

Prof. Ing. Jozef HRAŠKA, Ph.D.  
Slovenská technická univerzita  
v Bratislave  
Stavebná fakulta

# Dynamické simulácie denného osvetlenia budov

## Dynamic Simulation Daylighting of Buildings

Recenzent  
Ing. Miloš Lain

*Autor v príspevku podáva prehľad o problematike řešení denního osvětlení. Článek se zabývá metodami návrhu a ověření denního osvětlení a především uplatněním dynamických simulačních modelů. V samostatné kapitole je uveden přehled a kategorizace simulačních programů pro denní osvětlení. Detailní počítačová simulace je aplikována i na konkrétním příkladě učebny.*

*Klíčová slova: osvětlení, denní osvětlení, počítačová simulace, osvětlení učeben*

*In the article the author presents a survey of daylighting solution problems. The article deals with the day lighting design methods and their verification, and first of all, with the application potential of the dynamic simulation models. In a separate chapter the survey and categorization of simulation programs for day lighting are presented. As an example, description of a detailed computer simulation applied to the specific schoolroom is given.*

**Key words:** lighting, daylighting, computer simulation, schoolrooms lighting

Využívanie denného svetla v budovách je najmä v Európe odôvodňované predovšetkým jeho vplyvom na zdravie a výkonnosť človeka. Argumentácia za dobre osvetlené vnútorné priestory denným svetlom sa často tiež opiera o ekologické súvislosti tvorby stavebného prostredia, energetickú úspornosť budov a podobne. Denné svetlo reguluje biorytmy, produkciu hormónov, ovplyvňuje náladu ľudí, má celý komplex fotobiologických a psychofyzických účinkov na človeka. Plnospektrálne denné svetlo umožňuje kvalitné vnímanie farieb, dobré videnie detailov, znižuje únavu. Výsledne sa pozitívne účinky svetla na človeka prejavujú vo vyššej výkonnosti, v menšom počte pracovných úrazov v priestoroch s denným svetlom v porovnaní s iba umelo osvetľovanými pracoviskami. Z krajín, kde sa v minulosti navrhovali aj školy alebo knižnice s iba umelým osvetlením sú známe štúdie, ktoré potvrdzujú lepšie výsledky štúdia v školách s denným osvetlením, prípadne oveľa vyššiu návštevnosť knižníc s denným osvetlením v porovnaní s iba umelo osvetľovanými knižnicami. Podobne v obchodných centrách sa zistil lepší odbyt tovaru v tých častiach, ktoré mali denné osvetlenie. Ľudia jednoducho vedome alebo podvedome uprednostňujú denné svetlo, čo je okrem svetla samozrejme podmienené aj možnosťou výhľadu z uzatvorených vnútorných priestorov, vnímaním zmien vonkajšieho počasia a ďalšími súvislosťami.

V mnohých krajinách sa požiadavky na využívanie denného svetla dostali do technických noriem, hygienických predpisov a dokonca aj do zákonov. Napr. na Slovensku takéto požiadavky obsahuje Vyhláška č. 532 / 2002 [1].

Dostatočné denné osvetlenie vnútorných priestorov vo všeobecnosti významne limituje hustotu zástavby, hĺbky pôdorysov mnohých stavieb, čo naráža často na slepé záujmy developerov dosiahnuť čo najvyššiu zastavanosť a „ekonomické“ využitie stavebných pozemkov. Denné osvetlenie má výrazný vplyv na energetické správanie budov a mnohé pohodové parametre vnútorného prostredia. Denné osvetlenie je prirodzená a účinná forma využívania slnečnej energie. Rešpektovanie požiadaviek a kritérií denného osvetlenia významne ovplyvňuje projektovú prípravu celého radu budov a vyžaduje si adekvátnu pozornosť.

V posledných rokoch sa vyvinuli detailné simulačné počítačové programy, ktoré dokážu pomerne verne kvantifikovať exteriérové aj interiérové svetelné pomery. Predkladaný článok prináša základné informácie o týchto simulačných programoch a o niektorých možnostiach ich využitia v projektovej príprave budov.

## POŽIADAVKY NA DENNÉ OSVETLENIE BUDOV A KRITÉRIÁ

V staršej odbornej literatúre sa pomerne často objavovalo tvrdenie, že denné svetlo dáva formu architektúre. Dnes sa rešpektovanie požiadaviek na denné osvetlenie dáva často do súvislosti s ekologickou (trvalo udržateľnou) architektúrou. Dobré denné osvetlenie stavebného prostredia sa považuje za jeden z kľúčových indikátorov tvorby trvalo udržateľného prostredia. Vo všeobecnosti môžeme o dobre navrhnutom dennom osvetlení hovoriť vtedy, ak napriek výrazným zmenám intenzity exteriérových osvetlení nie sme nútení často používať tieniace zariadenia a zapínať umelé svetlo.

Denné osvetlenie vnútorných priestorov sa dá hodnotiť z viacerých hľadísk, napr.:

- z hľadiska bezproblémového vykonávania určitej zrakovej činnosti v interiéri,
- z hľadiska celkového naplnenia priestoru svetla, vnímania priestoru ako dobre a vyvážené osvetleného,
- z hľadiska hygienických účinkov svetla na človeka – pôsobenie na endokrinný systém, fyziologické funkcie, fotobiologické účinky, biorytmy.

Denné osvetlenie budov sa v bežnej projektovej praxi posudzuje v podmienkach extrémnych stavov oblohy – úplne zamračená [2] a výnimočne úplne jasnej [3]. Dostatok denného svetla v interiéroch a rovnomernosť jeho rozloženia sa v technických normách kvantifikuje takmer výlučne v podmienkach normalizovanej husto zamračená oblohe. Hlavným normalizovaným kritériom je činiteľ dennej osvetlenosti, ktorý je percentuálnym pomerom osvetlenosti určitého miesta v interiéri (spravidla na horizontálnej porovnávacej rovine) k súčasnej osvetlenosti ničím netienennej exteriérovej horizontálnej roviny husto zamračenou štandardnou oblohou. Takýto postup sa dá považovať do istej miery za opodstatnený pri navrhovaní veľkosti okien a ich výplne, najmä v pracovných priestoroch s pevnými pracovnými miestami. Dominantné sústredenie sa na horizontálnu osvetlenosť neposkytuje dostatočné informácie o tom ako bude priestor vizuálne vnímaný. Aj z týchto dôvodov sa v normách denného osvetlenia budov [napr. 4] požadujú pri hornom osvetlení podstatne vyššie úrovne dennej osvetlenosti ako pri bočnom osvetlení. Pri hornom osvetlení sa spravidla dosahujú vysoké úrovne osvetlenosti horizontálnej roviny a často nízke úrovne osvetlenosti stien, čo môže spôsobovať pocit nedostatočného naplnenia priestoru svetlom. Z údajov o percentuálnej dostupnosti denného svetla na horizontálnej porovnávacej rovine počas výskytu štandardnej zamračená oblohy je veľmi ťažké čo i len odhadovať úroveň a častosť výskytu vysokých úrovní osvetlenosti na očiach užívateľov vnútorného pri-

estoru. V současnosti sa v odbornej verejnosti akcentuje názor, že z hľadiska zdravia, dobrého pocitu a pracovnej výkonnosti sú mimoriadne dôležité vysoké úrovne osvetlenia, ktoré dokáže denné svetlo v interiéroch zabezpečiť počas väčšiny dní. Predovšetkým v blízkosti bočných okien sa vyskytujú vysoké úrovne vertikálnych osvetlení, ktoré významne ovplyvňujú produkciu hormónov v organizme.

Dostatok denného svetla v interiéri sám o sebe nezaručuje spokojnosť užívateľov so svetelným prostredím. Dôležitá je primeraná rovnomernosť osvetlenia a vylúčenie nadmerných jasov. V tejto oblasti síce existujú určité kritériá, hodnotenie reálnych situácií denného osvetlenia je však zložité a značne problematické. Na tieto účely sa nedá využívať model štandardnej husto zamračenej oblohy a tiež nie vždy je najvhodnejšie používať už dávnejšie medzinárodne prijatý model jasnej oblohy.

Normalizované hodnotenie denného osvetlenia budov na báze štandardnej husto zamračenej oblohy zjednodušilo situáciu, na druhej strane sa dostala do úzadia dynamika denného svetla, ktorej zohľadnenie je nevyhnutné pre realistické hodnotenie mnohých aspektov dennej osvetlenosti interiérov.

## DYNAMIKA DENNÉHO SVETLA A SVETELNOTECHNICKÉ MODELÝ OBLOHY

V dynamických výpočtových metódach denného osvetlenia má výstižné stanovenie svetelnotechnických vlastností oblohy kľúčový význam.

Denné svetlo charakterizujú neustále zmeny jeho intenzity a smerovania v závislosti od výskytu priameho slnečného žiarenia resp. výskytu oblačnosti, jej rozsahu a druhu oblakov a optických vlastností atmosféry. Úroveň osvetlenia vo všeobecnosti významne závisí od výšky slnka. Vonkajšia osvetlenosť denným svetlom sa mení od hodnôt blízkych nule do zhruba 120 000 luxov. Až do nedávnej minulosti sa údaje o dostupnosti denného svetla získavali prepočítaním z údajov o slnečnej ožiarenosti metódou svetelného ekvivalentu priameho a oblohového žiarenia.

Obľubu si získal najmä Perezov model oblohy [5] pre svoju veľkú flexibilitu. Použitím 5 parametrov odvodených z meteorologických údajov sa vygeneruje celoročne dynamicky sa meniaci model oblohy. Prepočítaním svetelným ekvivalentom slnečného žiarenia sa získajú potrebné svetelnotechnické veličiny. Na obr. 1 je porovnanie nameraného (vľavo) a vypočítaného (vpravo) rozloženia žiarenia na oblohe podľa Perezovho modelu. Rozloženie žiarenia na oblohe je na jednej strane premenlivé a na druhej strane sa vyskytujú určité typické situácie. Štatistické spracovanie týchto situácií umožňuje podstatne skrátiť čas výpočtu napr. celoročných simulácií.

Exteriérovú osvetlenosť meteorologická služba dlhodobo nesleduje. To je jeden z podstatných faktorov podmieňujúcich obľúbenosť Perezovho modelu. V medzinárodnom programe merania dennej osvetlenosti [7] sa údaje o osvetlenosti intenzívne zhromažďujú a systematicky vyhodnocujú v sieti staníc na desiatkach miest rozložených skoro po celej zemeguli od roku 1993. Spracovanie množstva nameraných údajov prispelo k zovšeobecneniu svetelnotechnických modelov oblohy a k vytvoreniu svetelnotechnických klimatických rokov.

V súčasnosti je k dispozícii sada normalizovaných svetelnotechnických stavov oblohy [8], ktoré reprezentujú 15 charakteristických situácií vrátane extrémnych stavov úplne zamračenej a úplne jasnej bezoblačnej oblohy, nazýva sa to všeobecná obloha. V tejto novej medzinárodnej norme možno každému bodu všeobecnej oblohy priradiť absolútnu hodnotu jasov v závislosti od jasov zenitu oblohy alebo od celkovej horizontálnej oblohovej osvetlenosti. Parametrizácia všeobecnej oblohy je využiteľná na posúdenie rôznych svetelnotechnických problémov a situácií.

Budovy sú spravidla využívané po celý rok, na detailné hodnotenie interiérovej svetelnej klímy, jej environmentálnych, hygienických a energetických parametrov je potrebné poznať zmeny vonkajšej svetelnej klímy v krátkych časových intervaloch. Na simulácie dennej osvetlenosti, podobne ako v termodynamických simuláciách budov, sú potrebné údaje o miestnej dostupnosti denného svetla aspoň v hodinových intervaloch. Ešte vhodnejší je oveľa kratší, iba niekoľkokomínútový interval. Na vytvorenie referenčných klimatických rokov sa vyvinulo niekoľko všeobecne uznávaných metodických postupov, ktorých cieľom je stanoviť z dlhoročne meraných osvetleností charakteristický rok [pozri napr. 9]. Obyčajne sa referenčný rok zostavuje z jednotlivých charakteristických mesiacov, napr. január z roku 1999, február z roku 1995, marec 1997 atď. Globálne a difúzne osvetlenosti horizontálnej roviny v jednotlivých dňoch mesiaca apríl v Bratislave, ktoré sa spracovali z meraní osvetlenosti v časovom kroku jednej minúty v rokoch 1994 až 2001, sú na obr. 2. Takto spracované údaje o svetelnej klíme v príslušnej lokalite poskytujú dobrý základ pre dynamické simulácie denného osvetlenia budov.

## SIMULAČNÉ PROGRAMY V DENNOM OSVETLENÍ BUDOV

Vo svete existujú stovky programov na výpočet denného osvetlenia budov. Vznikali už od 60. rokov minulého storočia. Väčšina z nich používa poloempirické zjednodušené vzťahy (predovšetkým vo výpočte interreflexie svetla) a má rôzne geometrické a materiálové obmedzenia. Obyčajne sú založené na výpočte činiteľa dennej osvetlenosti na porovnávacej rovine. V úvodných štádiách projektovania mnohých budov resp. ich vnútorných priestorov je aplikácia takýchto programov, najmä pre „bežné“ vnútorné priestory prijateľná. V mnohých svetelnotechnicky náročnejších budovách (múzeá, galérie a podobne) a v materiálovo a tvarovo netradične riešených budovách je vhodné používať presnejšie programy už v štádiách koncepčných návrhov, výhodnejšie sú však na overovanie a optimalizáciu riešení. V takýchto prípadoch možno efektívne použiť programy, ktoré hodnotia svetelné prostredie v absolútnych jednotkách (kandela, lux) a poskytujú aj vizuálne znázornenie osvetľovaného priestoru. Aj tieto typy programov často používajú rôzne zjednodušenia (napr. predpokladajú iba ideálne difúzne povrchy, využívajú iba model štandardnej zamračenej, prípadne úplne jasnej oblohy), ktoré z čisto svetelnotechnického hľadiska (svetelnotechnických noriem) nevedú k významnejším výpočtovým chybám. Ešte dokonalejšie, simulačné programy, sú bázané na fyzikálne vernom modelovaní (na tzv. „prvých princípoch“) a umožňujú relatívne uspokojivo hodnotiť aj vizuálnu kvalitu vnútorného prostredia. Programy, ktoré fyzikálne verne simulujú šírenie svetla v architektonickom prostredí sa vyvíjali najmä v posledných dvoch desaťročiach, mimoriadne intenzívne v poslednom desaťročí v súlade s intenzívnym rozvojom počítačovej grafiky. Často deklarovaným cieľom detailných simulačných programov je fotorealistické zobrazenie prostredia a jeho využitie v počítačovej grafike. Napr. architekti, dizajnéri, svetelní technici a iní odborníci potrebujú vizuálne verne poznať a modifikovať svoje dielo ešte pred jeho realizáciou. V oblasti počítačovej grafiky a vizualizácií sa vypracovali programové systémy poskytujúce trojrozmerné svetelnotechnicky verné (fotorealistické) vizualizácie. V posledných rokoch sa simulačné vizualizačné programy stále častejšie využívajú aj na predikciu a hodnotenie vnútornej, dynamicky sa meniacej, svetelnej klímy. Spočiatku tieto nástroje využívali predovšetkým vedeckovýskumní pracovníci. V súčasnosti sú tieto programy široko dostupné a lacná a kvalitná výpočtová technika umožňuje ich využívanie širším okruhom špecialistov.

Na tieto účely sa používanú v zásade dva prístupy, ktoré sa z veľkej časti prekrývajú:

- ☐ fotorealistické,
- ☐ fotometrické.

Svetlo sa aj v bežnom architektonickom prostredí šíri komplikovaným spôsobom. Do oka pozorovateľa sa svetlo dostane po mnohých odrazoch a lo-

moch. Materiály, ktoré nás obklopujú, majú vo všeobecnosti veľmi rozmanité optické vlastnosti. Modelovanie a simulácie svetelného prostredia si vyžadujú prijať určité zjednodušenia a preto sa vnímanie výsledku simulačných výpočtov do určitej miery odlišuje od skutočnosti. Ak chceme tento rozdiel minimalizovať, volíme fotorealistický prístup, v ktorom je potrebný podrobný trojrozmerný popis prostredia a tiež optické vlastnosti materiálov treba zadať veľmi detailným spôsobom. Fotometrický prístup je zameraný na navrhovanie osvetlenia, na sledovanie fotometrických veličín v osvetľovanom priestore bez výraznejšieho sústreďovania sa na vizuálne vnímanie detailov. Pri tomto prístupe je osobitne dôležité správne simulovanie svetelného zdroja – v prípade denného osvetlenia slnka a oblohy. Predovšetkým osvetlenosť z anizotropicky rozložených jasov na oblohe (pozri obr. 1) v mnohých situáciách významne ovplyvňuje vnímanie priestoru a jeho detailov a preto je potrebné ich modelovať a simulovať čo najpresnejšie.

Celoročné výpočty dennej osvetlenosti výrazne spomalluje výpočet oblohovej osvetlenosti integrovaním osvetlenosti v priestorových uhloch viditeľných častí oblohy z jednotlivých miest interiéru. V tejto oblasti sa s obľubou používa metóda „koeficientov denného svetla“ [10]. V tejto metóde sa obloha rozdelí na väčší počet častí, každá časť má konštantný jas. Následne sa vypočíta interiérová osvetlenosť od jednotlivých častí oblohy a interreflexia denného svetla v danom vnútornom priestore. Zmeny rozloženia jasov na oblohe sa potom vo výpočtoch osvetlenosti realizujú lineárnymi kombináciami jednotlivých prípadov. Takýmto spôsobom sa z celoročne potrebných tisícok simulácií v hodinovom kroku môže bez výraznejšej ujmy na presnosti uskutočniť aj menej ako 200 simulácií. To umožňuje simulovať dennú osvetlenosť vnútorných priestorov na celoročnej báze v prijateľných časových dimenziách.

V simulačných svetelno-technických programoch sa uplatňujú „klasické“ radiačné metódy (v angličtine označované termínom „radiosity“) a relatívne novšie metódy sledovania lúča („ray tracing“), ktoré sú produktom počítačovej grafiky. V metóde sledovania lúča sa sleduje veľký počet lúčov v scéne (časti pozorovanej reality) vrátane odrazov a lomov. Z hľadiska počítačovej grafiky (vnímania scény) stačí simulovať správne iba tých lúčov, ktoré končia v oku pozorovateľa. Preto je rozšírená metóda spätného sledovania lúča, v ktorej z oka (kamery, pixelov monitora) vychádza do

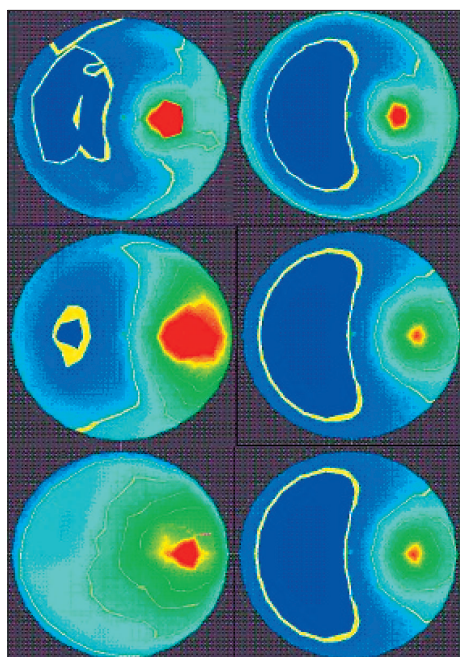
trojrozmernej scény veľký počet „svetelných lúčov“, ktorých správanie sa po určitý počet odrazov sleduje. Takýmto spôsobom sa dajú získať fotorealistické zobrazenia scén vrátane údajov o ich svetelnotechnických parametroch. Problémom je poznať detailné optické vlastnosti materiálov nachádzajúcich sa v scéne a časovo náročný výpočet treba pre iný pohľad na scénu kompletne opakovať.

Výsledky radiačných výpočtových metód nie sú závislé od smeru pohľadu, pre primárne svetelnotechnické výpočty sú tieto metódy preferované. V priestoroch, kde sa nachádza väčšie množstvo materiálov odrážajúcich svetlo zrkadlovo resp. polozrkadlovo, je vhodnejšie použiť metódy sledovania lúča. Vyspelé simulačné programy využívajú prednosti oboch spomínaných základných výpočtových metód resp. ich rôznych modifikácií (napr. dopredné sledovanie lúča, obojsmerný lúč, sledovanie častíc, fotónové mapovanie). Zefektívnenie simulačných programov umožnili algoritmy adaptívnych delení povrchov, virtuálnych a sekundárnych svetelných zdrojov a ďalších špecifických techník. Z väčšieho počtu simulačných programov využitelných na hodnotenie denného osvetlenia budov sú niektoré stručne charakterizované v tab. 1.

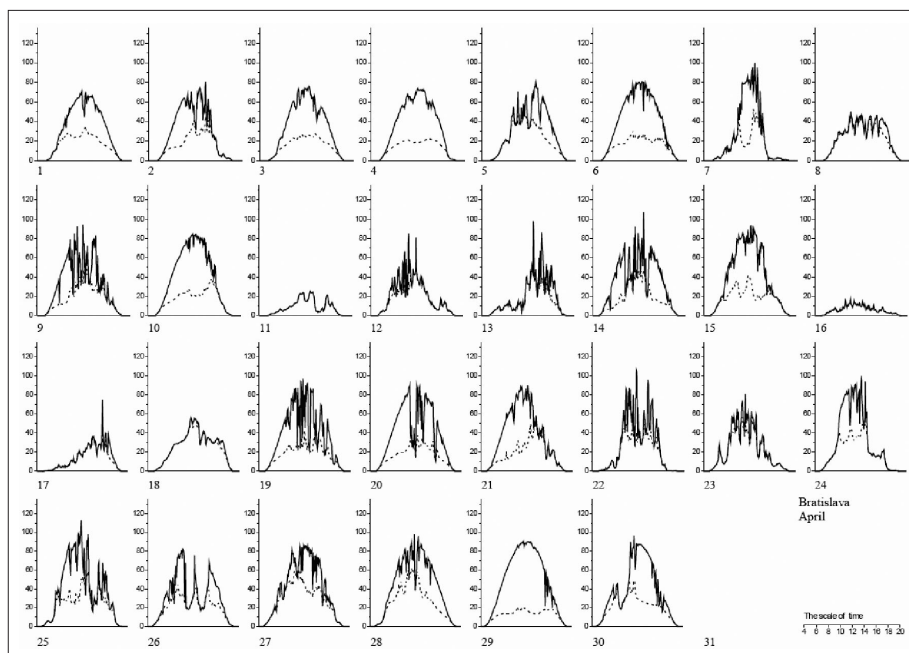
Tab. 1 Charakteristika vybraných programov využitelných na simulácie denného osvetlenia budov

| Názov programu                                         | Platforma                                                                      | Charakteristika programu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HELIOS<br>Radiosity Renderer                           | MS-WINDOWS                                                                     | Program založený na radiačnej metóde určený pre výpočty denného a umelého osvetlenia. Demonštračná verzia je zadarmo dostupná na adrese <a href="http://www.ledalite.com/library/-/soft.htm">http://www.ledalite.com/library/-/soft.htm</a> vrátane zdrojového programu v jazyku C++.<br>URL: <a href="http://www.ledalite.com">http://www.ledalite.com</a>                                                                                                                                                                                                                 |
| Lightscape<br>Visualization System                     | MS-WINDOWS<br>Silicon Graphics                                                 | Kvalitný profesionálny program, ktorý v súčasnosti vytvára zobrazenia kombináciou radiačnej metódy a metódy sledovania lúča (vo verzii 3.2 boli pridané viaceré techniky bázané najmä na sledovaní lúča). Program podporuje produkty firmy Autodesk (3D Studio MAX/VIZ), súbory .dwg. Vhodný na výpočty osvetlenia a vizualizácie za rôznych svetelnotechnických podmienok, bohaté knižnice svietidiel, materiálov a "blokov". Program je vhodný aj na vytváranie rôznych vizualizačných efektov.<br>URL: <a href="http://www.lightscape.com">http://www.lightscape.com</a> |
| Inspirer                                               | MS-WINDOWS<br>UNIX                                                             | Simulácie osvetlenia a rendering najmä pre aplikácie v architektúre a animácie, v závislosti od požadovanej presnosti a rýchlosti výpočtu sa využíva niekoľko techník renderovania (deterministické aj stochastické).<br>URL: <a href="http://www.integra.co.jp/eng/">http://www.integra.co.jp/eng/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Lumen Micro<br>(aktuálne pod názvom<br>Lumen Designer) | MS-WINDOWS                                                                     | Relatívne jednoduchý program pre aplikácie v architektúre zobrazujúci iba paralelné a kolmé plochy scény a iba šedé povrchy existujúci od roku 1983. Umožňuje výpočet umelého a denného osvetlenia v interiéri aj v exteriéri. Od verzie 7.5 je integrovaný s programom Lightscape 3, ktorý umožňuje farebné fotorealistické zobrazenie.<br>URL: <a href="http://www.lighting-technologies.com/Lumen/Micro.htm">http://www.lighting-technologies.com/Lumen/Micro.htm</a>                                                                                                    |
| Genelux-Web                                            | UNIX,                                                                          | Program zameraný primárne na výpočty denného osvetlenia budov. Užívateľ môže zadávať vstupné dáta cez Internet, samotný výpočet prebieha na serveri a výsledky výpočtu získa užívateľ cez web.<br>URL: <a href="http://genelux.entpe.fr/">http://genelux.entpe.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Moonlite                                               | MS-WINDOWS<br>MS-DOS                                                           | Fotorealistické renderovanie využívajúce metódu sledovania lúča a radiačnú metódu, pracuje na báze AutoCAD 12. Umožňuje analýzu architektonického osvetlenia.<br>URL: <a href="http://www.pianeta.it/martinil/e-moonhp.htm">http://www.pianeta.it/martinil/e-moonhp.htm</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| RADIANCE / Adeline                                     | UNIX<br>MS-DOS                                                                 | Fotorealistické renderovanie založené na metóde spätného sledovania lúča, zdrojový program je dostupný zadarmo na adrese <a href="http://radsite.lbl.gov/radiance">http://radsite.lbl.gov/radiance</a><br>URL: <a href="http://radsite.lbl.gov/radiance">http://radsite.lbl.gov/radiance</a><br><a href="http://radsite.lbl.gov/adeline">http://radsite.lbl.gov/adeline</a>                                                                                                                                                                                                 |
| RELUX                                                  | MS-WINDOWS                                                                     | Program pre 3D výpočet denného (verzia Pro) aj umelého osvetlenia a vizualizácie so zameraním na európsky trh.<br>URL: <a href="http://www.42partners.com/relux.html">http://www.42partners.com/relux.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Persistence of Vision<br>(POV – Ray)                   | MS-DOS, WINDOWS,<br>Linux, Macintosh, SunOS,<br>Unix, OS/2, Commodore<br>Amiga | Renderovací program (trojrozmerný priestor, fotorealistické obrazy) bezplatne dostupný na Internete, bázaný na rovnakých princípoch ako program Radiance.<br>URL: <a href="http://www.rz.rwth-aachen.de/sw/graph/povray/povray.html">http://www.rz.rwth-aachen.de/sw/graph/povray/povray.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Luminaire                                              | MS-WINDOWS                                                                     | Súčasť grafického programu 3D Studio Max R2, moderný renderovací program využívajúci prednosti metódy sledovania lúča aj radiačnej metódy umožňujúci simulovať všetky typy denného aj umelého osvetlenia.<br>URL: <a href="http://www.luminist.com/luminaire.html">http://www.luminist.com/luminaire.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                               |





Obr. 1 Porovnanie nameraného (vľavo) a vypočítaného (vpravo) rozloženia žiarenia na oblohe podľa Perezovho modelu  
Hore jasná obloha, v strede stredne zamračená obloha  
a dolu zamračená obloha [6].

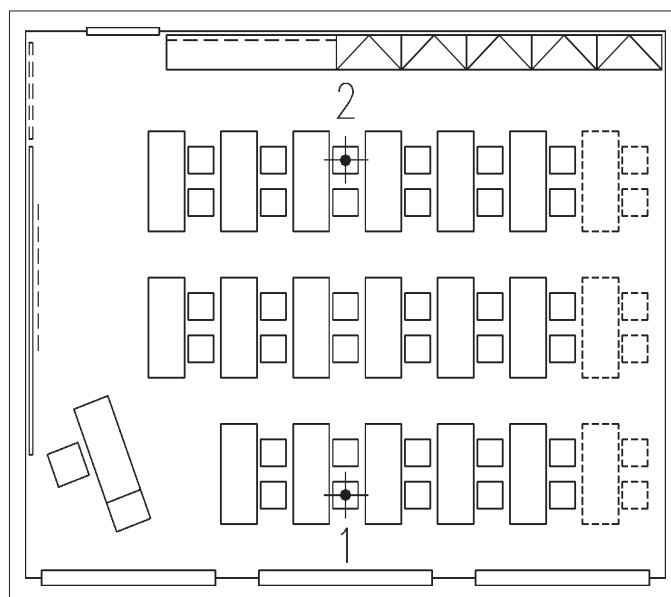


Obr. 2 Globálne a difúzne osvetlenia horizontálnej roviny v jednotlivých dňoch mesiaca apríl referenčného roka denne osvetlenosti v Bratislave [9]

## DYNAMICKÉ SIMULÁCIE DENNÉHO OSVETLENIA

Dostupnosť denného svetla vo vonkajšom prostredí je do značnej miery variabilná a náhodná. Bez ohľadu na fakt premenlivého počasia sa však rozloženie denného svetla vo vnútornom prostredí dá v pomerne širokej škále ovplyvňovať, meniť. Navrhovanie veľkosti, tvaru, sklonu, polohy a výplní osvetľovacích otvorov a parametrov regulačných zariadení sa dá uskutočniť lepšie vtedy, ak dokážeme sledovať a vyhodnocovať vnútorné svetelné prostredie celoročne, teda nielen počas husto zamračených dní a iba na porovnávacej rovine, ako sa to spravidla v oblasti denného osvetlenia robí. V bežnej projektovej praxi chýbajú silnejšie stimuly na používanie dynamických simulácií denného osvetlenia budov. Aj vo svete sa programy na simuláciu denného osvetlenia používajú vo všeobecnosti v menšej miere ako iné simulačné programy (napr. termodynamické, simulácie dynamiky fluida). Svetelní technici sa sústreďujú na navrhovanie iba umelého osvetlenia, stavební fyzici na normalizovanú dostupnosť denného svetla na porovnávacej rovine počas zamračených dní, architekti sa uspokojujú s vizualizáciami vznikajúcimi ľubovoľným nasvetlením scény. Takáto prax postačuje na splnenie kontrolovaných hygienických požiadaviek na vnútorné svetelné prostredie, prípadne na názornú prezentáciu projektu klientovi.

Možno si teda položiť otázku, čo získavame, ak dynamicky simulujeme denné osvetlenie. Dynamické simulácie denného osvetlenia poskytujú údaje o osvetlenosti, jasoch, zdrojoch oslnenia konkrétne riešených priestorov za rôznych stavov vonkajšej svetelnej klímy. Fotorealistické zobrazenia trojrozmerných priestorov umožňujú veľmi názorné porovnávania variantných riešení. Umožňujú analyzovať svetelnotechnické vlastnosti stavebných povrchov aj povrchov zariadení. Najmä v kategórii tzv. inteligentných budov je možné stimulačnými programy analyzovať efekty automatizovaného ovládania tieniacich resp. okenných regulačných zariadení z hľadiska parametrov svetelného prostredia, prípadne integrovanými stimulačnými programy širšie súvislosti (zónovanie združeného osvetlenia, vplyvy na tepelnú pohodu, spotrebu energie na vykurovanie a chladenie a podobne). Dynamické simulácie poskytujú dostatočne dobrú informáciu o čase využitia iba denného svetla na osvetlenie určitého interiéru alebo jeho časti (tzv. autonómia denného svetla). Vo všeobecnosti



Obr. 3 Pôdorys posudzovanej kmeňovej učebne

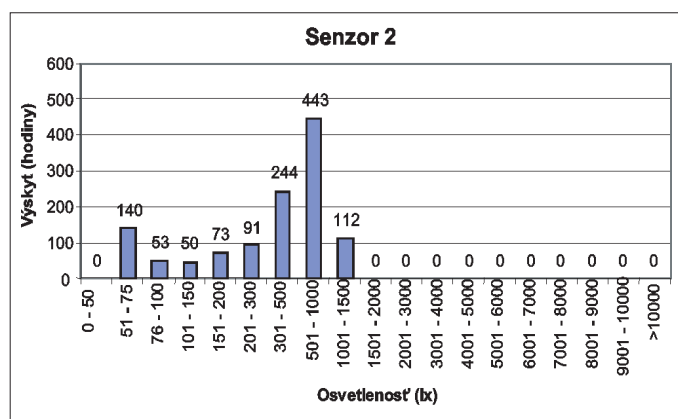
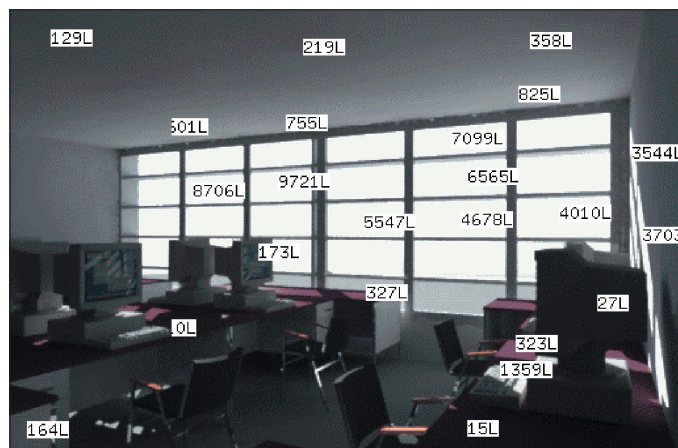
je prednosťou dynamických simulácií to, že sa pracuje s konkrétnou klímou, v konkrétnom stavebnom prostredí a v širokých súvislostiach riešenia danej budovy, jej techniky prostredia a spôsobu prevádzky. Táto skutočnosť dovoľuje detailné energetické simulácie, optimalizáciu viacerých parametrov budov (napr. druhu zasklenia, tienenia, spôsobu regulácie techniky prostredia a pod.).

V technicky vyspelých krajinách je pozorovateľný trend pomalého prechodu dynamických simulácií od vedeckého nástroja k pomôcke podporujúcej proces projektovania najmä neštandardne riešených budov.

Na posúdenie vizuálnej pohody v konkrétnom prostredí nestačí poznať iba osvetlenosť porovnávacej roviny. V zásade sa dá povedať, že fyzikálne kritériá svetelného prostredia nie sú vždy v dostatočne dobrom súlade so subjektívnym vnímaním svetla v priestore. V mnohých prípadoch môžu byť fotorealistické vizualizácie prospešné pre rozhodovanie sa o riešení nielen projektantom, ale aj budúcim užívateľom.

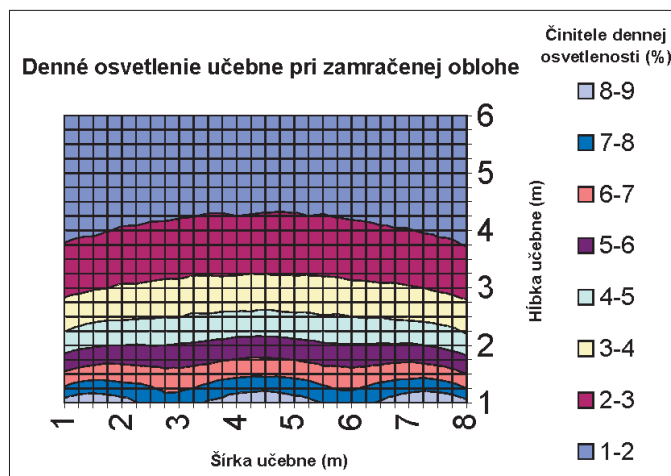


Obr. 4 Vizualizácia analyzovanej prázdnjej učebne

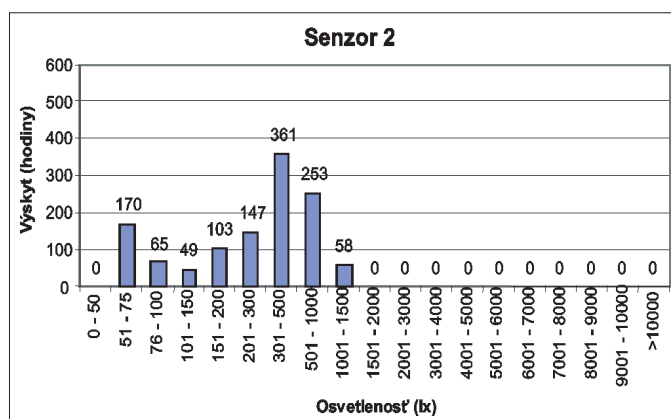
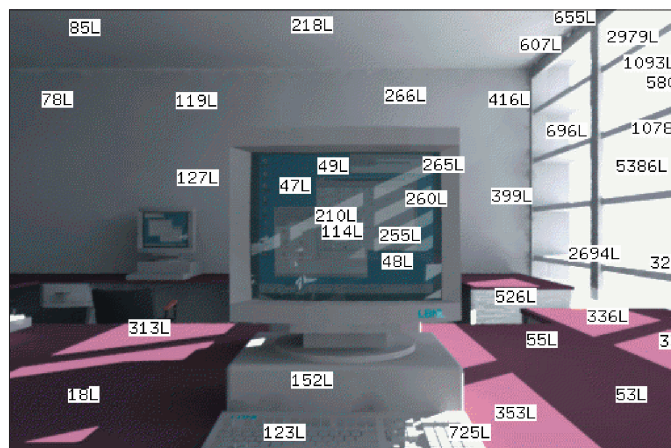
Obr. 6 Časová distribúcia dostupnosti denného svetla v senzore 2 v učebni orientovanej na východ; uhol tienenia 20° – dvojité číre sklo,  $\tau = 0,84$ 

Obr. 8 Rozloženie jasov v projektovanej kancelárii banky v Bratislave

Dynamické simulácie denného osvetlenia vyhodnocujú štandardne trojrozmerné prostredie v rozmanitých podmienkach svetelnej klímy, čo pomáha predchádzať problémom s oslnením zraku a tiež pri komplexnom hodnotení vizuálnej pohody. Aj z týchto dôvodov sa prednosti simulačných programov vo zvýšenej miere prejavujú pri navrhovaní združeného osvetlenia a pri hodnotení účinnosti a prevádzky regulačných zariadení v osvetľovacích otvoroch. Tieto prednosti sa najvýraznejšie prejavujú pri navrhovaní svetelnotechnicky náročných priestorov ako sú napr. výstavné priestory, riadiace veže letiskovej prevádzky a podobne. Simulácie umožňujú určiť pomerne hodnoverne celoročnú expozíciu výstavných exponátov svetlom. Takýto údaj je pre zachovanie mnohých svetlocitlivých materiálov



Obr. 5 Rozloženie činiteľov dennej osvetlenosti na porovnávacej rovine učebne v podmienkach štandardnej zamračenej oblohy (číre dvojsklo)

Obr. 7 Časová distribúcia dostupnosti denného svetla v senzore 2 v učebni orientovanej na východ; uhol tienenia 20° – nízkoemisné zasklenie  $\tau = 0,66$ Obr. 9 Rozloženie jasov pri pohľade sediacej osoby pri počítači vypočítané programom Radiance v projektovanej kancelárii s juhovýchodným oknom tienným vodorovnými krátkymi konzolami 15. februára o 10:00 hodine referenčného klimatického roka v Bratislave ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

veľmi dôležitý a ovplyvňuje koncepčné riešenie výstavných budov resp. ich systému denného osvetlenia. V súčasnosti sa používa množstvo nových materiálov, napr. svetlovody denného svetla, prizmické a holografické a ďalšie druhy špeciálnych zasklení, zrkadiace žalúzie. Pri navrhovaní a hodnotení takýchto materiálov resp. systémov denného osvetlenia sa ukázu viaceré prednosti programov simulujúcich svetelné prostredie.

Dnes sú programy simulujúce osvetlenie súčasťou viacerých komplexných simulačných programov (napr. ESP-r, EnergyPlus). Pomocou takýchto ná-



strojov je možné hodnotiť súčasne svetelnú aj tepelnú pohodu a komplexné energetické správanie budovy zohľadňujúce denné aj umelé svetlo, prevádzku techniky prostredia a fyziky samotnej budovy.

## PRÍKLADY APLIKÁCIÍ DYNAMICKÝCH SIMULÁCIÍ DENNÉHO OSVETLENIA

Dobré denné osvetlenie učební základných škôl je všeobecne považované za kľúčový parameter ich navrhovania. Veľké bočné okná potrebné na presvetlenie pomerne hlbokých kmeňových učebni znamenajú zvýšenie tepelných strát v zime a často nadmerné tepelné zisky vplyvom slnečného žiarenia. V súčasnosti existuje na trhu mimoriadne široká ponuka progresívnych, najčastejšie povrchovo zušľachtených systémov zasklenia, ktoré podstatným spôsobom znižujú tepelné straty aj tepelné zisky vnútorných priestorov. Úpravou povrchov zasklení sa však spravidla znižuje ich svetelná priepustnosť. Zníženie činiteľa prestupu svetla zasklením obvyčajne znamená, že sa na celej porovnávacej rovine učebne nedosiahnu požadované hodnoty činiteľa dennej osvetlenosti. Hygienická služba takéto riešenie neodsúhlasuje. Kritérium činiteľa denného osvetlenia platí, striktné povediac, iba v podmienkach štandardnej husto zamračenej oblohy. Počas väčšiny dní v stredoeurópskej klíme sa nevyskytuje husto zamračená obloha. Možno teda položiť otázku, aká je „reálna“ dostupnosť denného svetla v učebni.

Dynamická analýza dostupnosti denného svetla sa uskutočnila pre vybranú učebňu konkrétnej základnej školy, ktorej pôdorys je na obr. 3. Učebňa má šírku 8,85, hĺbku 7,28 a svetlú výšku 3,45 m. Každý z troch osvetľovacích otvorov má skladobné rozmery 2,40 · 2,40 m. Činitele odrazu svetla od podlahy a okenných rámov učebne sa uvažovali 0,30, od stropu 0,70 a od vnútorných povrchov stien 0,50.

Činiteľ prestupu svetla v normálovom smere cez v minulosti bežné dvojité číre zasklenie sa uvažoval 0,84 a cez alternatívne nízkoemisné zasklenie 0,66, činiteľ znečistenia povrchov zasklenia 0,855. Činiteľ odrazu svetla od terénu sa predpokladal 0,10. Pomer plochy zasklenia ku skladobnej ploche okien je v hodnotenom prípade 0,69. V zmysle požiadaviek [4] sa denné osvetlenie hodnotilo v prázdnej učebni (vizualizácia na obr. 4). Výpočet osvetlenosti sa realizoval počas pracovných dní školského roka a to od 8. 1. do 30. 6. a od 1.9. do 23. 12. Aktívne pedagogické využitie učebne sa pre účely tejto analýzy predpokladalo od 8:00 do 14:00 hodiny. Celkový čas výpočtového aktívneho pedagogického využitia učebne za rok je 1206 hodín. Denná osvetlenosť sa počítala v hodinových intervaloch uvedeného časového obdobia. Používanie tieniacich zariadení sa v tejto analýze neuvažovalo.

V kmeňovej učebni sa na porovnávacej rovine normatívne požaduje minimálna hodnota činiteľa dennej osvetlenosti  $D = 1,5\%$ . Z definície činiteľa dennej osvetlenosti pri úplne zamračenej oblohe produkujúcej horizontálnu osvetlenosť difúznym svetlom 5000 lx vyplýva, že minimálna osvetlenosť učebne v absolútnom vyjadrení je v takomto prípade 75 lx.

Rozloženie činiteľov dennej osvetlenosti na porovnávacej rovine učebne bez vonkajšieho tienenia v podmienkach štandardnej husto zamračenej oblohy s gradovaným jasom dokumentuje obr. 5. Na najvzdialenejšom pracovnom mieste od okna (na pozícii senzora 2 – obr. 3) bude za uvedených výpočtových podmienok  $D = 1,17\%$  aj v prípade ničím netieneneho zasklenia okien čírym dvojsklom (vo vzdialenosti 6,28 m od vnútorného povrchu okennej steny). Zvolený príklad konkrétnej učebne ukazuje, že jej riešenie nevyhovuje normatívnym požiadavkám, lebo na celej porovnávacej rovine sa nedosahuje hodnoty činiteľa dennej osvetlenosti vyššie ako 1,5%.

Pri zasklení okien uvedeným nízkoemisným sklom bude za rovnakých výpočtových podmienok  $D = 0,92\%$ . Znamená to zhoršenie dennej osvetlenosti o zhruba 21 %, teda je priamo úmerné zníženiu priepustnosti svetla cez uvažované nízkoemisné zasklenie.

Z uskutočnenej pomerne rozsiahlej analýzy dynamickej osvetlenosti si budeme všimnúť iba intenzity dennej osvetlenosti v mieste senzora 2 v učebni orientovanej oknami na východ, ktorá je tienená rovnobežnou širokou vonkajšou prekážkou pod uhlom  $20^\circ$  (bežná hodnota v zastavanom území).

Osvetlenosť v mieste senzora 2 pri použití číreho dvojnásobného zasklenia bude nižšia ako 75 lx 140 hodín za rok – obr. 6.

Čas 140 hodín predstavuje 11,6 % z aktívneho pedagogického využitia učebne. V prípade zvoleného nízkoemisného zasklenia bude osvetlenosť v senzore 2 nižšia ako 75 lx 170 vyučovacích hodín (obr. 7), to znamená 14,1 % z času využitia učebne.

Uvedené sa dá interpretovať aj tak, že zníženie činiteľa prestupu svetla cez zasklenie o 21,4 % (pri pomere činiteľov prestupu svetla uvažovaných zasklení 0,66 / 0,84) zníži „reálnu“ osvetlenosť na od okien najvzdialenejších pracovných miestach žiakov v posudzovanej učebni pod hodnotu 75 lx o 30 hodín za školský rok (čo reprezentuje 2,5 % z času využitia učebne).

Dynamická analýza dennej osvetlenosti učebne základnej školy na jednej strane ukazuje, že čiastočné zníženie činiteľa prestupu svetla cez zasklenie nezhoršuje podstatne minimálne akceptovateľnú dostupnosť denného svetla v reálnych podmienkach svetelnej klímy v čase jej využívania. Na druhej strane kombinácia zníženia činiteľa prestupu svetla cez zasklenie so zvýšeným rozsahom vonkajšieho tienenia, prípadne so zväčšením hĺbky učebne výrazne zhoršuje jej „skutočnú“ dennú osvetlenosť.

Z hygienického hľadiska sa dá v neprospech zasklení so zníženou svetelnou priepustnosťou argumentovať výraznejším poklesom vysokých intenzít denného svetla v mieste senzora 2. Napr. 443 hodín osvetlenosti v rozsahu 501 až 1000 lx, ktoré sa dosahovali v senzore 2 vo východne orientovanej čiastočne tienenej učebni zasklenej čírym dvojsklom sa pri zvolenom nízkoemisnom zasklení znížilo na 253 hodín (zhruba o 25 %). Hygienická interpretácia tejto skutočnosti zatiaľ nie je dostatočne preskúmaná.

V naznačených súvislostiach je zrejmé, že dynamické simulácie dennej osvetlenosti poskytujú oveľa plastickejší obraz o vnútornom svetelnom prostredí v porovnaní s jeho normalizovaným spôsobom hodnotenia.

Na obr. 8 je pohľad do jednej projektovanej kancelárie banky v Bratislave. Už v štádiu projektovania možno dynamickými simuláciami analyzovať vizuálne prostredie tohto administratívneho pracoviska. Z obr. 9 je zrejmé, že krátke vodorovné vonkajšie tieniace lamely neriešia problémy zrakovej pohody v posudzovanom konkrétnom administratívnom pracovisku. Optimalizovaný návrh a posúdenie regulačných okenných zariadení možno dynamickou simuláciou denného osvetlenia urobiť oveľa kvalitnejším spôsobom v porovnaní s iba nedávno dostupnými prostriedkami. Integrovanými simulačnými programami možno denné osvetlenie posudzovať komplexne vo vzájomnej súvislosti s umelým osvetlením, vykurovaním, chladením a vetraním budovy s cieľom dosiahnuť zdravé vnútorné prostredie energeticky a ekologicky čo najúspornejším spôsobom.

## ZÁVER

Dynamické simulačné programy majú významné miesto vo výskume a vývoji osvetľovacích sústav budov a mnohých súvisiacich činiteľov.

Vo väčšine štandardne riešených vnútorných priestoroch (napr. obytných miestností, jednostranne osvetľovaných kancelárií, učební a pod.) nie sú prínosy zo samotného spresnenia výpočtov osvetlenosti aplikáciou dynamických simulácií dennej osvetlenosti a získané fotorealistické vizualizácie obvyčajne úmerné zvýšenej námahe. Existuje však celá škála inovatívnych riešení denného osvetlenia, špecifických materiálových a geometrických riešení priestorov a systémov denného osvetlenia, ktoré sa nedajú

dostatočne dobre hodnotiť bežnými metódami. Použitie dynamických simulácií v takýchto prípadoch významne pomáha odpovedať na otázku ako osvetľovať vnútorné priestory s čo najväčším využitím denného svetla pri zabezpečení vizuálnej kvality, tepelného komfortu a celkovej energetickej efektívnosti budovy. Aplikácia dynamických simulácií dennej osvetlenosti je osobitne žiaduca pri posudzovaní a optimalizácii mnohých tzv. inteligentných budov, v ktorých sa spôsob regulácie mnohých komponentov môže optimalizovať použitím dynamických počítačových simulácií.

PodĎakovanie:

Tento článok vznikol s podporou grantovej výskumnej úlohy VEGA 1/3324/06.

Spojení na autora: hraska@svf.stuba.sk

#### Použitá zdroje:

- [1] Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky č. 532 Z.z. z 8. júla 2002, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o všeobecných technických požiadavkách na výstavbu a o všeobecných technických požiadavkách na stavby užívané osobami s obmedzenou schopnosťou pohybu a orientácie
- [2] Natural daylight, Official recommendation, Comptes Rendus CIE 13e Session 1955, Committee (E3.2), P.II, 1955.
- [3] CIE 1972, No. 22 (TC-3.2): Standardization of luminance distribution on clear skies. Report. Bureau central, Paris, 1972
- [4] STN 73 0580-1 Denné osvetlenie budov. Časť 1: Základné požiadavky
- [5] Perez, R. – Seals, R. – Michalsky, J.: All-weather Model for Sky Luminance Distribution-Preliminary Configuration and Validation. Solar Energy, Vol. 50, No 3, 1993, pp. 235-245.
- [6] Delaunay, J. J.: La lumière naturelle: sa repartition directionnelle. Dissertation Université Strasbourg, 1995.
- [7] IDMP – International Daylight Measurements Programme, CIE TC 3.25 (<http://idmp.entpe.fr/>)
- [8] ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky (CIE S 011:2003)
- [9] Darula, S. – Kittler, R. – Kambezidis, H. – Bartzokas, A. – Markou, M.: (2004): Generation of a Daylight Reference Year for Greece and Slovakia. GR-SK 004/01 Final Report, ICA SAS Bratislava, NOA Athens, University of Ioannina, June 2004, p. 51.
- [10] Tregenza, P. R. – Waters, I. M.: Daylight coefficients. Lighting Research and Technology, Vol. 15, No 4, 1983, pp. 65–71. ■

#### \* Novinky stavebního veletrhu Brno 2006

Firma *Schiedel* predstavila ako novinku nový komínový systém *Schiedel Absolut*, tvorený komínovou tvárnici s integrovanou tepelnou izoláciou a tenkostennou keramickou profilovanou vložkou. Součástí je izolovaná multifunkční šachta. Jde o převratné řešení v oblasti komínové techniky. Tento univerzální komínový systém je oceněn Grand Prix For Arch 2005, získal zlatou medaili Aqua-therm 2005 a je nositelem topenářské značky kvality. Více na [www.schiedel.cz](http://www.schiedel.cz).

Firma *HPI-CZ s.r.o.* z Hradce Králové představila novinku pro odvětrání střechy, která se uplatní v konstrukcích nad půdním bytem. Zatímco na klasické půdě může vzduch volně proudit, nad půdním bytem je pro proudění vzduchu, odvádějící vlhkost a nadbytečné teplo, jen velmi malý prostor. O to dokonalejší musí být odvětrání v kritických místech hřebene střechy a nároží. Dosavadní již používané pásy TOP-ROLL a univerzální celokovové pásy letos doplnily pásy VentOtec o šířce 210 mm, samolepicí hliníkové pásy EKO-ROLL šíře 310 mm a celohliníkové pásy VentAL o šířce 310 mm a 350 mm. Pro šindelové střechy HPI-CZ nově nabízí konstrukční prvek „větrací pás hřebene“ o délce 122 mm. Novinkou pro odvětrání střešního pláště vláknitocementových (Betternit) a šindelových střech jsou nové hlavice s označením T2, T4 a T5. Plocha větracích otvorů pásů pro hřebeny a nároží je zhruba 20 % celkové plochy a zaručuje spolehlivé větrání. Větrací systém doplňují ventilační turbíny, zajišťující aktivní větrání bez jakýchkoli energetických nároků.

Pramen: Stavební infopravodaj 2/2006

(Laj)

#### \* FILTECH 2007

Mezinárodní konference *Filtech 2007* se bude konat ve dnech 27. 2. až 1. 3. 2007 ve Wiesbadenu v SRN. Bude předneseno 150 odborných sdělení o nejnovějším rozvoji v oboru odstraňování pevných, kapalných a plyných nežádoucích příměsí v různých médiích a technologiích. Hlavními tématy konference, která bude doprovázena odbornou výstavou, jsou čištění vzduchu a plynů, filtrační procesy, centrifugace, cyklony, elektrostatická precipitace, mikro- a ultra- filtrace, nanofiltrace, měření počtu částic, katalytická filtrace, sedimentace, reverzní osmóza a další filtrační a čisticí postupy. Konference je určena pracovníkům výzkumu a vývoje, stejně jako výrobcům filtračních zařízení. Během konference proběhnou dva odborné kurzy, jeden zaměřený na odstraňování kapalin, druhý na odstraňování prachu.

Více informací: [www.FiltechEuropa.com](http://www.FiltechEuropa.com)

(Laj)