

## PRZYKŁAD MODELOWANIA CIEPLNEGO BUDYNKÓW

Mariusz ADAMSKI\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wybrane wyniki modelowania zjawisk związanych z wymianą ciepła projektowanego budynku a otoczeniem, za pomocą niekomercyjnego programu HEED.

*Słowa kluczowe:* budynek, modelowanie, energia, ciepło.

### 1. Wprowadzenie

Ze względu na ciągły wzrost cen nośników energii, jak również postęp w technice komputerowej obserwuje się dynamiczny rozwój oprogramowania przeznaczonego do modelowania zjawisk cieplnych zachodzących w budynkach istniejących i projektowanych. Budynki zużywają znaczącą część energii (rzędu 40%) w bilansie energetycznym kraju. Celem tego artykułu jest prezentacja możliwości obliczeniowych niekomercyjnego programu HEED przeznaczonego do symulowania zjawisk związanych z przepływem energii w trakcie eksploatacji budynku. Program został opracowany i jest rozwijany przez Wydział Architektury i Urbanistyki na Uniwersytecie Kalifornijskim w Los Angeles. Strona programu [www.energy-design-tools.aud.ucla.edu](http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu) zawiera link umożliwiający jego pobranie. Aktualnie dostępna jest wersja 4.0 (build 15) z kwietnia 2011 roku. Za pomocą tego programu można uzyskać informacje o możliwościach zaoszczędzenia paliw oraz środków finansowych, analizując między innymi różne rozwiązania projektowe ochrony cieplnej budynku. Program ten jest prosty w obsłudze, ma przyjacielski graficzny interfejs użytkownika napisany w środowisku Java w programie C, umożliwiając w szybki sposób wprowadzenie danych do obliczeń. Aktualnie nie ma możliwości wykonania obliczeń i uzyskania wyników w systemie miar SI.

Uwzględniając typowe roczne warunki klimatyczne dla danej miejscowości, program umożliwia symulację stanów termicznych budynku lub wybranych pomieszczeń, oszacowanie kosztów zużywanej energii oraz określenie temperatur wewnętrznych przy założonej wydajności i harmonogramie pracy urządzeń grzewczych i wentylacyjnych. Uzyskane wyniki wskazują na możliwości zaoszczędzenia środków finansowych wskutek termorenowacji obiektu. Program ten można również zastosować do modelowania budynków nowo

projektowanych. W wynikach obliczeń zawarte są również informacje o emisji gazów szkodliwych oraz cieplarnianych ( $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ), emisji pyłów oraz aktywnych substancji organicznych dla różnych wariantów danych. Z chwilą uruchomienia programu włącza się przewodnik demonstrujący możliwości programu i wskazujący sposób pracy z programem.

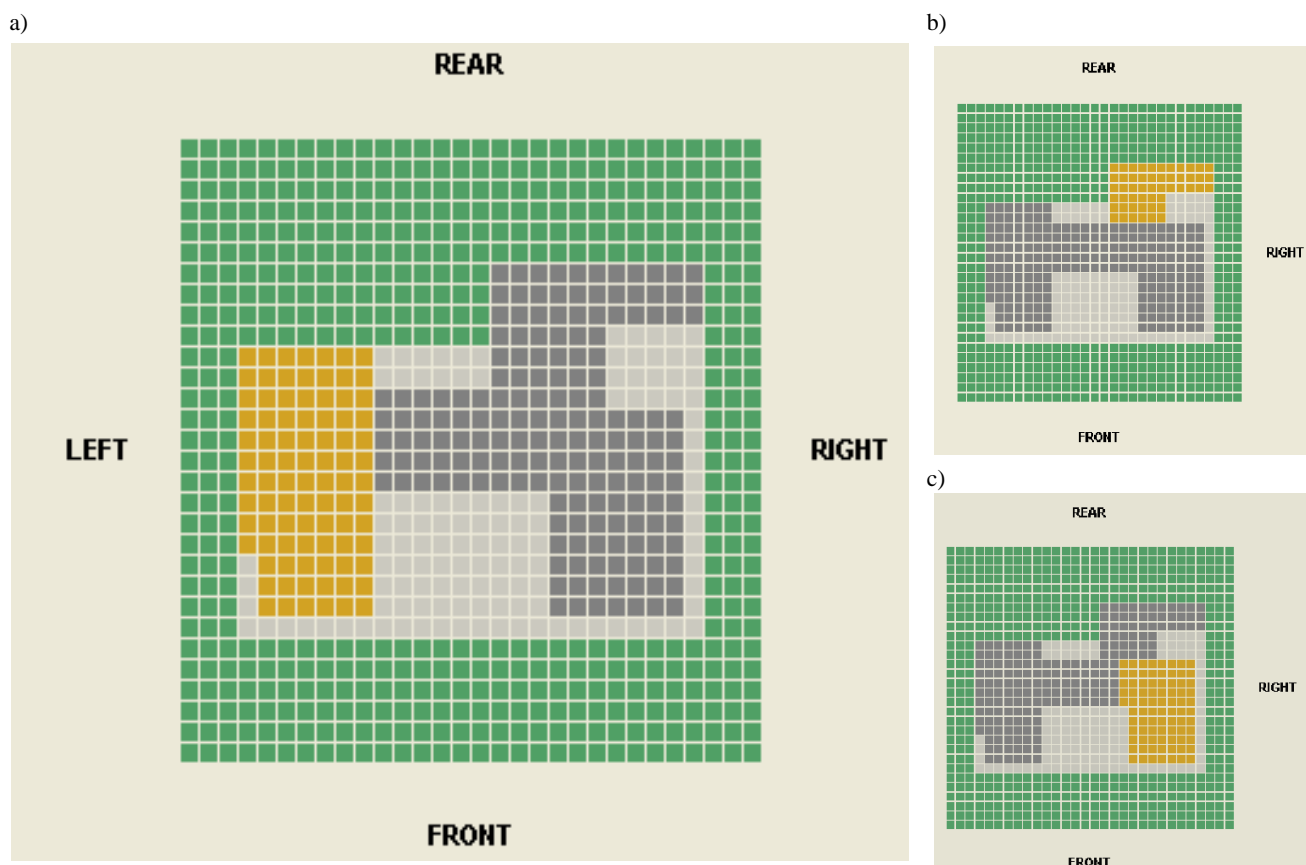
### 2. Przykład analizy cieplnej budynku za pomocą programu HEED

Program umożliwia wrysowanie rzutu budynku (rys. 1) za pomocą modułowych kwadratów o boku 4 ft (około 1,21 m). Następnie należy z dostępnego menu wybrać właściwy typ okien i umieścić poszczególne okna na elewacji. W tabelach należy podać wymiary okien i głąbów. W dalszych krokach deklaruje się standard izolacyjności budynku oraz wybiera się rodzaj ścian zewnętrznych. Z listy typowych ścian, konstrukcji dachu i podłóg wybiera się odpowiedni rodzaj przegrody.

Program ma wbudowane wskaźniki *California Energy Code*. Na podstawie dołączonego pliku z danymi klimatycznymi program znajduje klimat najbardziej zbliżony do wskazanej lokalizacji budynku zawarty w katalogu wewnętrznym o nazwie „tmy” i dobiera wymagany w danej strefie klimatycznej opór cieplny przegród.

Grubość warstw izolacyjnych może zostać zwiększona przez program w trakcie obliczeń. Dobrane przez program grubości warstw izolacyjnych wraz z przyjętymi stałymi czasowymi oraz współczynnikami tłumienia światła są na ekranie zatytułowanym „Surface Area”; tu możliwa jest korekta przyjętych lub obliczonych przez program wartości opisujących cieplne właściwości statyczne i dynamiczne przegród nieprzeźroczystych. Podawane są również powierzchnie poszczególnych przegród,

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: [mariusz.adamski@pb.edu.pl](mailto:mariusz.adamski@pb.edu.pl)



Rys. 1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie próbek formowanych i dojrzewających pod wodą

a w przypadku okien – współczynniki przeźroczystości.

Na kolejnych ekranach wprowadza się harmonogram korzystania z oświetlenia, wymiary i grubości przegród wewnętrznych, przewidywaną liczbę mieszkańców, dane związane z podgrzewaniem wody, systemem wentylacyjnym i wentylatorami, kotłem oraz rodzajem paliwa. Następną planszą ze wskaźnikami zanieczyszczeń:  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , pyły ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\leq 10\mu\text{m}$ ), gazy reaktywne (*Reactive Organic Gases* – *ROG*),  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  umożliwia również wprowadzanie innych wielkości przyjętych z innych źródeł.

Wyniki obliczeń symulacyjnych budynku wielorodzinnego wykonane programem HEED przedstawiono na rysunkach w dalszej części pracy.

Obliczenia wykonano dla jednego z trzech niemal identycznych pięciokondygnacyjnych budynków mieszkalnych w Hanowerze. Kondygnacja budynku obejmuje mieszkania oraz klatkę schodową, zaś podziemia zajmują garaże. Budynek jest obiektem o dużym przeszkleeniu, niektóre okna zajmują całą wysokość kondygnacji. Ściany zewnętrzne są wielowarstwowe. Warstwy nośne ścian zewnętrznych zbudowano z pustaków ceramicznych Proton Block-T 24, zaś warstwy osłonowe izolacji cieplnej z pustaków ceramicznych Proton-T9 wypełnionych perlitem jako materiałem termoizolacyjnym. Warstwy nośne oraz osłonowe oddzielono warstwą wełny mineralnej o grubości 2 cm. Wartość współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych wynosi

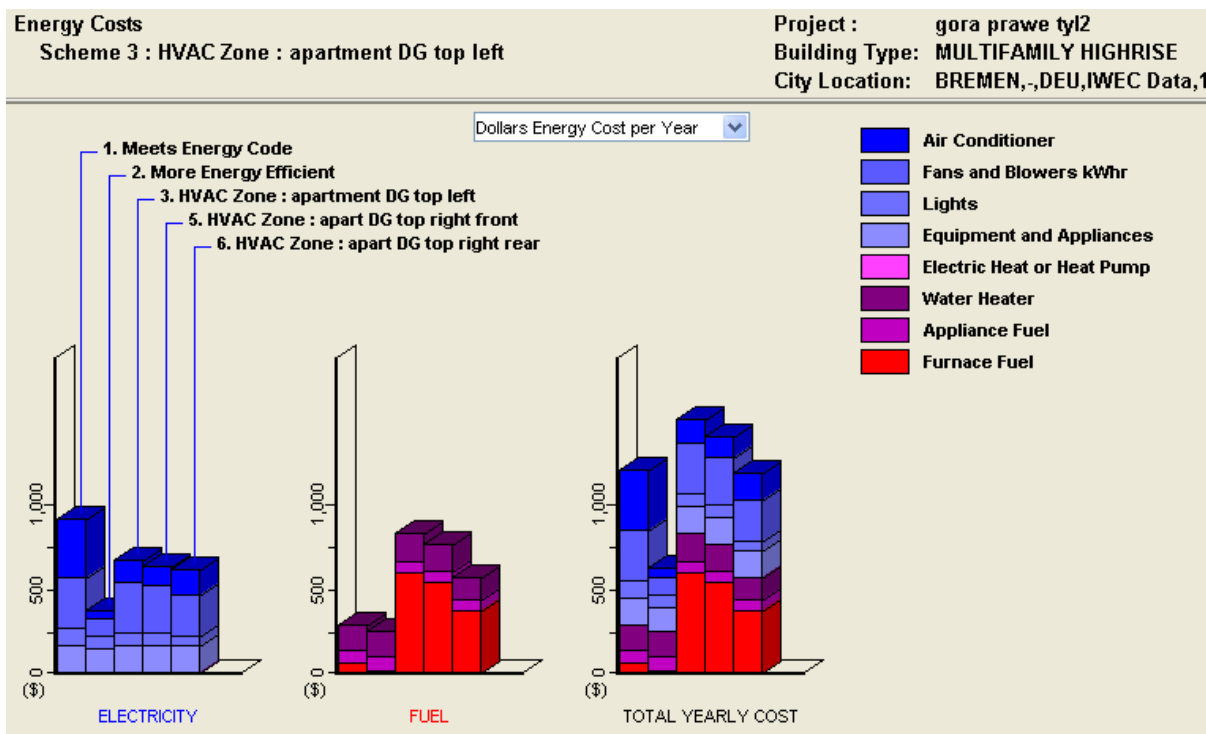
$U = 0,225 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , dachu  $U = 0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , stropu piwnic  $U = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  i okien  $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Budynek ten był obiektem obliczeń (Haese, 2010) z zastosowaniem programu EnergyPlus.

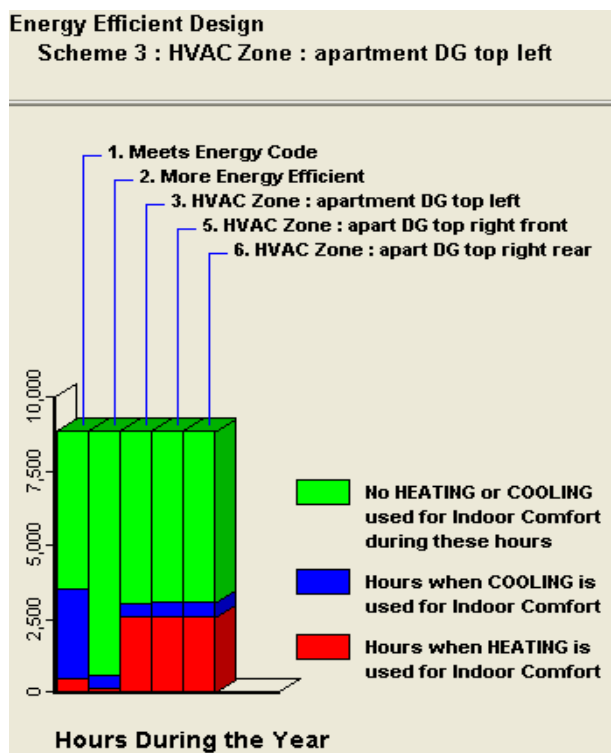
Obliczenia programem HEED rozpoczęto od wrysowania rzutu przyziemia. Na rysunku 1 przedstawiono rzut najwyższej położonej kondygnacji – oznaczonej w dalszej części graficznej jako „DG top” – zawierający trzy mieszkania, którym odpowiadają trzy strefy warunków termicznych. Obszar żółty – to obliczana strefa, obszar jasnoszary – balkony i tarasy, obszar szary – pozostałe pomieszczenia, obszar zielony – teren, otoczenie budynku<sup>1</sup>. Na rysunku 1a zaznaczono jako obszar żółty mieszkanie w lewym skrzydle budynku, oznaczane na dalszych rysunkach jako „apartment left”, na rysunku 1b – mieszkanie frontowe w prawym skrzydle, 1c – mieszkanie w prawym skrzydle położone w głębi budynku. Na rysunku 2 i kolejnych mieszkania te opisane są odpowiednio numerami 3, 5, 6.

Jako podstawowe, modelowe mieszkanie przyjęto mieszkanie przedstawione na rysunku 1a. Odpowiadający temu mieszkaniu wariant wzorcowy spełniający normy ochrony cieplnej jest oznaczony na rysunku 2 i kolejnych rysunkach wskaźnikiem 1, zaś odpowiedni wariant mieszkania energooszczędnego, o wyższych wymaganiach ochrony cieplnej – jest oznaczany indeksem 2,

<sup>1</sup> Dane dostępne na stronie internetowej czasopisma [www.wbiswbis.pb.edu.pl](http://www.wbiswbis.pb.edu.pl)



Rys. 2. Zestawienie opłat rocznych za elektryczność (wentylacja, oświetlenie, wyposażenie) na cele ogrzewania oraz łączne



Rys. 3. Zestawienie godzin pracy systemu chłodzenia oraz grzewczego

zaś 3, 5 i 6 oznaczają mieszkania z rysunku 1, odpowiednio a, b i c.

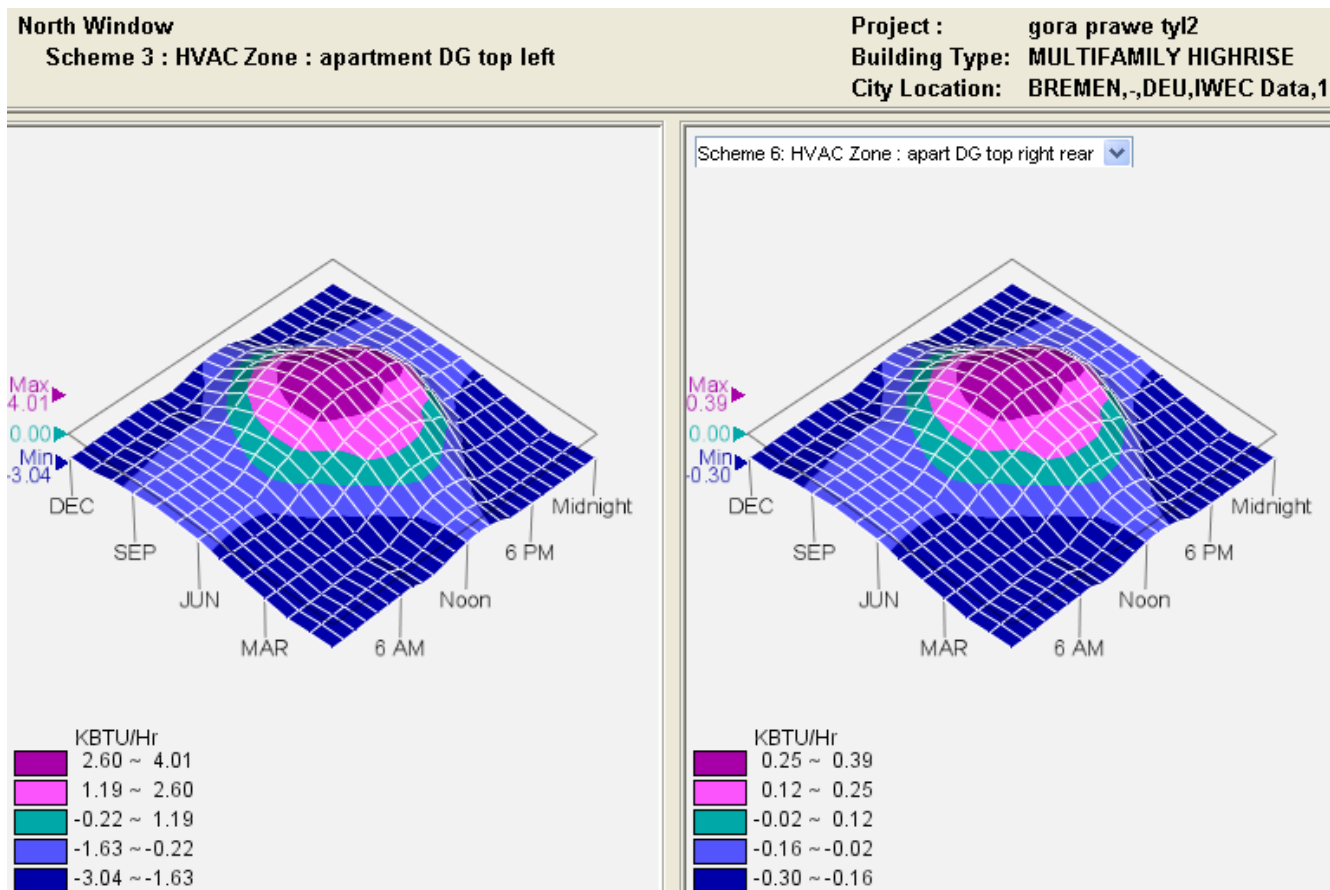
Baza przegród zewnętrznych dostępnych w wersji programu, której wykonano obliczenia obejmuje 14 możliwości i wymaga zadeklarowania grubości warstwy izolacyjnej oraz ściany nośnej. Do obliczeń wybrano wariant przegrody zewnętrznej z drażonych bloczków betonowych o grubości warstwy 20 cm,

z warstwą styropianu o grubości 5 cm oraz z wyprawą tynkarską. Współczynnik przenikania ciepła  $U$  takiej przegrody jest rzędu  $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  i został skorygowany przez zwiększenie grubości izolacji do wartości  $0,225 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  odpowiadającej rozpatrywanemu budynkowi w trakcie dalszych obliczeń. Wybrano warunki klimatyczne dla miasta Brema w Niemczech – dane te są dostępne i ze względu na niedużą odległość należy przyjąć, że dobrze oddają warunki klimatyczne Hanoweru.

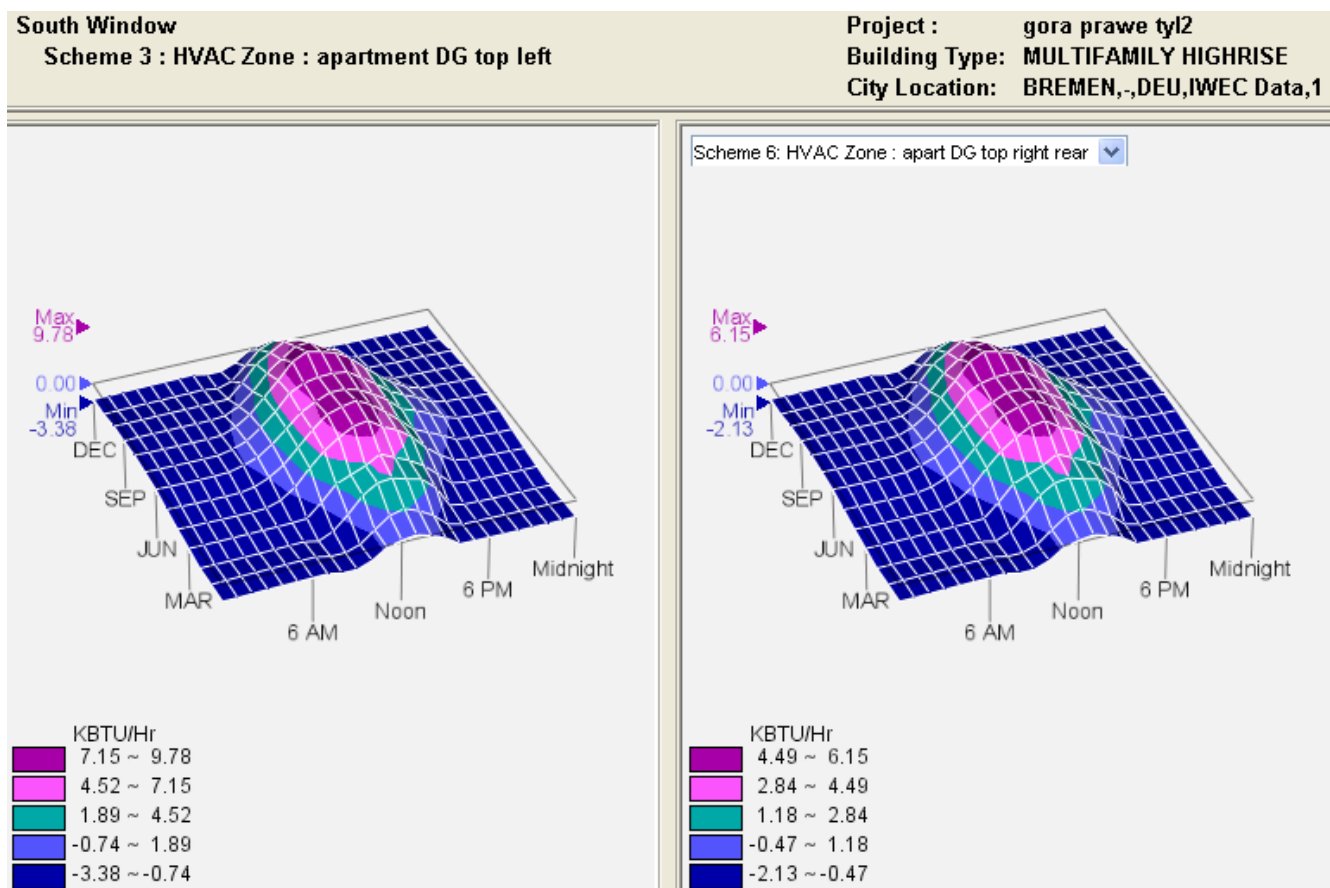
Na rysunku 2 zestawiono wartości opłat rocznych za elektryczność (wentylacja, oświetlenie, wyposażenie), na cele ogrzewania i uzyskania ciepłej wody oraz opłaty łączne dla poszczególnych wariantów mieszkań. Widoczne jest, że mieszkania oznaczone numerami 3, 5, 6 zużywają zbyt dużo energii cieplnej, więcej niż dla mieszkania spełniającego wymagania ochrony cieplnej według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury (Dz. U. Nr 201 z 2008r., poz. 1238).

Z rysunku 3 można odczytać, że mieszkania 3, 5, 6 wymagają ogrzewania przez około 2500 godzin rocznie.

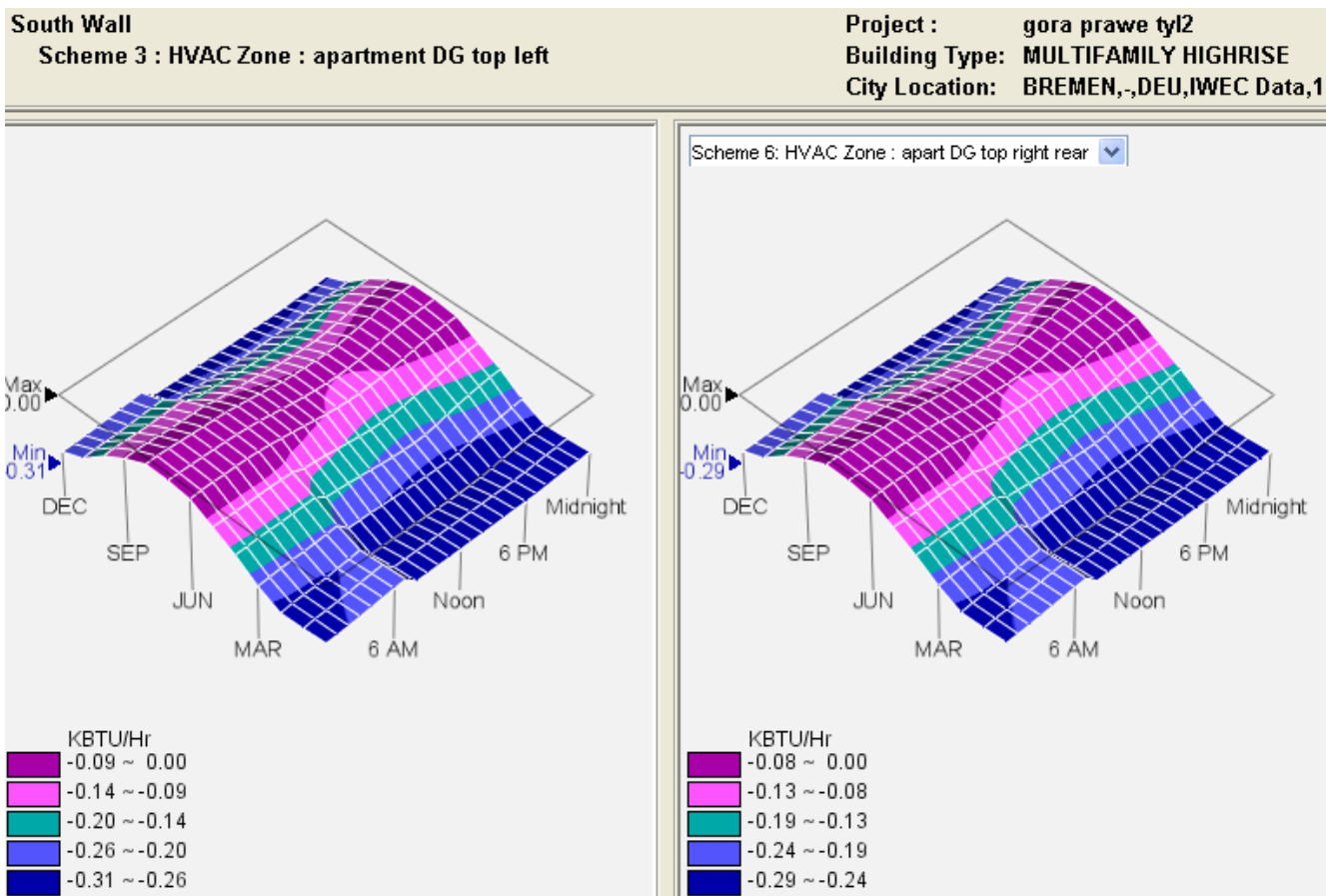
Na rysunkach 4-12 przedstawiono graficzne porównanie wybranych wielkości związanych z mieszkaniami z rysunku 1 oznaczonych jako 1a i 1c. Lewa część rysunku dotyczy ustalonego mieszkania z rysunku 1a, zaś prawa część – może być łatwo wariantowana – dotyczy wybranego mieszkania z rysunku 1c – indeks 6. Porównywane szczegółowe wielkości podano w opisach do tych rysunków. Wykresy te mają postać płatów powierzchni, w których oś w prawo w skos oznacza porę doby (od godziny 0 do 24), w lewo w skos miesiąc roku (od stycznia do grudnia), oś pionowa reprezentuje wyliczoną wielkość, przy której zaznaczono



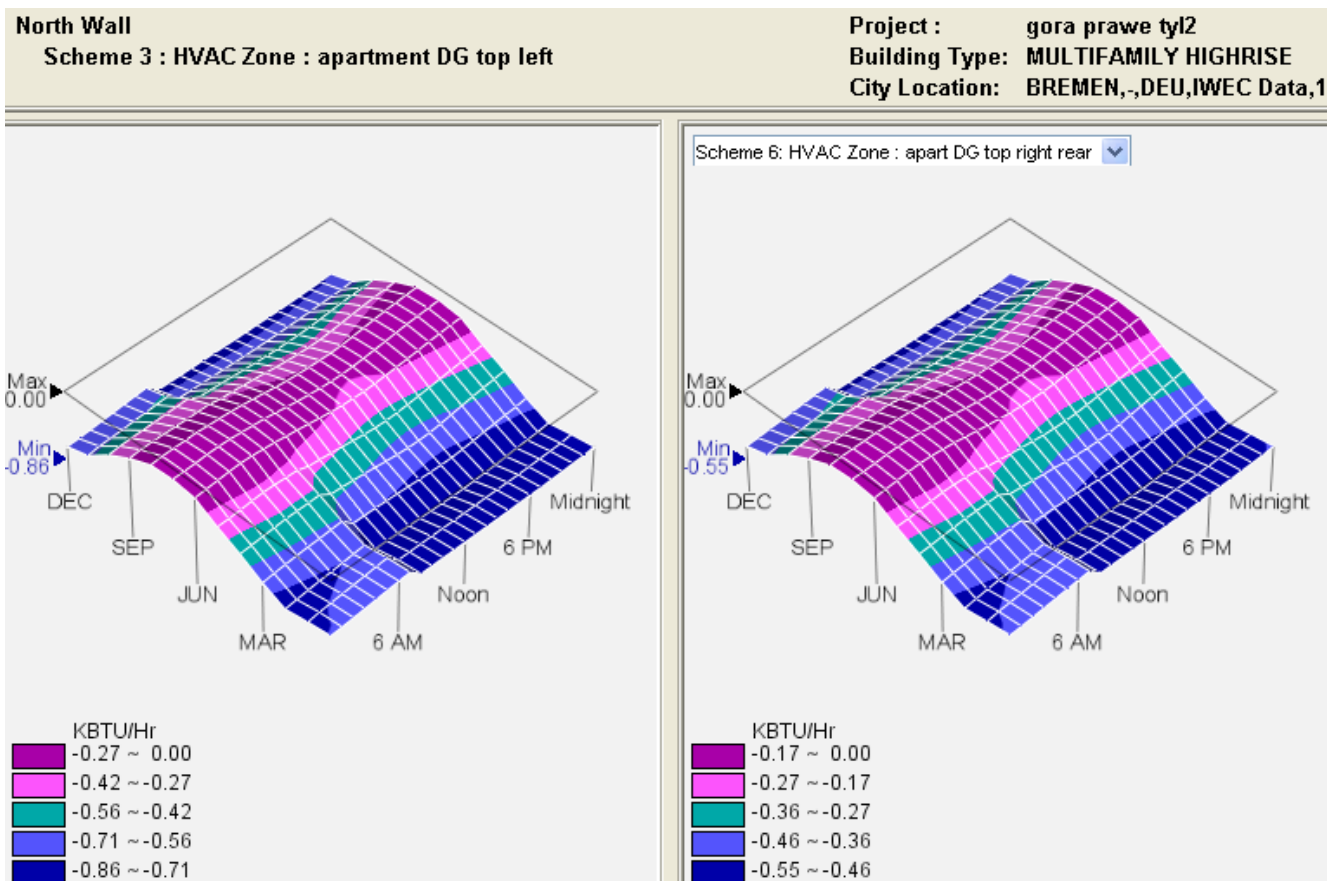
Rys. 4. Wykresy zysków energii słonecznej przez okno północne w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



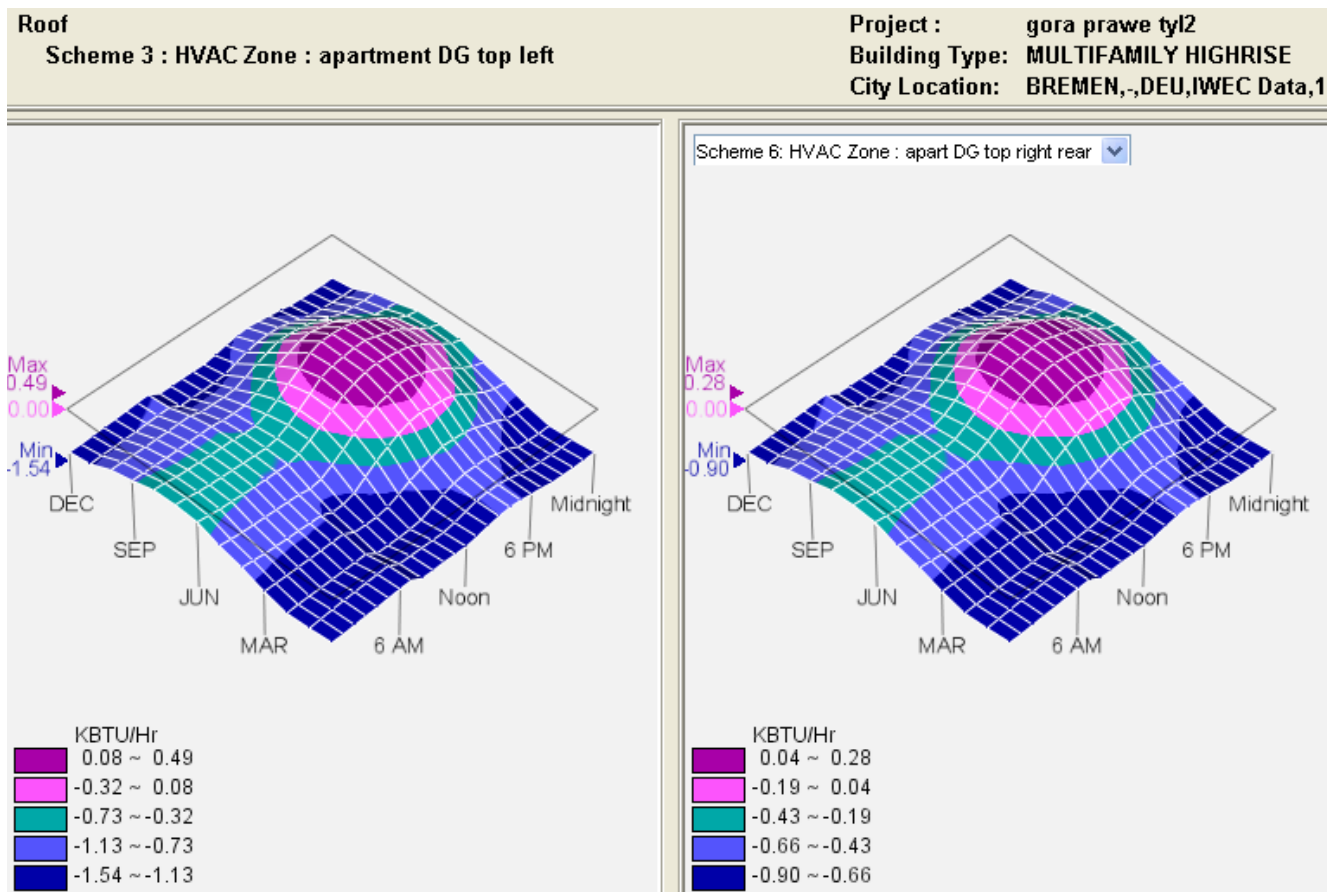
Rys. 5. Wykresy zysków energii słonecznej przez okno południowe w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



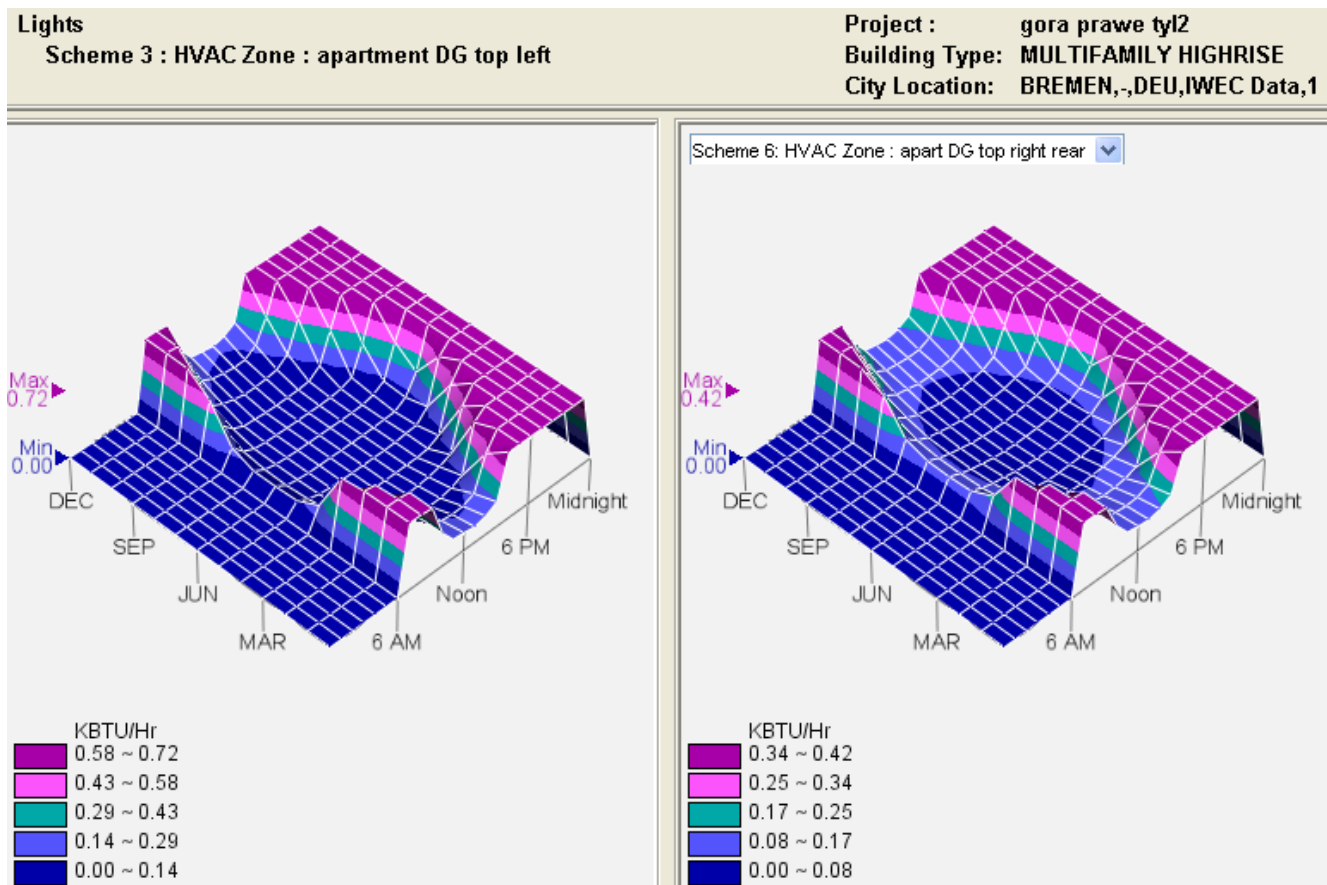
Rys. 6. Wykresy strat energii cieplnej przez ścianę południową w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



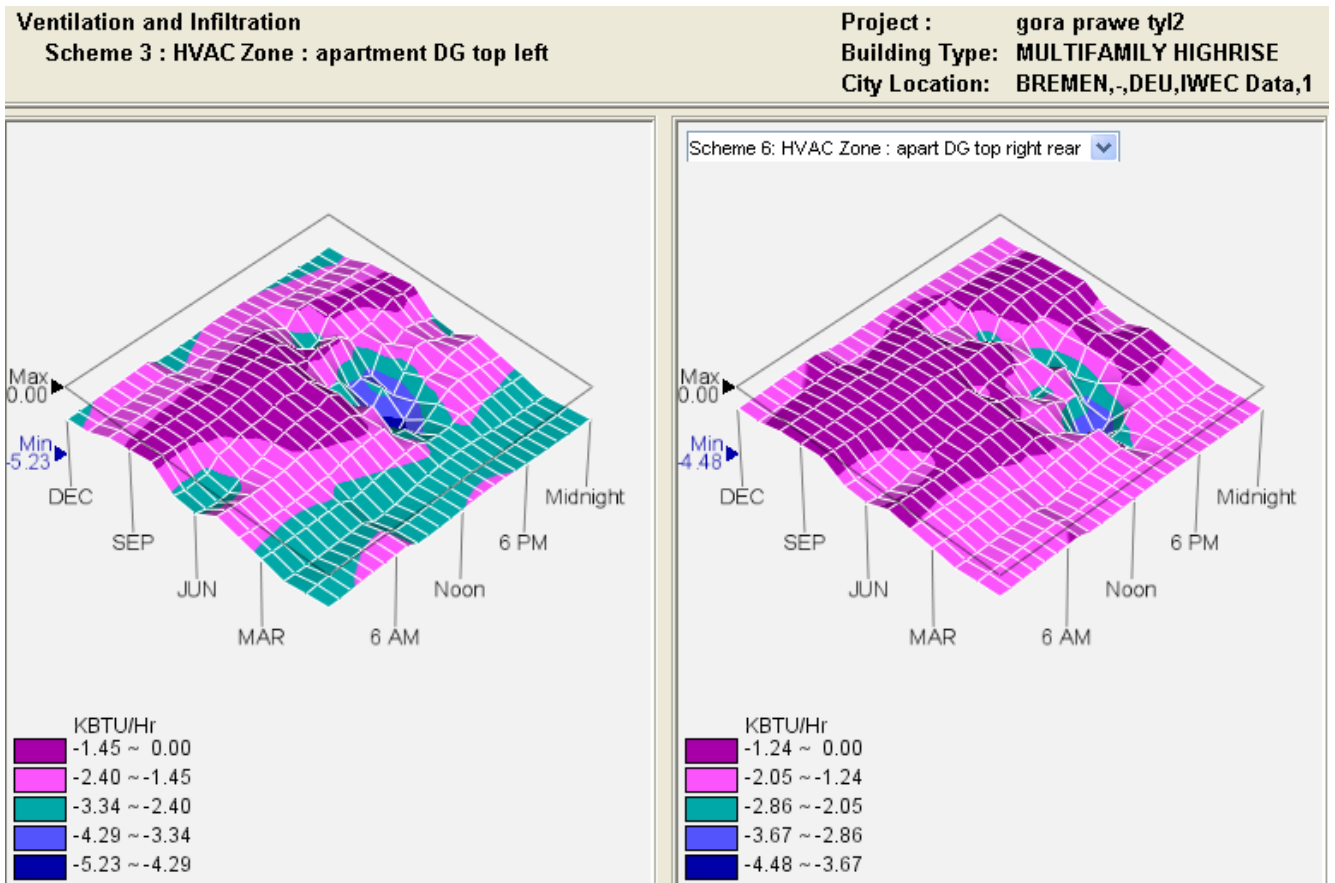
Rys. 7. Wykresy strat energii cieplnej przez ścianę północną w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



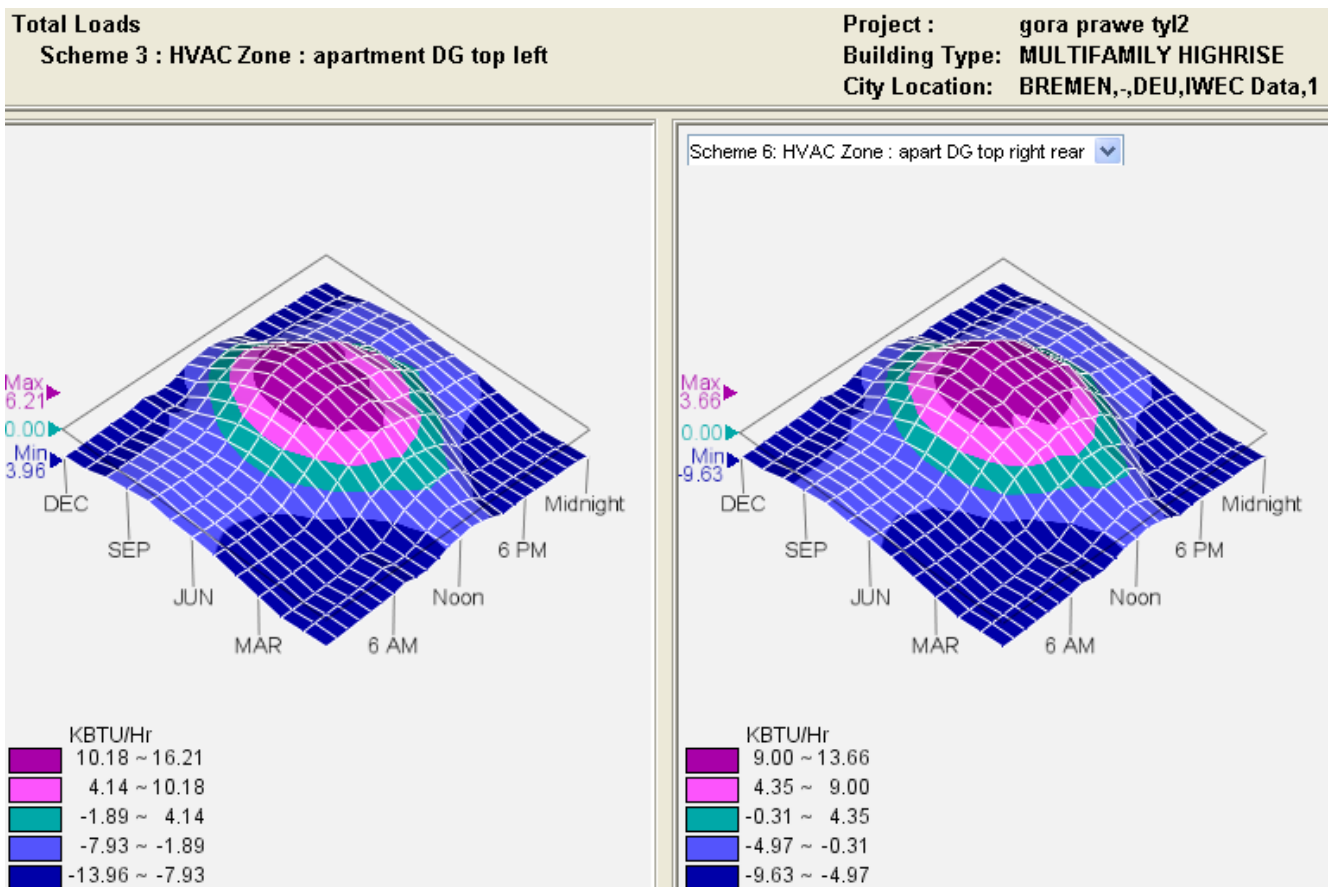
Rys. 8. Przepływy ciepła przez dach w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



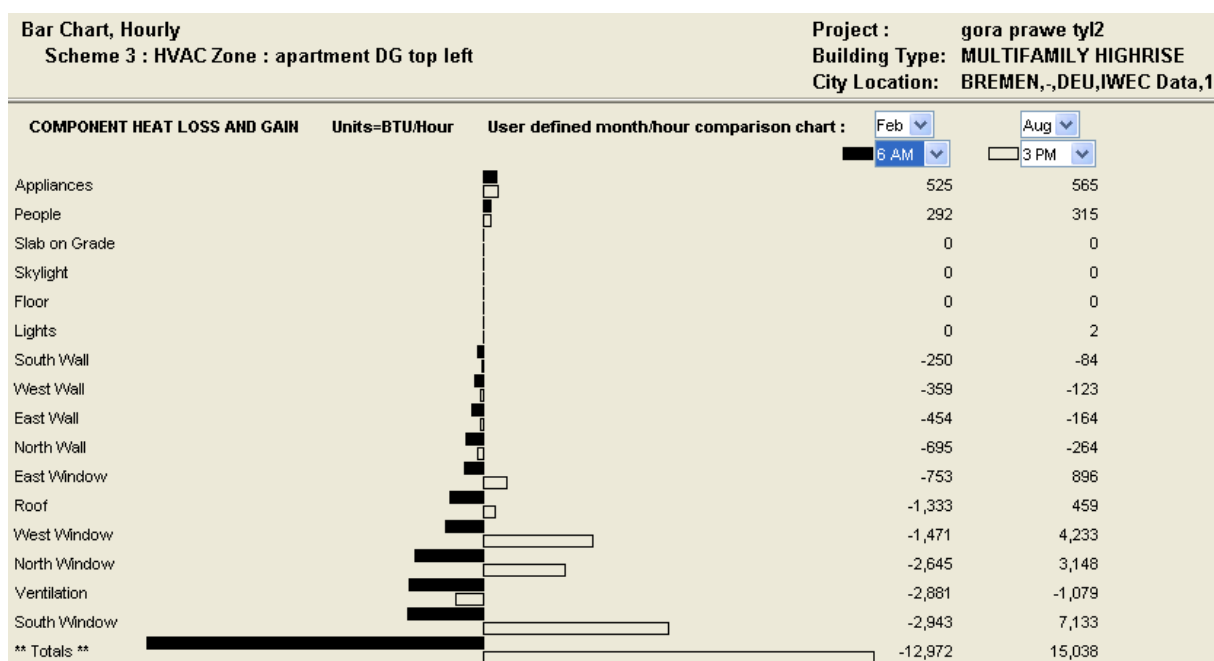
Rys. 9. Zyski ciepła od oświetlenia w mieszkaniu z rys. 1a i 1c



Rys. 10. Zapotrzebowanie ciepła na cele wentylacji i infiltracji w mieszkaniach z rys. 1a i 1c



Rys. 11. Sumaryczne zapotrzebowanie i zyski ciepła w mieszkaniach z rys. 1a i 1c



Rys. 12. Zestawienie komponentów zysków i strat ciepła w lutym (godz. 6:00) oraz w sierpniu (godz. 15:00) – mieszkanie z rys. 1a i 1c

również wielkości maksymalne i minimalne. By wykresy były bardziej plastyczne, wprowadzone pięciokolorową paletę barw. Najmniejszym wartościom odpowiada kolor niebieski, zaś największym – różowy. Należy zwrócić uwagę, że warstwy (granice między poszczególnymi barwami) dla każdego rysunku są dobierane indywidualnie przez program i nie zawsze mają równomierne wartości między poszczególnymi barwami. W szczególności widoczne jest to na rysunkach 6 i 10.

Na rysunkach 4 i 5 zestawiono zyski energii słonecznej przez okno północne i południowe, na rysunkach 6 i 7 – straty energii cieplnej przez ścianę, na rysunku 8 – przepływy ciepła przez dach. Na rysunku 9 zestawiono zyski ciepła od oświetlenia dla założonego harmonogramu dnia – przyjęto, że domownicy są aktywni od godziny 6 do 24 i korzystają w tym czasie z oświetlenia.

Na rysunku 10 porównano zapotrzebowanie ciepła na cele wentylacji i przenikania powietrza przez przegrody (infiltracji) w mieszkaniu z rysunku 1a i 1c, zaś na rysunku 11 sumaryczne zapotrzebowanie i zyski ciepła w tych mieszkaniach.

Na rysunku 12 zestawiono komponenty zysków i strat ciepła w lutym o godzinie 6:00 oraz w sierpniu o godzinie 15:00 dla tych mieszkań.

### 3. Analiza wyników

Program HEED umożliwia uzyskanie obszernego zbioru rezultatów obliczeń prezentowanych w bardzo przejrzystej formie graficznej. Wyniki można podzielić na dwie grupy:

- związane z syntetyczną oceną energetyczną i ekonomiczną budynku dostępne w zakładce Basic (rys. 2 i 3);

- plansze generowane z zakładki *Evaluate* prezentujące poszczególne składowe (rys. 4-12).

Budynki wskazane odnośnikami 1 i 2 na rysunku 2 są w planie kwadratowe, a powierzchnia rzutu jest średnią rozpatrywanych stref, które na tym rysunku wskazane są kolejno jako 3, 4, 5. Widać wyraźnie, że opłaty za energię elektryczną są dla wariantu 1 znacznie wyższe od pozostałych.

Wariant 2 obliczeń jest specyficzny, wiąże się z najmniejszym zużyciem energii elektrycznej. Wynika to głównie z oszczędności w nakładach eksploatacyjnych na system wentylacyjny z powodu stosowania bardziej energooszczędnych urządzeń.

Natomiast opłaty za opał dla wariantów 1 i 2 są znacznie mniejsze w porównaniu z wariantami 3-6. Rozpatrując ten zysk w łącznych rocznych kosztach eksploatacji należy stwierdzić, że różnice między wariantami 1, 3, 4, 5 są niewielkie i nie przekraczają 10%.

Widoczne jest tu, że budynki o rozbudowanej w planie formie architektonicznej wymagają większych ilości opału w okresie zimowym, jednak strata ta jest niwelowana przez łatwiejszą penetrację światła dziennego co wiąże się z mniejszymi opłatami za energię elektryczną, jak również przez lepsze warunki wentylowania pomieszczeń.

Rysunek 3 przedstawia liczbę godzin w ciągu roku chłodzenia, ogrzewania oraz spełnienia warunków komfortu cieplnego przy wyłączonych instalacjach grzewczych i klimatyzacyjnych. Budynek według schematu 2 wymaga najkrótszego okresu ogrzewania, jednak w wariantcie 1 przy gorszej izolacyjności przegród instalacja chłodnicza pracuje więcej godzin w ciągu roku.

Płaty powierzchniowe ilustrujące zyski energii słonecznej przez okna (rys. 4 i 5) w lewej i prawej części rysunku są niemal identyczne – inne są natomiast wartości liczbowe, co wynika z różnej wielkości okien w poszczególnych strefach budynku. Program uwzględnia zadeklarowane elementy zacierniające okna (drzewa,



sąsiednie budynki lub rozwinięte skrzydło tego samego budynku, płyty balkonowe lub elementy elewacji). Wyznamy ilorazy maksymalnych zysków ciepła do maksymalnych strat na poszczególnych elewacjach:

- elewacja północna:  
 $4,01 / 3,04 = 1,319$  lub  $0,39 / 0,30 = 1,3$ ,
- elewacja południowa:  
 $9,78 / 3,38 = 2,893$  lub  $6,15 / 2,13 = 2,887$ ,
- elewacja wschodnia:  
 $1,73 / 0,86 = 2,011$  lub  $3,53 / 1,78 = 1,983$ ,
- elewacja zachodnia:  
 $4,60 / 1,69 = 2,722$  lub  $7,47 / 2,53 = 2,952$ .

Wynika stąd, że maksymalne zyski ciepła dla elewacji północnej są o około 30% większe niż straty ciepła, dla elewacji wschodniej blisko dwukrotnie większe, zaś dla elewacji południowej lub zachodniej trzykrotnie większe. Podane tu wskaźniki zależą w szczególności od temperatury wewnętrznej, rodzaju oszklwienia, a także wpływu elementów zacieniających.

Dla ścian zewnętrznych (rys. 6 i 7) o izolacyjności  $U = 0,225 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nie obserwujemy zysków ciepła w okresie letnim, zaś dla stropodachu (rys. 8) otrzymujemy

$$0,49 / 1,54 = 0,318 \text{ lub } 0,28 / 0,90 = 0,311.$$

Maksymalne zyski ciepła dla stropodachu latem wynoszą nieco powyżej 30% obliczeniowej wartości strat ciepła.

Powyżej podane wskaźniki mogą być użyteczne przy ocenie relacji zachodzącej między obliczeniowymi wartościami zapotrzebowania ciepła i chłodu. Wiąże się to również bezpośrednio z możliwością oszacowania obliczeniowego zapotrzebowania na chłód i doborem urządzeń klimatyzacyjnych, jeżeli są wykonane obliczenia strat ciepła dla poszczególnych pomieszczeń.

Dla wyznaczenia relacji między stratami ciepła a zyskami w okresie letnim przez przegrody zewnętrzne w danym pomieszczeniu należy uwzględnić łączny wpływ okien i stropodachu (jeżeli występuje w pomieszczeniu) wprowadzając współczynniki wagowe uwzględniające udział powierzchni rozpatrywanego elementu w ogólnej powierzchni przegród zewnętrznych danego pomieszczenia. Rysunek 11 przedstawia sumaryczne zapotrzebowanie i zyski ciepła w mieszkaniach z rysunku 1a i 1c. Ilorazy maksymalnych zysków ciepła do maksymalnych strat w tych mieszkaniach wynoszą odpowiednio

$$16,21 / 13,96 = 1,161 \text{ lub } 13,66 / 9,63 = 1,418.$$

Różnica między tymi ilorazami jest wyraźna i zdecydowanie wykracza poza zakres wynikający z błędów zaokrągleń. Również wyraźnie są widoczne różnice w barwnych obszarach płatów powierzchniowych. Wynika to nie tylko z innego położenia tych mieszkań w układzie budynku i różnych powierzchni przegród wewnętrznych graniczących z pozostałą bryłą budynku,

ale także z różnych zysków ciepła od oświetlenia w mieszkaniu (rys. 9), a przede wszystkim z zupełnie odmiennego w czasie zapotrzebowania ciepła na cele wentylacji i infiltracji (rys. 10).

#### 4. Wnioski

Program ten nadaje się szczególnie do modelowania wpływu poszczególnych elementów ochrony cieplnej budynku (również przegród przezroczystych) lub sposobu użytkowania budynku (oświetlenie, wentylacja, harmonogram korzystania z ciepłej wody) na roczne koszty eksploatacji budynku, na zużycie paliw i emisję dwutlenku węgla.

Program wymaga podania danych odnośnie przegród budynku, instalacji wentylacyjnej, wyposażenia w urządzenia elektryczne oraz liczby użytkowników w poszczególnych godzinach. Od dokładności przyjętych danych do obliczeń zależy jakość uzyskanych wyników symulacji. Uwzględnienie wniosków z analizy wyników obliczeń zwiększy efektywność energetyczną domu.

Oszczędzanie energii oznacza, że można także zaoszczędzić na rachunku za media. Jest to korzystne również dla środowiska, gdyż powoduje zmniejszenie ilości gazów cieplarnianych.

Program umożliwia również uzyskanie szeregu wykresów w postaci płatów powierzchniowych ilustrujących wybrane wielkości w funkcji pory dnia i miesiąca roku.

#### Literatura

- Haese G. (2010). Analiza wpływu promieniowania słonecznego oraz wielkości powierzchni przeszklonej na charakterystykę energetyczną budynku wielorodzinnego. *Praca doktorska*, Politechnika Białostocka, Białystok, 2010.  
<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/heed/>  
Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008. *Dziennik Ustaw*, Nr 201 z 2008r., poz. 1238.

#### EXAMPLE OF THE THERMAL MODELLING OF THE BUILDINGS

**Abstract:** In this study selected results of modeling of the heat transfer phenomena from designed building to the environment are presented. Noncommercial software Heed was used.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego S/WBiŚ/5/2011 finansowanego ze środków MNiSW w latach 2011-2013.