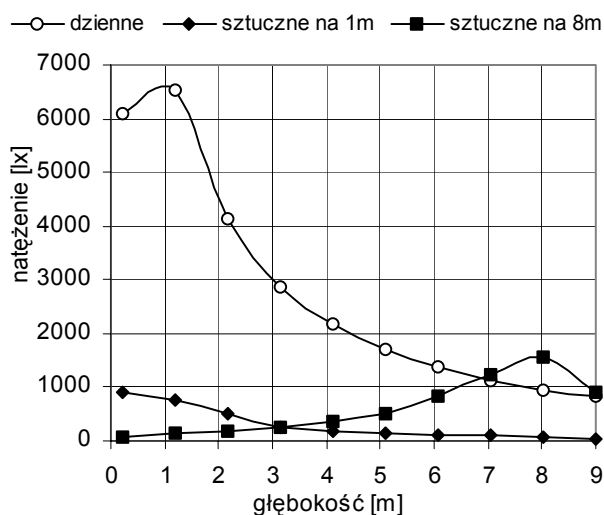
Fig. 1. Illuminance distribution of supplementary light for single luminaire with 100% of efficiency and $D=1,0$.



Rys. 2. Rozkład natężenia oświetlenia uzupełniającego dla pojedynczych opraw o sprawności 100% oraz $D=0,1$.

Fig. 2. Illuminance distribution of supplementary light for single luminaire with 100% of efficiency and $D=0,1$.

Na rysunku 1 pokazano rozkłady natężenia oświetlenia uzupełniającego dla opraw usytuowanych w różnych odległościach od źródła światła dziennego. Charakterystyki odbiciowe dla wszystkich ścian z wyjątkiem okna założono na poziomie $D=1,0$. W przypadku okna parametry przyjęto jak dla czystej szyby. Analizując rozkład wartości ekstremalnych, natężenia oświetlenia we wnętrzu (punkty połączone pogrubioną linią) wyróżnić można dwie charakterystyczne strefy: osłabienia i wzmocnienia natężenia oświetlenia. Zaobserwowane różnice pomiędzy skrajnymi wartościami (punktami położonymi w bezpośrednim sąsiedztwie okna oraz w najgłębszej strefie pomieszczenia) przekraczają 40%. Dla $D=100\%$ zakres zmian określa zależność podana nad wykresem (rys. 1). W przypadku powierzchni wewnętrznych o niższych współczynnikach emisji zaobserwowane różnice pomiędzy skrajnymi punktami będą jednak małe. Zależności przedstawione na rysunku 2 pokazują rozkład natężenia oświetlenia w przypadku bardzo ciemnych powierzchni wewnętrznych (współczynnik przenoszenia światła na poziomie $D=0,1$). Takie rozwiązanie powoduje obniżenie natężenia oświetlenia uzupełniającego dla głębszych części pomieszczenia (wpływ przegrody przeciwległej do okna) nawet o 50% a dodatkowo jej wpływ na dystrybucję światła uzupełniającego jest pomijalny. Przez to znikają różnice w przestrzennym rozkładzie natężenia oświetlenia po głębokości pomieszczenia.



Rys. 3. Rozkład natężenia oświetlenia uzupełniającego dla pojedynczych opraw umieszczonych na 1 i 8 metrze od okna oraz światła dziennego dla $T=100\%$.

Fig. 3. Illuminance distribution of supplementary light for single luminaire at 1st and 8th meter from the window and daylight for $T=100\%$.

Należy również pamiętać, że dla oświetlenia uzupełniającego (tryb dzienny) szyba stanowi zawsze źródło dodatkowego światła naturalnego, rys. 3 (dla $T=1,0$). Doświetlenie wnętrza światłem dziennym zawsze będzie zależne od drugiego składnika wskaźnika TDI niemniej nawet przy najniższych wartościach T , światło dzienne docierające do strefy przyokiennej zapewnia natężenie oświetlenia na poziomie wystarczającym dla wykonywania większości podstawowych czynności (przy $T=0,2$ natężenie oświetlenia $L>500$ lx dla głębokości do 2 m) [2].

Przykładowe wyniki przedstawione na rysunku 3 otrzymano dla przypadku, w którym wszystkie współczynniki korekcyjne C_e , C_b i C_i przyjęto równe 1. Oznacza to, że nie występują żadne dodatkowe zaburzenia w transporcie energii świetlnej z jej źródła do analizowanego punktu. W tym hipotetycznym przypadku natężenie oświetlenia w strefie przyokiennej można uznać za zbyt duże jednak należy pamiętać, że w praktyce nie istnieją tak idealne sytuacje.

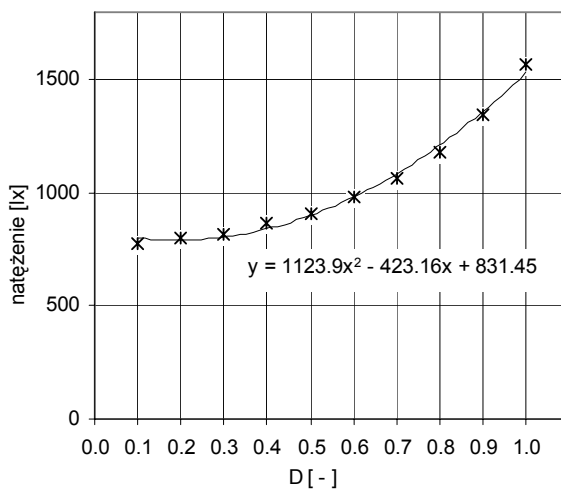
3.2. Wpływ mocy źródła

Prawidłowe, energooszczędne wykorzystanie światła uzupełniającego polega m.in. na właściwie przyjętym systemie sterowania mocą świetlną. Dwa najbardziej podstawowe systemy sterowania polegają na płynnej lub skokowej zmianie mocy świetlnej, a tym samym strumienia świetlnego docierającego do analizowanej płaszczyzny. Pod względem oszczędności energii system płynnej regulacji mocy jest zawsze rozwiązaniem lepszym niż system regulacji skokowej. Dodatkowo mając do dyspozycji kilka opraw możliwe jest zapewnienie równomiernego rozkładu natężenia światła w pomieszczeniu dzięki różnemu wykorzystaniu ich poszczególnych mocy. Łatwiejsze jest też dynamiczne dostosowanie mocy do chwilowych zmian zapotrzebowania na światło np. dla gwałtownych zmian warunków pogodowych.

Na rysunku 4 pokazano poziom natężenia światła uzupełniającego dla różnych mocy źródła dla 100% sprawności. L1.0 oznacza źródło o mocy 150 W, zaś L0.1 odpowiada mocy 15 W. Oprawa oświetleniowa umieszczona została w odległości 8m od źródła światła dziennego przy założeniu współczynnika przenoszenia światła $D=100\%$. Przy przyjętych założeniach poziom natężenia oświetlenia maleje równomiernie o 10%, dla każdej mniejszej o 15 W mocy źródła. Dla współczynników $D=1,0$ oraz $f=1,0$ natężenie oświetlenia uzupełniającego na głębokości 8 m wynosi odpowiednio 1565 lx (przy 150 W) oraz 156 lx (przy 15 W). Natężenie 500 lx zapewnia natomiast źródło światła o mocy 60 W. Należy przy tym pamiętać, że charakterystyka oprawy została dobrana tak, aby zapewnić maksimum skuteczności na analizowanym fragmencie w zakresie szerokości do 1 metra.

3.3. Wpływ przenoszenia światła D

Na rysunkach 5-8 pokazano rozkłady natężenia oświetlenia dla opraw usytuowanych w różnych odległościach od płaszczyzny stanowiącej źródło światła dziennego. Dziesięciokrotne obniżenie emisyjności powierzchni ścian powoduje dwukrotny spadek poziomu natężenia światła bezpośrednio pod oprawą oświetleniową. Największe zmiany poziomu natężenia zaobserwowano dla współczynników przenoszenia D z zakresu $0,7 \div 1,0$. Dla powierzchni o ciemnej kolorystyce ($D=0,1 \div 0,3$) o natężeniu oświetlenia decyduje praktycznie wiązka światła bezpośredniego a zaobserwowane różnice nie przekraczają 5%. Ilustruje to zależność pokazana na rysunku 9.



Rys. 9. Zależność natężenia oświetlenia od współczynnika przenoszenia światła D dla oprawy o mocy 150W.

Fig. 9. Relation between illuminance and distribution coefficient D for 150W luminaires.

W tabelicy 1 pokazano przykładowe wyniki obliczeń mocy oświetlenia uzupełniającego dla oprawy umieszczonej na głębokości 8 m od źródła światła dziennego. Wymagane wartości mocy przypisano dla wymaganego oświetlenia uzupełniającego w zależności od współczynnika przenoszenia światła D. Wartości pisane wytłuszczoną czcionką dotyczą przypadków, w których wymagane moce przekraczają wartości maksymalne 150 W. Na tej podstawie możliwa będzie dalsza ocena energochłonności oświetlenia uzupełniającego dla wymaganego natężenia oświetlenia w pomieszczeniu.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję jednolitego wskaźnika oświetlenia dziennego rozbudowanego o parametry związane z niezbędnym (z punktu widze-

nia natężenia światła) oświetleniem uzupełniającym. Pozwoli na ocenę wykorzystania światła dziennego również pod kątem zapotrzebowania na energię elektryczną do oświetlenia wewnątrz. Jednocześnie wskaźnik TDI stanie się cenne źródło informacji zarówno dla przyszłego użytkownika jak i administratora obiektu.

Zamieszczone, przykładowe wyniki analiz numerycznych dla oświetlenia uzupełniającego pozwolą na określenie wymaganych wartości TDI dla poszczególnych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. Jednocześnie pokazują zasadność stosowania niezależnego systemu oświetlenia uzupełniającego w budynkach użytkowanych głównie w ciągu dnia wraz z odpowiednio dobranym systemem sterowania natężeniem światła sztucznego.

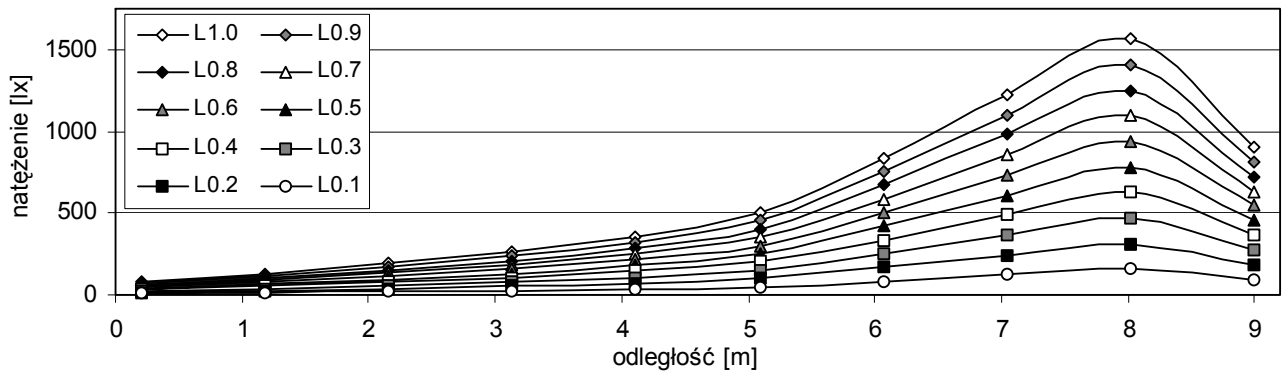
TOTAL DAYLIGHT INDEX – TDI AND REQUIRED SUPPLEMENTARY LIGHTING

Summary: Spatial daylight illuminance in building interiors is a function of daylight transmission, distribution and utilization. All the factors mentioned above, decide on the amount of daylight entering from the outside and migrating to a given point in the room. This amount is determined by glazing/opaque ratio, glazing properties, interior shapes, finishing materials, etc. Total Daylight Index (TDI) is a function of transmission (T) and distribution (D) and can change between 0 and 1 depending on the distance from the daylight source (window). The values of TDI and determined the required level of illuminance (lx) at working plane at a distance (m) from the light source. The main purpose of our study was to find the amount of supplementary light essential for providing required level of illuminance for assumed TDI value. The analyses were done using advanced numerical techniques based on Backward Ray Tracing Method, for Overcast sky conditions. Obtained results show the energy efficient of supporting system and electric power of luminaires. On the other hand the final results could be a guidelines for designers, who would like to analyzed the visual comfort and energy efficient aspects of the building.

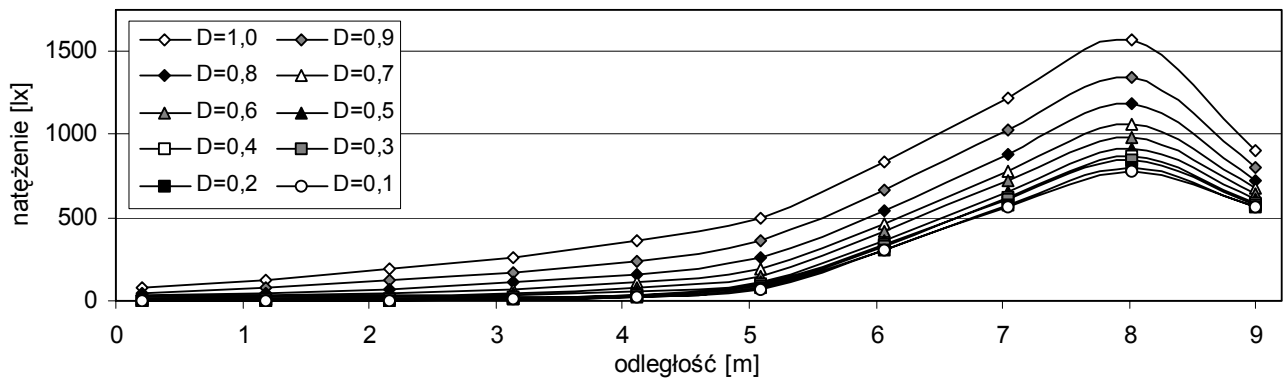
Literatura

- [1] Heim D., Klemm P., Szczepańska E. *Całkowity Wskaźnik Oświetlenia Dziennego – część 1 – metodologia*. Budownictwo Lądowe nr 58, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 601. 52 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB – Krynica 2006, tom II, s. 45-52.
- [2] Heim D., Klemm P., Szczepańska E. Total Daylight Index for the evaluation of visual comfort parameters, *Proceeding of Healthy Buildings 2006, International ISIAQ Conference – Indoor climate*, E. de Oliveira Fernandes, M. Gameiro da Silva, J. Rosado Pinto (ed.), Lisboa, Portugal, 4-8 June 2006

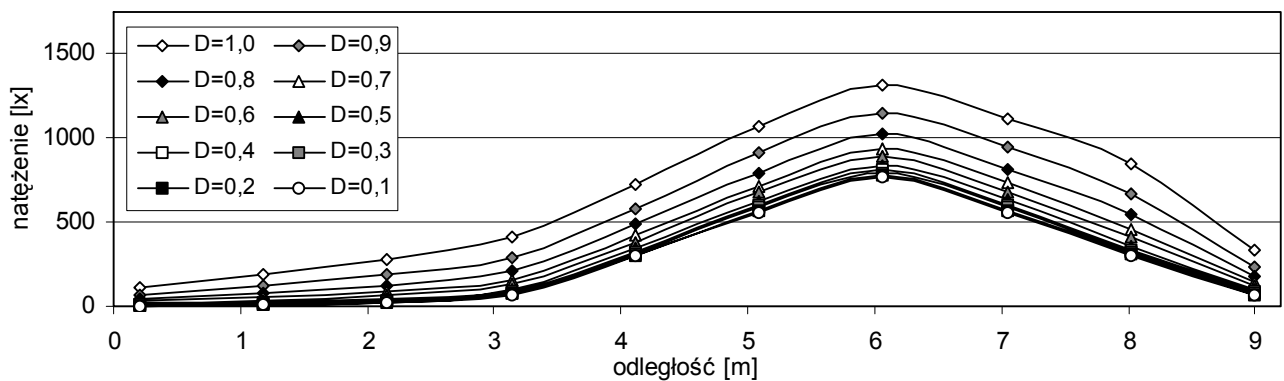
Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007, jako projekt badawczy nr 4 T07E 033 28.



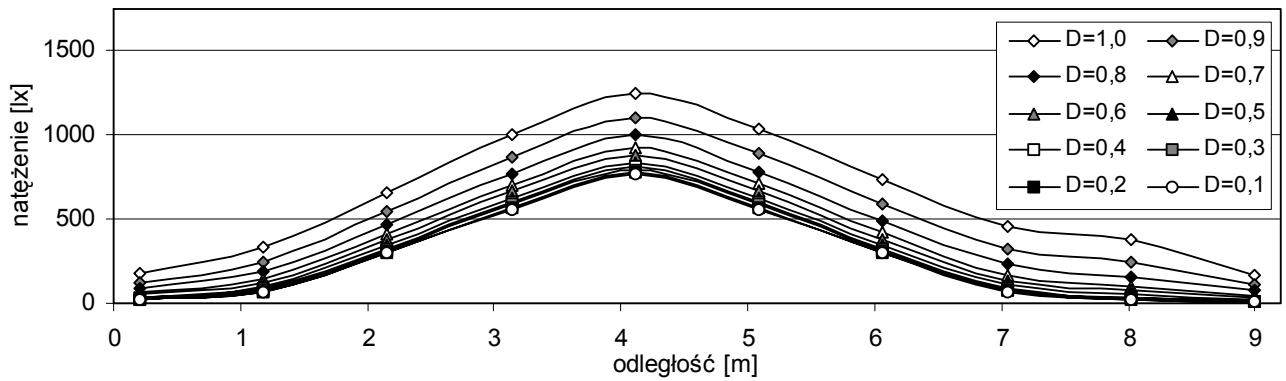
Rys. 4. Rozkład natężenia oświetlenia na 8 metrze dla różnych wydajności opraw, od 10 do 100%.
 Fig. 4. Illuminance distribution at 8th meter for selected efficiency of luminaires, from 10 to 100%.



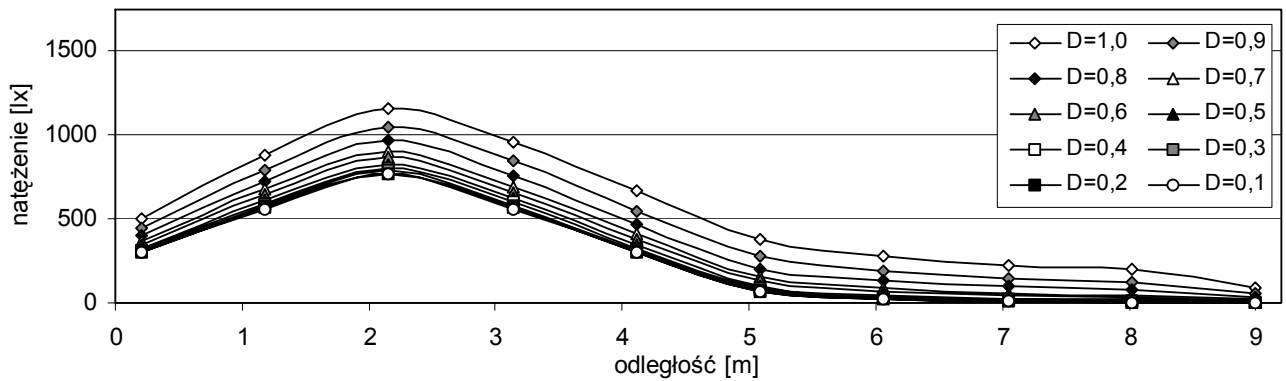
Rys. 5. Rozkład natężenia oświetlenia na 8 metrze dla oprawy o mocy 150W i różnych współczynników przenoszenia D.
 Fig. 5. Illuminance distribution at 8th meter for 150W luminaires and different distribution coefficient D.



Rys. 6. Rozkład natężenia oświetlenia na 6 metrze dla oprawy o mocy 150W i różnych współczynników przenoszenia D.
 Fig. 6. Illuminance distribution at 6th meter for 150W luminaires and different distribution coefficient D.



Rys. 7. Rozkład natężenia oświetlenia na 4 metrze dla oprawy o mocy 150W i różnych współczynników przenoszenia D.
 Fig. 7. Illuminance distribution at 4th meter for 150W luminaires and different distribution coefficient D.



Rys. 8. Rozkład natężenia oświetlenia na 2 metrze dla oprawy o mocy 150W i różnych współczynników przenoszenia D.
 Fig. 8. Illuminance distribution at 2th meter for 150W luminaires and different distribution coefficient D.

Tabela 1. Wymagane moce opraw dla oświetlenia uzupełniającego przy 100% sprawności na głębokości 8 m.
 Table 1. Required power input for supplementary lighting with 100% efficiency at the depth of 8 m.

Moc źródła światła na głębokości 8 m [W]		Współczynnik przenoszenia D [-]									
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Oświetlenie uzupełniające [lux]	1000	105	120	135	150	165	165	180	180	195	195
	900	90	105	120	135	150	150	165	165	180	180
	800	90	90	105	120	135	135	150	150	150	165
	700	75	90	90	105	120	120	135	135	135	135
	600	60	75	90	90	105	105	105	120	120	120
	500	60	60	75	75	90	90	90	105	105	105
	400	45	45	60	60	75	75	75	75	75	90
	300	30	45	45	45	60	60	60	60	60	60
	200	30	30	30	30	45	45	45	45	45	45
100	15	15	15	30	30	30	30	30	30	30	