

OŚWIETLENIE WNĘTRZ MIESZKALNYCH ŚWIATŁEM DZIENNYM – STUDIUM PRZYPADKU

D. Heim¹, E. Szczepańska¹

1. Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Politechnika Łódzka

STRESZCZENIE

W pracy omówiono zasady obliczeń numerycznych oraz podstawowe założenia metody Wstecznego Śledzenia Promienia, wykorzystywanej do wyznaczania natężenia oświetlenia lub luminancji. W skrócie opisano zasady modelowania oświetlenia dziennego. Przedstawiono przykładowy model obiektu, pomieszczenia w budynku wielorodzinnym, dla którego przeprowadzono serię obliczeń symulacyjnych. Na podstawie otrzymanych wyników sformułowano podstawowe wnioski wynikające z analizy zastosowania wybranych rozwiązań mających na celu poprawę parametrów komfortu wizualnego.

WPROWADZENIE

Zaawansowane metody numeryczne pozwalają na dokładne prognozowanie fizycznego zachowania się budynku już na etapie projektowym. Ma to szczególnie duże znaczenie przy projektowaniu budynków o wysokim standardzie użytkowym, z uwzględnieniem ich energooszczędnego charakteru i wyposażonych w zaawansowane systemy sterowania. Istotnymi cechami tego typu obiektów są wysokie warunki komfortu ich przyszłych mieszkańców, w tym elementy związane z oświetleniem pomieszczeń. Szczególnie istotne przy projektowaniu jest zwrócenie uwagi na maksymalne wykorzystanie światła dziennego. Emituje ono bowiem dwa razy więcej promieniowania żółto-zielonego (odznaczającego się najlepszą widzialnością z całego zakresu promieniowania widzialnego) niż światło żarówki, które emituje o 2/3 więcej promieniowania czerwonego niż naturalne. Dlatego praca i wypoczynek przy świetle sztucznym są znacznie mniej korzystne niż przy oświetleniu naturalnym. Ponadto niewłaściwie zaprojektowane oświetlenie, w dłuższym okresie pogarsza samopoczucie osób i wpływa na ich prawidłowe funkcjonowanie poprzez: szybsze zmęczenie, łzawienie spojówek, zmniejszenie zdolności akomodacji soczewki oka, zmniejszenie ostrości widzenia i postrzegania oraz pogorszenie ogólnego samopoczucia. Aby zapewnić odpowiednią ilość światła dziennego w pomieszczeniu, należy właściwie zaprojektować przede wszystkim wielkość, rodzaj i umiejscowienie otworów okiennych. Ilość światła naturalnego dochodzącego do wnętrza pomieszczenia, oprócz wielkości okien, zależy od ich kształtu, wzniesienia nad poziom podłogi, głębokości pomieszczenia i jego proporcji oraz od przeszkód

zmniejszających dopływ światła, a ponadto czynników warunkujących wpływ światła odbitego. Ze względu na złożoność zjawisk związanych z oświetleniem wnętrza światłem naturalnym niezbędne jest korzystanie z zaawansowanych modeli obliczeniowych w celu prawidłowego wyznaczenia natężenia oświetlenia i luminancji w budynkach (Larson G.W., Shakespeare R., 1998). Uzyskane w ten sposób wyniki mogą być pomocne przy poszukiwaniu optymalnego rozwiązania przegród zewnętrznych budynków.

ALGORYTM OBLICZENIOWY

Wykorzystany do analizy pakiet Desktop Radiance korzysta z algorytmu zwanego metodą śledzenia promienia wstecznego (*backward ray tracing*) (Larson G.W., Shakespeare R., 1998). Metoda ta jest często stosowana w grafice komputerowej i polega na wysyłaniu promieni światła od oka obserwatora do obiektów sceny. Podejście to posiada jedną istotną zaletę. Pozwala uwzględniać w analizie jedynie te promienie świetlne, które docierają do punktu obserwacji, nie zaś wszystkie promienie wysyłane przez źródło światła. Ma to aspekt czysto ekonomiczny ponieważ wpływa na wielokrotne skrócenie czasu trwania obliczeń.

W metodzie tej najpierw wybierany jest środek rzutowania (oko obserwatora) oraz umieszczone na dowolnej rzutni – pole wizualizacji. Pole to jest podzielone regularną siatką (siatka o zadanej rozdzielczości), której elementy odpowiadają pikselom. Następnie z środka rzutowania przez każdy z pikseli jest emitowany promień w kierunku sceny w celu określenia przecięcia obiektu z promieniem. Niektóre z promieni mogą przecinać więcej niż jeden obiekt (np. gdy obiekty ustawione są jeden za drugim) lecz widoczny dla obserwatora jest wyłącznie punkt przecięcia najbliższy środka rzutowania (Rys. 1a).

Algorytm w wersji rekurencyjnej pozwala na połączenie wyznaczania powierzchni widocznych z cieniowaniem. Jest to skończona metoda rekurencyjna ponieważ w innym wypadku zaczęty rendering obrazu nigdy by się nie zakończył. W celu obliczenia cieni wysyłany jest dodatkowy promień z punktu przecięcia promienia z obiektem w kierunku każdego źródła światła (rys 1 b). Jeżeli jeden z tych promieni cieni przetnie na swojej drodze (do źródła) inny przedmiot, to obiekt w danym punkcie jest w obszarze cienia.

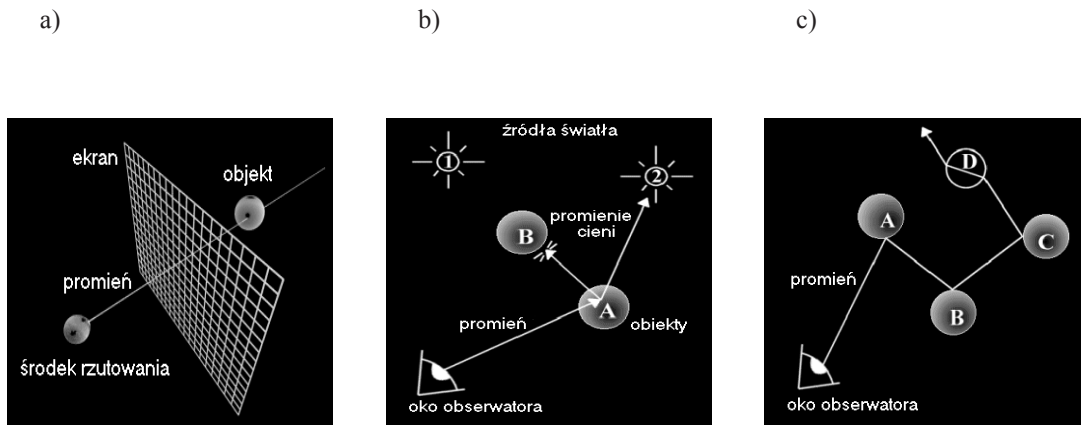
Obok promieni do wyznaczania cieni algorytm rekurencyjny wysyła warunkowo z punktów przecięcia promienie odbite i promienie załamane. Obiekty mogą bowiem odbijać zwierciadlanie lub być przezroczystymi (bez całkowitego odbicia wewnętrznego). W obu przypadkach są generowane dodatkowe promienie, w pierwszym odbity, w drugim do wewnątrz załamany (rys. 1c).

Jeżeli powierzchnia jest refleksyjna np. jak lustro to promień jest odbijany od powierzchni symetrycznie względem normalnej do powierzchni w kierunku R. Dla obiektów przezroczystych wysyłany jest promień załamany do wnętrza obiektu. Każdy z odbijanych i załamanych promieni może z kolei rekurencyjnie wysyłać z kolejnych punktów przecięcia promienie do wyznaczania cieni S oraz promienie odbite i załamane (rys. 2a).

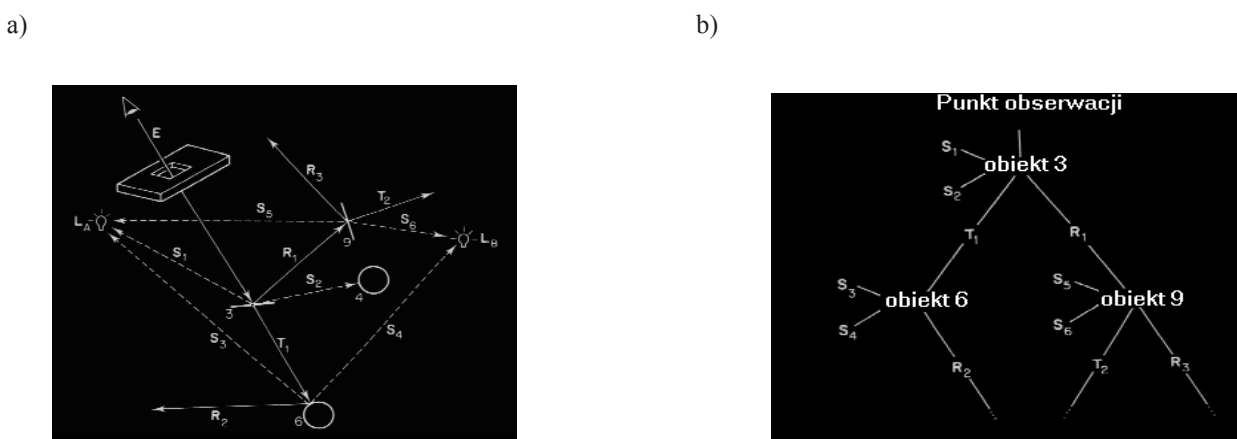
Promienie do wyznaczania cieni, odbite i załamane są nazwane wtórnymi promieniami, zaś wychodzące z oka obserwatora pierwotnymi.

Promienie tworzą „drzewo” promieni, którego węzłom odpowiadają punkty przecięcia (rys. 2b). W punktach tych oblicza się barwę oraz natężenie światła według odpowiednich modeli oświetlenia. Ponieważ algorytm ten działa w nieskończoność więc:

- można zatrzymać obliczenia, gdy promienie odbite i załamane nie przecinają obiektu, a osiągnięto z góry zadana pewną wartość dokładności obliczeń (algorytm Whitteda) (Foley J.D., Andries Van Dam i in. , 2001),
- można zatrzymać obliczenia gdy zostaną przekroczone możliwości systemu.



Rys.1 a) wyznaczenie powierzchni widocznych, b) zasada wyznaczania cienia, c) odbicie i załamanie promieni.



Rys.2 a) rekurencyjne wysyłanie promieni,

b) drzewo promieni

Podstawowe równanie pozwalające wyznaczyć wartość luminancji lub natężenia promieniowania w programie Radiance za pomocą metody śledzenia promienia ma postać:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_e + \iint L_i(\theta_i, \phi_i) f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) |\cos\theta_i| \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

gdzie:

- θ – kąt padania promienia świetlnego mierzony względem płaszczyzny stycznej do obiektu;
- ϕ – azymut – kąt dwuścienny mierzony w płaszczyźnie stycznej do obiektu;
- L_r – luminancja lub natężenie promieniowania świetlnego na powierzchni analizowanego obiektu w danym punkcie;
- L_e – luminancja lub natężenie promieniowania świetlnego emitowanego przez źródło światła;
- L_i – luminancja lub natężenie promieniowania świetlnego docierającego do obiektu;
- f_r – funkcja dwukierunkowa wiążąca przepuszczalność i odbicie światła od powierzchni analizowanego obiektu w danym punkcie;

Funkcją $L_r(\theta_r, \phi_r)$ jest niejako funkcją określającą samą siebie przez fakt, że każda powierzchnia emituje lub odbija promieniowanie świetlne w kierunku innej powierzchni. W ten sposób równanie (1) uwzględnia rekurencyjną naturę procesu śledzenia promienia. Wyznaczenie wartości oświetlenia w jednym punkcie powoduje jego zmianę w innym. Proces powtarzany jest wielokrotnie aż do momentu kiedy spełniony jest jeden z następujących warunków:

- powierzchnia „przecięta” jest źródłem światła,
- liczba odbić promienia świetlnego przekroczyła określoną, graniczną wartość,
- ”waga” promienia, będąca wynikiem wcześniejszych odbić, jest poniżej ustalonej wartości granicznej.

ANALIZOWANY PRZYPADEK BUDYNKU MIESZKALNEGO

Analizie poddano silnie przeszklony pokój mieszkalny, przeznaczony do pobytu w ciągu dnia i zlokalizowany w budynku położonym w Polsce Środkowej. Koncepcja architektoniczna zakłada pełne przeszklenie jednej ze ścian zapewniające doskonały kontakt użytkownika ze środowiskiem zewnętrznym. W stanie wyjściowym przeszklenie nie posiada żadnych elementów zaciemniających. Jako miejsce pomiarowe przyjęto punkt na wysokości 1m w odległości 2m od ściany doświetlającej.

Obliczenia w programie Desktop Radiance dokonano dla 1 stycznia, 21 marca, 22 czerwca, 1 sierpnia oraz 23 grudnia dla godzin 6⁰⁰, 8⁰⁰, 10⁰⁰, 12⁰⁰, 14⁰⁰, 16⁰⁰, 18⁰⁰, 20⁰⁰, 22⁰⁰. Symulacje przeprowadzono dla długości i szerokości geograficznej oraz dla strefy czasowej odpowiadającej Warszawie. Dodatkowo

przyjęto zorientowanie okien w kierunku południowym, współczynnik zmętnienia atmosfery według Linkego (Linke F., 1922) dla klimatu umiarkowanego dla miasta równy 3,75 oraz typ nieba częściowo zachmurzonego. Wyniki obliczeń dla innych przypadków, w tym różnych typów nieba przedstawiono m.in. w (Heim D., Klemm P., Szczepańska E., 2003)

SFORMUOWANIE PROBLEMU I WYBÓR WARIANTÓW

Ściany doświetlające projektowane pod kątem maksymalnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego zimą oraz ochrony przed przegrzewaniem latem wymagają stosowania zaawansowanych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. O ile zimą wskazana jest maksymalna penetracja promieni słonecznych do wnętrza obiektu to latem zaleca się ograniczenie oddziaływania promieniowania słonecznego na przegrody wewnętrzne. Dlatego też, celem wielu prac naukowo-badawczych jest opracowanie takiej metody optymalizacji cech fizycznych budynków aby uwzględniały jak najwięcej czynników mających wpływ na komfort ich użytkowania (Dude E., Heim D. i in., 2009). Stosowanie rozwiązań chroniących przed przegrzewaniem, takich jak szyby o podwyższonej refleksyjności lub absorpcyjności czy elementy zaciemniające w postaci różnego rodzaju żaluzji wpływają także na natężenie i równomierność rozkładu oświetlenia we wnętrzu pomieszczenia. W celu przeanalizowania wpływu różnych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na natężenie oświetlenia w budynku przyjęto następujące warianty:

wariant 1 – różne rodzaje oszklenia:

- 1) szyba 1, T=77,5% R= 3,8%
- 2) szyba 2, T=45,2% R= 4,9%
- 3) szyba 3, T=22,0% R=24,0%

gdzie T jest współczynnikiem przepuszczania a R współczynnikiem odbicia światła;

wariant 2 – ograniczenie przeszklenia (dla szyby 1) do 15 % powierzchni podłogi, obliczenia dla szyby 1;

wariant 3 – zaciemnianie wewnętrznymi żaluzjami o szerokości 10cm i kącie otwarcia 30°:

- a) pionowe,
- b) poziome,

obliczenia dla szyby 1;

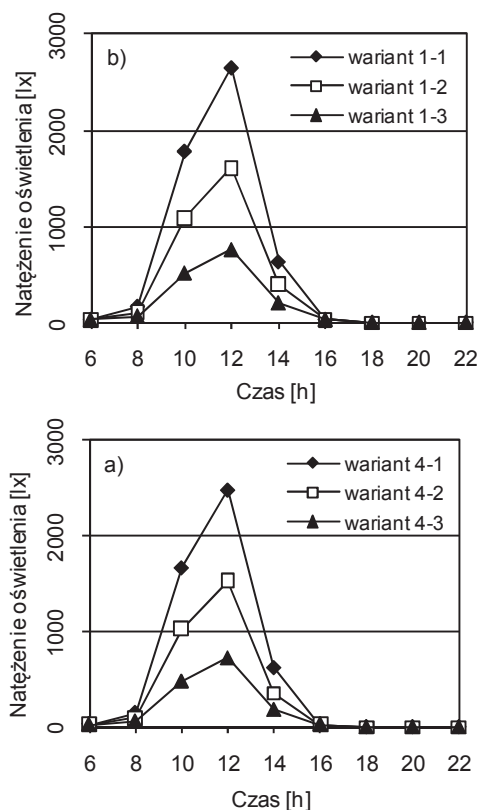
wariant 4 – zaciemnianie zewnętrzną płytą balkonową, półką zewnętrzną nad analizowanym oknem, obliczenia dla szyb 1,2,3.

WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Dla potrzeb niniejszej pracy wykonano obliczenia natężenia oświetlenia dziennego w wybranym punkcie pomieszczenia. Na rysunkach 3-4 przedstawiono dobowe zmiany natężenia oświetlenia w wybranym punkcie dla poszczególnych wariantów. Rysunek 3a przedstawia wyniki obliczeń wykonanych dla 1 stycznia przy różnych typach oszklenia. Zastosowanie szyb o obniżonej przepuszczalności

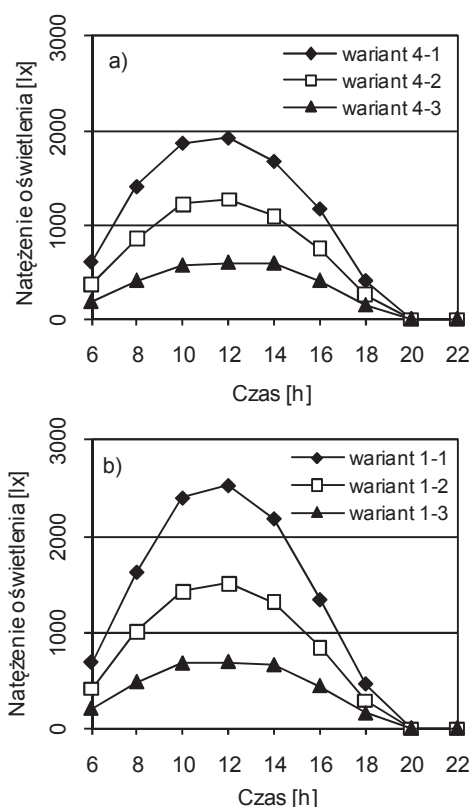
promieniowania słonecznego powoduje spadek natężenia oświetlenia w pomieszczeniu. Różnice te są szczególnie odczuwalne w przypadku oświetlenia promieniowaniem bezpośrednim (godziny od 10 do godziny 13).

Przykładowo, w przypadku trzeciego rodzaju oszklenia (szyba 3), zaobserwowano najmniejsze dobowe zmiany natężenia oświetlenia, które w południe osiąga wartości 750 lx. Ponadto dla 1 stycznia nie zaobserwowano zacinienia płytą balkonową (rys.3) która wpływa, zwłaszcza w wariancie z szybą 1, na zmianę natężenia oświetlenia latem – 1 sierpnia (rys. 4). Ostatni wniosek potwierdza również dzienny rozkład natężenia oświetlenia (rys. 5b) na którym dodatkowo pokazano wpływ ograniczenia przeszklenia do 15% powierzchni podłogi (wariant 2), co powoduje zmniejszenie natężenia oświetlenia w punkcie pomiarowym o około 1/3. Zastosowanie żaluzji, w szczególności zewnętrznych, daje z reguły bardzo dobrą ochronę przed przegrzewaniem w okresie lata, jednak związany z nim spadek natężenia oświetlenia (rys. 5a) we wnętrzu pozwala na wykonywanie prac jedynie mało precyzyjnych. W przypadku czynności wymagających większego natężenia oświetlenia, zastosowanie żaluzji może powodować konieczność dodatkowego oświetlenia światłem sztucznym. Powstałe w ten sposób światło mieszane jest niekorzystne ze względów zdrowotnych dla przebywających w pomieszczeniu osób i pogarsza warunki ich komfortu.



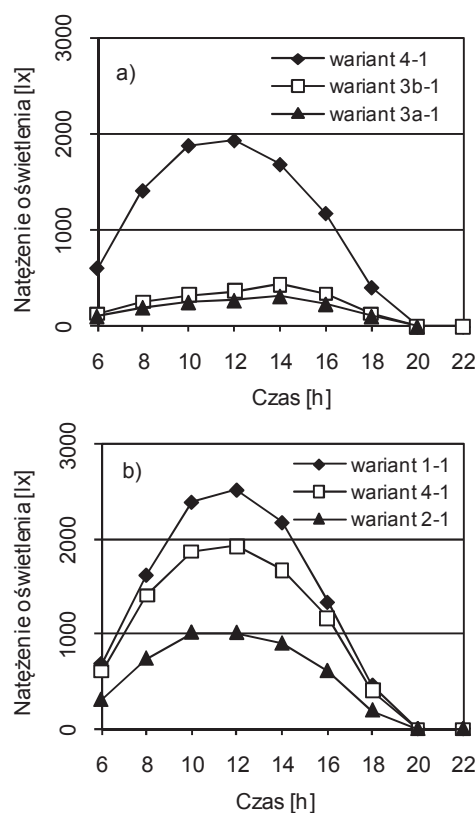
Rys. 3. Dobowe zmiany natężenia oświetlenia dla różnego rodzaju przeszkleń dla zimy

a) z płytą balkonową, b) bez płyty balkonowej



Rys. 4. Dobowe zmiany natężenia oświetlenia dla różnego rodzaju przeszkleń dla lata

a) z płytą balkonową, b) bez płyty balkonowej

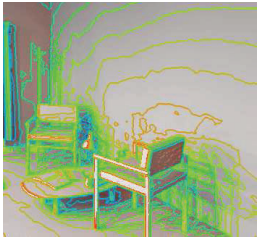


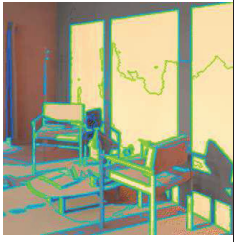
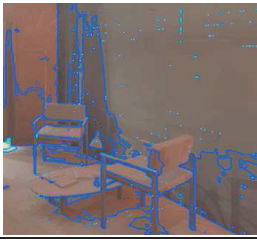

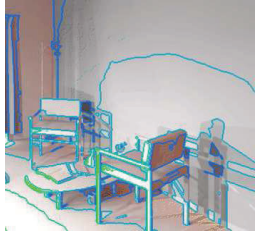
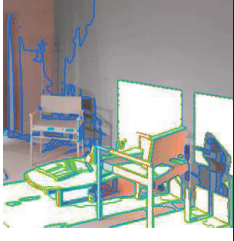


Rys. 5. Dobowe zmiany natężenia oświetlenia w analizowanym punkcie dla lata:

a) z zastosowaniem żaluzji b) z ograniczeniem przeszklenia

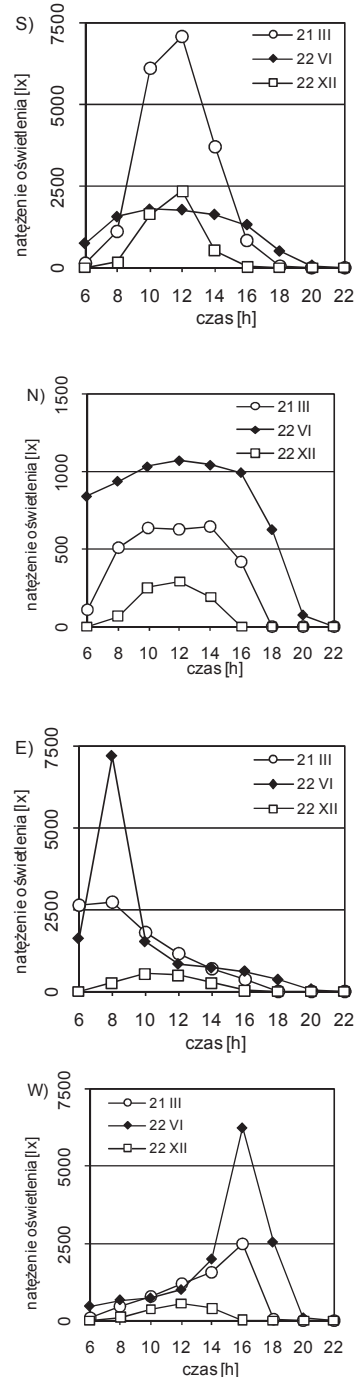
Drugim istotnym parametrem opisującym jakość środowiska wewnętrznego z uwagi na komfort wizualny jest rozkład luminancji w pomieszczeniu. Na rysunku 6 a-c pokazano rozkład luminancji we wnętrzu dla wybranych przypadków. Jak wynika z analizy obrazów zjawisko zbyt dużych kontrastów występuje jedynie w okresie zimy. Dość skutecznym rozwiązaniem ograniczającym kontrast luminancji jest zastosowanie szyby o obniżonej zdolności do przepuszczania promieniowania widzialnego. Zastosowanie żaluzji całkowicie eliminuje zjawisko kontrastu.

Tabela 1. Rozkład luminancji w miejscu wypoczynku dla wybranych wariantów

	Lato	Zima
podstawowy szyba 1		
podstawowy szyba 3		
żaluzje szyba 1		
Ograniczenie powierzchni szyba 1		

Dodatkowo, dla trzech wybranych dni roku, najdłuższego, najkrótszego oraz równonocy, przeprowadzono analizy wpływu orientacji względem stron świata na zmianę natężenia oświetlenia w badanym punkcie wnętrza. W porównaniu do orientacji południowej ekstrema o podobnej wartości pojawiają się dla pomieszczenia skierowanego na wschód i zachód. We wszystkich trzech przypadkach

natężenie osiąga prawie 7500 lx, co jest wartością nieco nad górną granicą komfortu wizualnego. Dla orientacji północnej wartość 500 lx spełniona jest w okresie od wiosny do jesieni, w godzinach 8:00÷15:00. W zimie, przez całą dobę jest ona niższa osiągając maksymalnie ok. 300 lx. Jednocześnie widoczny jest wyraźny brak promieniowania bezpośredniego co z jednej strony eliminuje niekorzystne kontrasty, z drugiej zaś daje niewielkie wartości natężenia oświetlenia na płaszczyznach poziomych.



Rys. 6. Wpływ orientacji fasady na zmianę natężenia oświetlenia w badanym punkcie S) południowa, N) północna, E) wschodnia, W) zachodnia.

WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia i analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu jest zależny od: zewnętrznych elementów zacieniających, wielkości i rodzaju przeszkleń, konstrukcji okien i żaluzji.
2. Występowanie płyty balkonowej, dla orientacji południowej, nie ma wpływu na zacienianie pomieszczenia w okresie zimy (swobodna penetracja promieniowania słonecznego) natomiast wpływa na ograniczenie natężenia oświetlenia w okresie lata.
3. Wpływ różnego rodzaju przeszkleń jest podobny zarówno dla zimy jak i lata i związany jest ze zmniejszeniem natężenia promieniowania świetlnego wprost proporcjonalnie do współczynników optycznych charakteryzujących szkło.
4. Zastosowanie pionowych lub poziomych przesłon w postaci żaluzji o kącie otwarcia 30° sprawia, że do wnętrza dociera jedynie promieniowanie rozproszone.
5. W przypadku obu rodzajów żaluzji maksymalne natężenie oświetlenia we wnętrzu osiąga wartości od 300 do 400 lx co dla pewnych czynności wymaga dodatkowego doświetlenia światłem sztucznym.
6. Ograniczenie przeszkleń do 15% powierzchni podłogi zmniejsza o 1/3 natężenie oświetlenia w punkcie pomiarowym, jednak jego wartość (do 1000 lx) nadal pozwala na wykonywanie czynności precyzyjnych.
7. Orientacja pomieszczenia względem stron świata wpływa zarówno na jakościowy jak i ilościowy rozkład natężenia oświetlenia w pomieszczeniu.

LITERATURA CYTOWANA

- Larson G.W., Shakespeare R., *Rendering with Radiance – The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufman Publishers Inc., San Francisco, California, 1998.
- Foley J.D., Andries Van Dam, Feiner S.K., Hughes J.F., Phillips R.L., *Wprowadzenie do grafiki komputerowej*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2001.
- Linke F., *Transmissions-Koeffizient und Trubungsfaktor*, *Beitr. Phys. Fr. Atmos.* 10, 91-103, 1922.
- Heim D., Klemm P., Szczepańska E., *Wpływ warunków zewnętrznych i usytuowania budynku na rozkład natężenia oświetlenia dziennego w pomieszczeniu*, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź-Słok, 2003.
- Dude E., Heim D., Jędrzejuk H., Klemm K., Marks W., Walerian E.: *Problem optymalizacji wielokryterialnej budynków mieszkalnych z zastosowaniem kryteriów ekonomicznych, komfortu wewnętrznego oraz ochrony środowiska*. W: Materiały XII Konferencji Naukowo-Technicznej Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź-Słok, 2009, s. 45-48.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2008-2011, jako projekt badawczy nr 3989/B/T02/2008/35 „Wielokryterialna optymalizacja budynków mieszkalnych z uwzględnieniem kryteriów: ekonomicznych, ochrony środowiska oraz komfortu w okresie całego roku”.