

DVOSLOJNE STEKLENE FASADE S

SENČILI V MEDPROSTORU

ZASNOVA IN DELOVANJE

DOUBLE SKIN GLASS FACADES WITH SHADING SYSTEM

TECHNOLOGY AND SYSTEM PRINCIPLES

UDK 72.02:692.232
COBISS 1.02
prejeto 12.11.2009

izvleček

Zmanjšanje rabe energije v stavbah je vodilna misel avtorjev, ki se vedno pogosteje odločajo za dvoslojne steklene fasade (DSF). Kljub velikemu številu raziskav, ki so preučevale delovanje DSF (laboratorijske meritve kombinirane z meritvami v dograjenih stavbah, pa tudi računalniške simulacije procesov, ki se odvijajo v DSF) si stroka ni edina, ali je sistem resnično energijsko učinkovit. Ker so DSF izredno kompleksne, je za modeliranje potrebna določena mera poenostavitve, ki pa hitro pripeljejo do napačnih zaključkov. Senčila, nujna za zaščito pred pregrevanjem, modeliranje še dodatno zapletejo. Običajno so sistemi za senčenje vgrajeni v medprostor DSF, ki na ta način postane razdeljen na dva dela. Slednje predstavlja s stališča snovanja modela nov izziv. Članek obravnava mehanizme, ki se odvijajo v DSF sistemih, sisteme senčenja, primerja prednosti in slabosti različnih pristopov k modeliranju DSF in ponuja pregled aplikacij, ki so na voljo za modeliranje DSF.

abstract

Reducing energy consumption in buildings is the leading idea of designers who increasingly often decide to employ double-skin façades (DSF). Despite a large number of studies of the performance of DSFs (laboratory measurements combined with measurements in constructed buildings, in addition to computer simulations of the processes that take place within DSFs) the profession is not of one mind as to the true energy efficiency of the system. As DSFs are extremely complex, any modelling requires a certain degree of simplification, which can easily lead to erroneous conclusions. Blinds, which provide necessary protection against excessive heating, additionally complicate modelling. The shading systems are frequently situated in the cavity between the two glazing systems, thereby dividing DSFs into two parts. The latter represents a new challenge from the viewpoint of designing a model. The article deals with the mechanisms operating in DSF systems and shading systems, and compares the advantages and disadvantages of the various approaches to modelling DSFs. It also offers a review of the applications which are currently available for modelling DSFs.

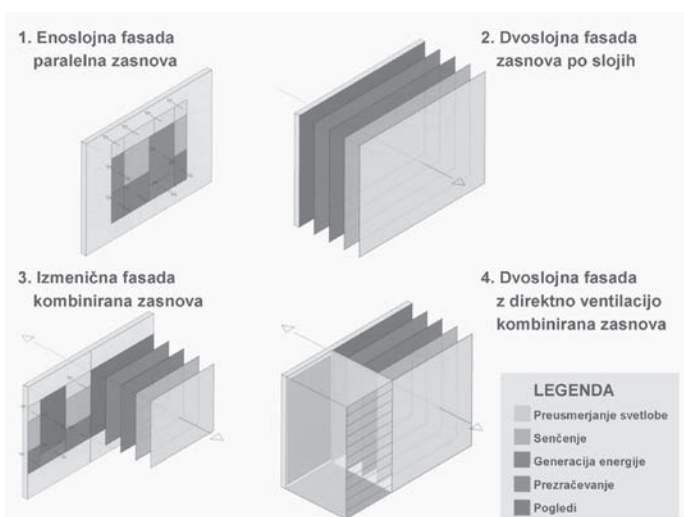
ključne besede

dvoslojne steklene fasade, senčenje, energijska učinkovitost, računalniški modeli, metoda Monte Carlo,

key words

double-skin façades, shading, energy efficiency, computer models, Monte Carlo method

Ljudje gradimo stavbe, ker se želimo obvarovati pred vplivi iz okolja. Notranjost stavbe loči od zunanosti stavbni ovoj: streha in fasada. Naloga stavbnega ovoja pa ni samo funkcionalne narave - s fasado stavba tudi komunicira z okolico. To je eden glavnih razlogov, zakaj se v zadnjih letih pojavlja veliko stavb s stekleno fasado, ki velja za moderno in tehnološko napredno. Inteligentni fasadni ovoji, kot nekateri imenujejo stavbe z dvoslojnimi steklenimi fasadami (DSF), omogoča prodiranje dnevne svetlobe v prostor, vizualni kontakt notranjosti stavbe z zunanostjo in občutek odprtosti prostora. Velike steklene površine pa žal vodijo tudi k povečanim toplotnim izgubam (oziroma k pregrevanju) zaradi visokih vrednosti toplotne prevodnosti U (nižja vrednost U pomeni boljšo toplotno izolativnost). Poleg tega lahko povzročajo tudi bleščanje in nesimetrično ogrevane površine, ki sevajo toploto ali hlad. Slednje vodi v nizko bivalno ugodje [Park et al., 2004]. Našteto je tipično za enoslojne fasade, dvoslojni sistemi pa (lahko) probleme v veliki meri zmanjšajo. Stavbe, ki imajo velik del stavbnega ovoja steklen, se pogosto povezuje z energetske učinkovitostjo, trajnostnim razvojem in »zeleno« podobo. Transparentnost stavbnega ovoja omogoča tudi tesno povezanost z okoljem. Na nek način to zagovarjajo tudi investitorji, saj se transparentnost v arhitekturi danes povezuje s preglednostjo organizacije podjetja, kar se kaže z veliko mero odprtosti proti zunanjemu svetu [Gratia in Herde, 2006]. Slika (Slika 1) kaže razliko med enoslojno in dvoslojno fasado pri opravljanju funkcij stavbnega ovoja.



Slika 1: Eden od konceptov razlage razporeditve fasadnih elementov, ki se pojavlja v literaturi [Hausladen et al., 2006]

Figure 1: One of the concepts of interpreting the arrangement of façade elements that can be found in literature [Hausladen et al., 2006].

Zanimajo nas predvsem elementi, ki zagotavljajo svetlobo, nadzor svetlobe, poglede in tipe prezračevanja. V fasado so lahko vključene tudi sončne (fotovoltaične) celice, ki generirajo energijo. Našteti elementi so lahko na fasadi nanizani vzporedno ali zaporedno ali kot kombinacija prvega in drugega. V nadaljevanju sledi podrobnejša

analiza delovanja DSF, koncepta, zasnove, razvoja ideje in problemov, ki jih srečujemo pri delovanju DSF. Slednje lahko najlažje napovemo s simulacijami, ki jih opravimo pred pričetkom gradnje. Pravilno zastavljeni modeli namreč lahko v fazi načrtovanja pokažejo šibke točke zasnove, ki se jih da pred gradnjo še odpraviti.

Zakaj dvoslojne steklene fasade senčimo

Razvoj ideje dvoslojnih steklenih fasad

Že v zgornjih 70-tih letih prejšnjega stoletja se je v arhitekturnem snovanju vedno bolj pričelo usmerjati na možnost shranjevanja toplote v stavbi, naravno prezračevanje, zunanja senčila in na omejevanje notranjih toplotnih prebitkov (raba naravne razsvetljave in varčnih sijalk, električne naprave z boljšimi izkoristki

itd.) [Wigginton, 2002]. Prva dokumentirana raba DSF datira v leto 1849. Gre za stavbo Industrijskega muzeja v Bruslju. Veljala naj bi za zelo zgodnjo obliko mehansko prezračevane večslojne fasade. Viri [Saelens, 2002] opisujejo, da naj bi pozimi med dvema stekloma krožil vroč zrak, poleti pa mrzel. V literaturi [Poirazis, 2006] lahko najdemo tudi druge stavbe zgrajene v začetku prejšnjega stoletja, ki ustrezajo osnovni definiciji DSF: tovarna Steiff v Nemčiji iz leta 1903, Poštna in hranilno bančna poslovna stavba na Dunaju, Avstrija iz 1903, ki jo je zasnoval Otto Wagner in druge.

DSF je zelo odvisna od vplivov okolice. Na nek način DSF prenese del zunanjih pogojev v stavbo [Poirazis, 2006]. Prenos klime v notranje prostore je seveda lahko prednost, če je nadzorovan. V nasprotnem primeru so lahko omenjeni parametri vzrok težav in napačnega delovanja fasade (na primer pregrevanje). Na sliki (Slika 2) lahko vidimo glavne prednosti DSF in tudi glavne slabosti sistema, na katere moramo biti pozorni.



Slika 2: Nekatere prednosti in slabosti DSF [Eicker et al., 2008].

Figure 2: Some advantages and disadvantages of DSFs [Eicker et al., 2008].

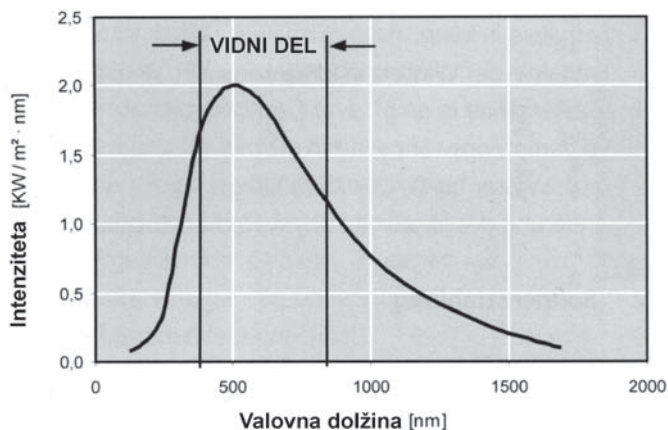
Steklena arhitektura je danes že tako pogosta, da velja za zaščitni znak današnjega časa. Klasične »lepe« fasade so se umaknile predvsem zaradi visokega stroška človekovega dela, spremenil se je izrazni stil, pa tudi cenovni vidik gradnje, hitrost in predvsem sposobnost prepuščanja svetlobe so pridobili na pomenu. Mišljenje, da je za projektiranje steklenih fasad potrebno malo znanja, je zmotno. Če naj bi delovale dobro in pravilno, morajo snovalci izkazati izredno dobro podkovanost in poznavanje delovanja sistema. Kljub velikemu številu dograjenih stavb z DSF v Sloveniji in po svetu, pa še vedno delovanja stavbe v času načrtovanja ne uspemo napovedati najbolje. Zasnovo stavb z DSF je potrebno preučiti za vsak primer posebej, saj nanjo poleg številnih drugih faktorjev vpliva tudi makro in mikro lokacija, ki bistveno vpliva na delovanje sistema. Snovanje stavbe kot celote - torej z upoštevanjem principa ogrevanja, klimatizacije, hlajenja, prezračevanja, načrtovanjem rabe dnevne svetlobe in številnih drugih faktorjev - še vedno ni ustaljena praksa. Zato posamezne inženirske vidike projektne skupine različnih strok še vedno rešujejo ločeno (in v zaporednih fazah) kar pomeni, da stavbe z DSF ne morejo izkoristiti svojega potenciala. Navedeno pa ne velja le v Sloveniji, temveč tudi drugod po svetu. V literaturi pogosto zasledimo komentarje, da so stavbe danes opremljene z zelo napredno tehnologijo, a le redko potencial vgrajenih sistemov resnično izkoriščajo [Wigginton, 2002].

Kako deluje DSF

Za delovanje DSF je bistveno razumevanje principa "tople grede". Elektromagnetno valovanje, ki ga steklo prepušča je krajših valovnih dolžin (vidna svetloba npr. 350-750 nm), glej sliko (Slika 3). V primeru steklenih fasad vidna svetloba prehaja od zunaj navznoter in obratno. Dolgovalovno valovanje (>750 nm - npr. infrardeče) pa steklo absorbira, zaradi česar se segreje [Blum et al., 2001]. Pomembno je upoštevati, da infra rdeče sevanje greje fasado tudi od znotraj - ponoči in pozimi je notranost stavbe namreč bolj topla od okolice. Optično lastnost snovi, ki vpliva na absorpcijo imenujemo absorpcijski (v literaturi tudi ekstinkcijski) koeficient k [Medved in Novak, 2000]. Za steklo velja, da naj bi na transmisijo vidne svetlobe skozi steklo okvirno odpadlo 80-90% sevanja, 5-10% naj bi se od stekla reflektiralo, 5-10% energije pa naj bi steklo absorbiralo [Blum et al., 2001]. Delež, ki se absorbira (steklo se segreje), se kasneje s pomočjo konvekcije in dolgovalovnega sevanja odda na obe strani steklene površine (pri obeh steklih - zunanjem in notranjem, torej v medprostor in pa v enem primeru v notranost stavbe, v drugem pa v okolico). Zaradi opisanega mehanizma prehajanja sončnega sevanja skozi steklene sloje DSF, v medprostoru torej ostane ujete veliko toplote, kar v poletnih mesecih vodi v pregrevanje. Pozimi je ta isti efekt zaželen, ker tvori toplotni tampon, ki ščiti stavbo pred mrazom.

Poletno pregrevanje preprečujemo s senčenjem (ker z odbijanjem sončnih žarkov zmanjšamo količino vstopne energije) in pa z odvajanjem vročega zraka (pasivnim ali

aktivnim prezračevanjem medprostora). Preden pogledamo principe zmanjševanja prepustnosti steklenih slojev in s tem manjšanje možnosti za poletno pregrevanje, se ustavimo pri lastnostih steklenih površin.



Slika 3: Spektralna porazdelitev in intenzivnost sončnega sevanja po Plancku [Blum et al., 2001].

Figure 3: Spectral distribution and intensity of solar radiation, according to Planck [Blum et al., 2001].

Steklena sloja in medprostor (rega)

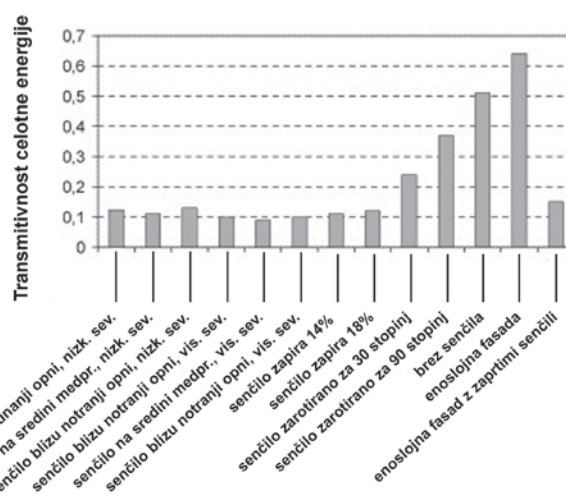
Citirajmo, kakšne so zaželeni lastnosti stekel z vgrajeno DSF: "Stekla naj imajo čim nižji faktor U (toplotna prehodnost zasteklitve - zmanjševanje tramsijskih toplotnih izgub in doseganje visokega nivoja toplotnega ugodja v stavbi) in čim višji faktor τ (transmitivnost sončnega sevanja in svetlobe). V primerih, kjer tudi v zimskem času pričakujemo toplotne dobitke, je pomemben tudi visok faktor g (sončni faktor). Za vzdrževanje optimalne poletne notranje klime pa je, ravno obratno, zaželen nizki faktor g, saj to pomeni zmanjšano prepustnost svetlobe τ . Poleg tega je na hrupnih lokacijah pomembna tudi dobra zvočna izolativnost stekla. Zasteklitve naj na dolgi rok tudi ne bi menjala barve, od zunaj pa naj se ne bi bleščala." [Hausladen et al., 2006]

Kot omenjeno, v poletnih mesecih pri DSF pogosto prihaja do pregrevanja medprostora, kar vodi v visoko rabo energije za klimatizacijo stavbe in v morebitno nekontrolirano rabo senčil uporabnikov. Absurd do katerega prihaja, je raba luči v času največjega potenciala rabe dnevne svetlobe. Snovanje usmerjanja napadnih sončnih žarkov in uravnavanje njihove intenzitete je pri načrtovanju DSF torej izredno pomembno. Temperatura zraka v medprostoru je odvisna od sončnega obsevanja, zunanje temperature, infra rdečega sevanja iz okolice in iz notranjosti stavbe, hitrosti vetra, odprtosti oken, tipa zasteklitve, sistema senčenja in od drugih faktorjev. Na delovanje medprostora in s tem celotnega DSF sistema, deluje tudi postavitve in tip senčil. Na grafu (Slika 4) vidimo primerjavo senčenja za različne postavitve senčil pri enoslojni in dvoslojni stekleni fasadi.

Senčenje DSF s preoblikovanjem steklenih slojev

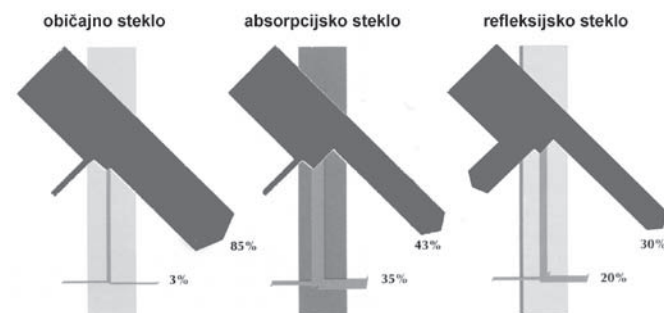
Za poletno zaščito pred vročino, je steklo možno nadgraditi s premazi in folijami. Prepustnost vidne svetlobe tako skušamo

ohraniti, vstop infrardečega (IR) dela sevanja v notranjost stavbe pa omejimo z odbojem ali vpijanjem v stekleni sloj (glej Slika 5). Absorpcijska stekla del sončnega sevanja vpijejo in se segrejejo. Poleti je seveda zaželena čim manjša absorptivnost v IR, zaradi pregrevanja. Poleg tega je velika slabost tega sistema zmanjšano bivalno ugodje zaradi visokih sevalnih temperatur notranje površine stekla [Medved in Novak, 2000]. Drug pristop so refleksijska stekla. Ta del sončnega obsevanja - torej IR in vidno svetlobo - odbijajo v okolico, kar je za notranje bivalne pogoje ugodneje [Medved in Novak, 2000]. Ker je premaz stekla skozi različne letne sezone enak, solarne dobitke žal zmanjšuje tudi pozimi. Poleti pa je večinoma to premajhen ukrep, da se fasada (zaradi velikih solarnih dobitkov) ne bi pregrevala. Refleksijska stekla so tudi manj prepustna za vstop dnevne svetlobe v prostor in se lahko zelo bleščijo, kar je moteče za okolico.



Slika 4: Izmerjene vrednosti g za eno in dvoslojne fasade z različnimi senčili, globino medprostora in nagnjenostjo senčil [Eicker et al., 2008].

Figure 4: Measurements of g-values for one- and double-skin façades with respect to different shades, cavity depths and inclinations of shades [Eicker et al., 2008].



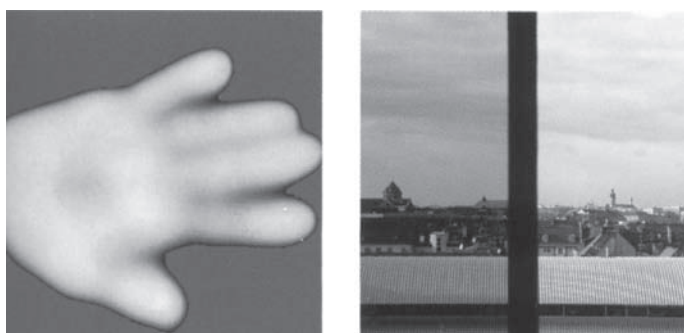
Slika 5: Energijske prehodnosti običajnega, absorpcijskega in refleksijskega stekla [Medved in Novak, 2000].

Figure 5: Energy transitions of ordinary, absorption and reflection glass [Medved and Novak, 2000].

Poleg premazov, lahko na steklu uporabimo tudi tisk ali nalepke. Oboje zmanjša transparentnost stekla, vendar pri zaščiti pred pregrevanjem ne doseže efekta senčil.

Med obetavnimi novostmi so variokromatska stekla oz. stekla

s spremenljivo propustnostjo svetlobe (glej Slika 6), ki se lahko iz prozornega stanja spremenijo v opalno (neprosojno) stanje. Zato imajo velik potencial tudi pri vgradnji v DSF. Med aktivnimi sistemi sta znana elektrokromatsko steklo in plinokromatsko steklo [Hausladen et al., 2006]. Oboje zahteva kontrolni sistem [Hausladen et al., 2006], ki ju upravlja in načeloma ne moreta popolnoma nadomestiti senčil. Termotropna zasteklitev je pasivna. Steklo avtomatsko postane motno, ko je dosežena določena zunanja temperatura. Uporabnik na spreminjanje stekla nima vpliva. Raba takšnega sistema je primerna za strešne svetlobnike ali v kombinaciji s polji običajne (prozorne) zasteklitve. Podobno deluje tudi steklo na osnovi tekočih kristalov in razpršenih polimerov (ang. Polymer-Dispersed Liquid Crystal, PDLC) [Hausladen et al., 2006].



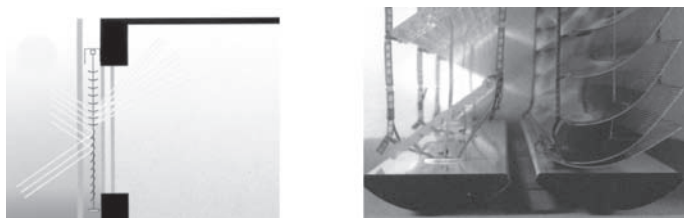
Slika 6: Variokromatsko steklo [Hausladen et al., 2006].
Figure 6: Varichromatic glass [Hausladen et al., 2006].

Vodilo pri oblikovanju DSF je prepustnost vidne svetlobe, zato je uporaba prosojne toplotne izolacije (PTI) razmeroma redka. Poznamo tudi primere z vgradnjo vakumsko izolacijskih panelov in latentnih hranilnikov toplote, ki imajo velik potencial, vendar tudi slednja predstavljata določen kompromis pri vplivu na transparentnost stavbnega ovoja.

Senčila integrirana v DSF

Senčila, ki so lahko na tak ali drugačen način integrirana v DSF, lahko razdelimo v nekaj skupin [Hausladen et al., 2006]:

1. Senčila, ki vplivajo na pot vpadnih sončnih žarkov (jih preusmerijo).
2. Senčila, ki preusmerijo le žarke v zenitu (pri nas nikoli).
3. Senčila, ki vpadne žarke razpršijo.
4. Senčila, ki žarke delno preusmerijo, delno odbijejo (glej Slika 7).



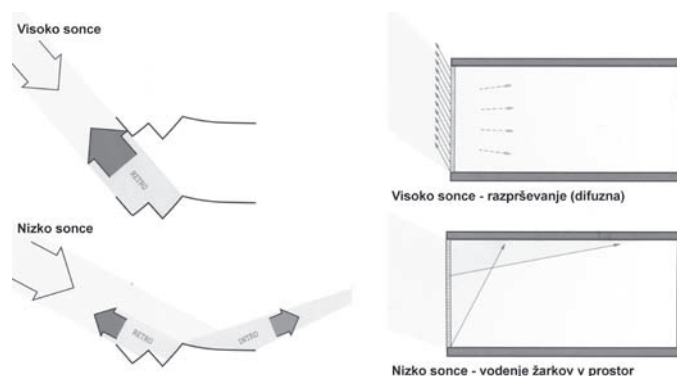
Slika 7: Senčila, ki žarke delno preusmerijo, delno odbijejo [Köster, 2004].

Figure 7: Shades which partially redirect and partially reflect sunlight [Köster, 2004].

Poleg premičnih senčil, ki jih vgradimo v medprostor, da so

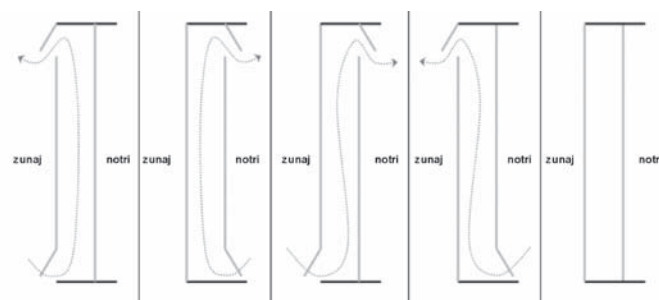
zaščiten pred vplivi atmosfere, gre omeniti tudi možnost zunanjih nepremičnih senčil: previsov. Ti žal niso vedno primerni za uporabo, vendar v primerih, ko jih je mogoče vključiti, vsekakor učinkovito dopolnjujejo ostale sisteme senčenja.

Bistveno, kar moramo razumeti pri snovanju senčil v DSF je, da vpadnih žarkov ni smiselno le »odganjati«, temveč jih moramo izkoristiti. Pozitivno plat - dnevno svetlobo, moramo voditi globoko v notranjost stavbe, negativne vplive - možnost pregrevanja zaradi prevelike obsevanosti, pa moramo kontrolirati in zmanjševati. Kontrolo žarkov lahko izvajamo kot razprševanje na difuzno svetlobo ali preusmerjanje, ko vstopajo v prostor (glej Slika 8). Pri tem je bistveno, da je medprostor DSF prezračevan, saj le na ta način lahko učinkovito odvajamo viške toplote.



Slika 8: Principi kontrole vstopa sončnih žarkov v prostor [Köster, 2004].
Figure 8: Principles of control of the entry of the sun's rays in space [Köster, 2004].

Prezračevanje medprostora



Slika 9: Načini prezračevanja [Loncour et al., 2004].
Figure 9: Modes of ventilation [Loncour et al., 2004].

Obstaja več možnosti zasnove DSF, ki različno odgovarjajo na zahtevo po prezračevanju medprostora (Slika 9). Zadnji primer, kjer imamo medprostor popolnoma zaprt, ki je najbolj nagnjen k pregrevanju, zato ga redko srečamo med dograjenimi stavbami. Velik potencial kažejo tako imenovane »škrbinaste« fasade, kjer je celoten zunanji stekleni sloj narejen tako, da se lahko odpre kot žaluzije. Tako lahko poleti fasada »diha«, pozimi, ko je zaprta, pa ščiti stavbo pred toplotnimi izgubami. Glavni slabosti sistema so relativno visoki investicijski in vzdrževalni stroški.



Slika 10: Primer škrbinaste fasade, Copenhagen [Malovrh Rebec, 2007].
Figure 10: Example of a jagged façade, Copenhagen [Malovrh Rebec, 2007].

Preverjanje delovanja DSF s senčili v medprostoru

Predmet modeliranja

Raziskave toplotnega odziva DSF lahko razdelimo v tri glavne skupine:

1. Raziskave tokovnih razmer in toplotnega odziva.
2. Računanje temperatur na različnih višinah.
3. Simulacije osvetljenosti.

Pri modeliranju lahko upoštevamo sledeče parametre: optične in toplotne lastnosti zasteklitve, (premična/nepremična) senčila, samodejno prilagodljive optične lastnosti transparentnih slojev, kotno odvisne optične lastnosti, osvetljenost prostorov in drugo. Pomembnejša področja raziskav na tem področju so: odnos med mikro in makro odprtini v DSF, velikost in položaj senčil v medprostoru, vitkost medprostora (razmerje med višino in širino), režim toka zraka (profil hitrosti, laminarno/turbulentno, vpliv optičnih lastnosti stekla in senčil na tokovne razmere), določanje količine zraka pri naravnem

prezračevanju, določanje toplotne prehodnosti, raziskave na področju določanja tokovnic, tokovnega režima in drugo.

DSF je relativno kompleksen pojav za modeliranje. V primeru integriranega sistema senčenja pa je izziv še večji. Običajno se pri modeliranju osredotočamo na temperaturni profil v medprostoru ali na režim zračnih tokov. Ločeno lahko modeliramo sončno prepustnost. V primeru bolj kompleksnih zasnov sistemov senčenja (aktivno odzivanje na sončno sevanje, količina sevanja regulirana z rotacijo, krivljenjem ipd.), postane zanimivo opazovanje temperature in osvetljenosti v istem modelu. Načini, kako združiti računanje zračnega toka in temperaturnega profila so dostopni v literaturi [Poirazis, 2006]. Odločitev katero od poti, ki so na voljo, ubrati, je odvisna od konkretnega primera in področja delovanja (stacionarno/nestacionarno stanje). Nekatere vrednosti je mogoče tudi izmeriti na dograjenih stavbah, vendar jih je običajno nemogoče posplošiti, ker nanje vpliva preveč faktorjev specifičnih za določen primer. V sestavku se osredotočamo na računalniške simulacije DSF.

Principi modeliranja

Računalniška modele lahko v grobem razdelimo na tri skupine:

- modeli, ki simulirajo optične lastnosti DSF,
- modeli, ki simulirajo DSF na makro nivoju (v bistvu gre za modele celotnih stavb) – mrežni modeli,
- in pa modeli, ki bazirajo na mikro nivoju (CFD - Computational fluid dynamics oz. računske dinamike tekočin).

Modeli, ki opisujejo delovanje DSF so lahko analitični, modeli z vozlišči, lahko gre za dimenzijske analize, mrežne modele, modele s kontrolnimi prostorninami in CFD modele. Modeli z vozlišči predstavijo vsak sloj fasade s (povprečno) temperaturo. Uporablja se jih predvsem pri naravno prezračevanih fasadah (primeri: [Park et al., 2004], [Grabe, 2002], [Balocco, 2002]). Dimenzijske analize se uporabljajo za opisovanje prehajanja energij pri različnih zasnovah DSF [Balocco, 2004]. Analitični modeli DSF predvidevajo linearni navpični temperaturni gradient. Mrežni modeli zračnih tokov se pojavljajo na primer pri računanju DSF z žaluzijami. Mrežni modeli zračnih tokov so lahko združeni s simulacijami prehodov energije – primeri so bili izračunani tako za naravno prezračevane DSF, kot tudi za oceno rabe energije v poslovnih stavbah. Pri pristopu s kontrolnimi prostorninami, je upoštevan le eno-dimenzijski tok zraka v navpični smeri. Razslojevanje temperature v prezračevani fasadi je ocenjeno z delitvijo fasade v posamezne kontrolne prostornine v navpični smeri. Za vsako kontrolno prostornino se predvidi količino pretoka zraka enako vstopni količini. Največji problem pri CFD modeliranju, je zahtevnost pri računalniški oprepi (hitrost procesorja in velikost spomina). Po drugi strani pa imajo modeli s kontrolnimi prostorninami omejitve, da mora biti zračni tok vnaprej podan, ker predstavlja vhodni podatek za numerično rešitev. Dodatno se zaplete pri modeliranju DSF s senčili. Podatek, ki je potreben je namreč porazdelitev pritiskov v medprostoru, saj na podlagi tega podatka predvidimo zračni tok v medprostoru pred in za senčilom [Jiru, 2008].

Manz [Manz, 2005] ponuja izredno dober pregled problemov, ki se pojavljajo pri računalniškem modeliranju DSF in jih razdeli na tri nivoje:

1. optiko zaporedja slojev,
2. termodinamiko in dinamiko fluidov in pa
3. energetskega sistema stavbe.

Poseben izziv predstavlja združevanje vseh treh simulacij v celoto, ki dejansko ponazarja dogajanje v stavbi z DSF.

Optika zaporedja slojev

DSF je načeloma iz štirih slojev: obeh slojev stekla, medprostora in pa senčil v medprostoru. Če so sloji ravni in vzporedni in se svetloba ne sipa, veljajo zakoni Snella (lomni zakon), Fresnela (Fresnelove enačbe obravnavajo polarizacijo svetlobe na gladki površini) in Bouguerja (absorpcija). Računamo skupno odbojnost ter sposobnost prevajanja in absorpcije svetlobe v slojih.

Termodinamika in dinamika fluidov

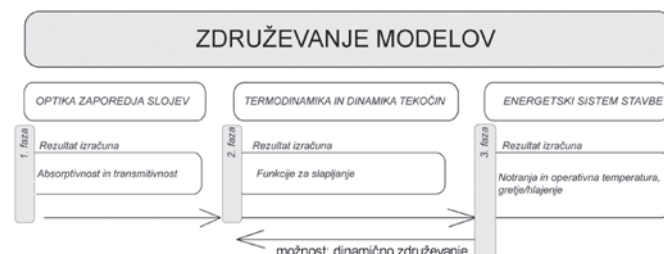
Pri dani sončni obsevanosti lahko uporabimo za izvore toplote kar vrednosti absorbirane toplote v obeh slojih fasade in v senčilih iz optičnega modela. Obnašanje DSF, torej sama mikroklima, pa je zelo odvisna od zračnih tokov v medprostoru. Parametri kot so geometrija medprostora, morebitne prepreke (npr. senčila, mreže ipd.), ventilatorji, robni pogoji (veter, temperatura okolja itd.) vplivajo na vzorec ter hitrost in porazdelitev toplotnih tokov. Tokovi v medprostoru DSF so izredno kompleksni (kroženje, vrtilčenje, protitokovi itd.). Poenostavitev na laminarni tok je nesprejemljiva, saj vodi v napačne napovedi obnašanja DSF. Simulacije morajo poleg kompleksnih vzorcev zračnih tokov upoštevati tudi konvekcijo in prevajanje toplote. Vse naštetje je možno simulirati s kompleksnimi CFD modeli, torej preračunom dinamike fluidov [Manz, 2005].

Energetski sistem stavbe

Simuliranje energetskih bilanc celotnih stavb običajno zasledimo v modelih, kjer je simulacija narejena točkovno. Ena točka mreže ustreza eni kontrolni prostornini (npr. sobi), kar pomeni, da vzamemo eno vrednost temperature za posamezno prostornino. Osnova vsakega opisa toplotnega odzivanja stavbe je prevod toplote v gradbenih materialih, konvektivni prenos na površinah, izmenjava dolgovalovnega sevanja med površinami, zračni tokovi med posameznimi področji, notranji toplotni dobitki in dobitki skozi okna. Pogosto je pri modeliranju potrebno upoštevati tudi klimatske naprave (ang. HVAC - heating ventilating and air conditioning system). Integralni pristop, kjer so upoštevane vse pomembnejše energetske poti vzporedno, prinese precej zanesljiv rezultat modeliranja. Ker je mreža računanih točk redka, je tudi razmerje metode s časom in zahtevnostjo računanja zelo dobra [Manz, 2005]. Vendar pa se metoda primeri v določenih primerih ne obnese in sicer tam, kjer premiki zraka med področji igrajo bistveno vlogo in, kjer tokovi znotraj posameznega področja niso preprosto napovedljivi oziroma je porazdelitev toplote znotraj

posameznega področja neenakomerna. V takšnih primerih je priporočljivo pristop energetskega sistema stavbe združiti s pristopom CFD modeliranja [Manz, 2005].

Primerov posameznih modelov za zgoraj naštetje tri nivoje je veliko. Glavni izziv pa je združevanje vseh treh modelov v celoto (glej Slika 11), ki precej zanesljivo napove odzivanje DSF.



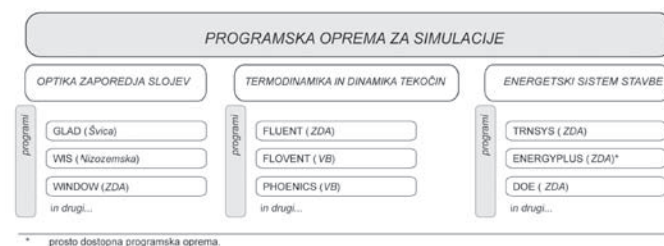
Slika 11: Zdrževanje modelov.

Figure 11: Model integration.

Če je model energetskega sistema stavbe in CFD večkrat zaporedno ponovljen je združitev dinamična (glej Slika 11). Ta pristop je najzahtevnejši v smislu potrebnega računskega časa in zahtevane strojne opreme. Kljub zgornjim ugotovitvam (eden od poskusov združevanja modelov s pomočjo programa TRNSYS (glej tudi Slika 12), je na primer opisan že 1999 [Dorer, 1999]), se trenutno še vedno pojavlja veliko primerov modeliranja DSF, kjer je uporabljen samo eden od pristopov [Jiru, 2008].

Programska oprema za modeliranje

Sledi pregled nekaterih programskih paketov dostopnih na tržišču (Slika 12). Razdeljeni so v tri (prej omenjene) skupine: (1) modeli, ki simulirajo optične lastnosti DSF, (2) modeli, ki simulirajo DSF na makro skali (v bistvu gre za modele celih stavb) – mrežni modeli in (3) modeli, ki bazirajo na mikro skali (CFD).



Slika 12: Računalniški programi za simuliranje delovanja DSF.

Figure 12: Applications for the simulation of the DSF performance.

Pri izbiri primerne programske opreme za simuliranje DSF gre poudariti, da le nekateri programi omogočajo uporabo dodatnih nadgradenj za analiziranje bivalnega ugodja, orodja za simuliranje elementov klimatskih naprav ipd. [Manz, 2005].

Pri zasnovi modela DSF s senčili v medprostoru sistem hitro postane zelo kompleksen. Nelinearna porazdelitev toplote povezana z rotiranjem senčil in nagibanjem lamel je lahko

velik izziv za modeliranje. Podatkov o tovrstnih raziskavah je zaekrat še zelo malo [Park et al., 2004].

Leta 2008 je bila v Švici opravljena raziskava, kjer so ocenjevali celotno prepustnost sončnega sevanja (TSET - total solar energy transmittance) večslojnih zasteklitev v kombinaciji z različnimi sistemi senčenja [Simmler, 2008]. Natančneje je bila numerično ocenjena tudi vloga rotacije lamel senčil. Pri modeliranju so uporabili programsko opremo WinSim [Simmler, 2008], orodje, ki računa optične in termične lastnosti senčil.

Primerjave z meritvami v stavbah

Merjenje na dograjenih stavbah je izredno problematično, ker običajno stavbe niso primerljive, na dogajanje v DSF pa vpliva veliko število faktorjev. Na voljo so sicer pregledna dela [Poirazis, 2006], kjer je vključen seznam stavb z DSF, ki so bile zgrajene v zadnjih letih (razvrščenih po državah in z navedbami ključnih podatkov in slik), vendar za samo spoznavanje sistema in primerjave seznam ni uporaben. Kar nekaj raziskav je narejenih samo s pomočjo simulacij, saj je testiranje na realnih stavbah tudi drago.

Prihodnost modeliranja

Še vedno ni enotnega orodja, ki bi bil zmožen modelirati vse tri nivoje DSF: simuliranje optičnih lastnosti DSF, simulacija termodinamike in dinamike fluidov ter simuliranje celotnega energetskega sistema stavbe. Realno delovanje DSF je možno pravilno napovedati samo z vsemi tremi nivoji simulacij hkrati.

Kot je omenjeno v prejšnjih odstavkih in kot opažajo tudi drugi avtorji [Oesterle, 2001], [Poirazis, 2006] itd., je DSF v veliki meri odvisna od podnebnih in vremenskih pogojev okolice. Predvsem pri napovedovanju delovanja najnovejšega »škrbinastega« tipa DSF, bi morali pri simulacijah vzeti v obzir spreminjajoče se vremenske pogoje oz. vhodne podatke iz okolice. Večina simulacij ne more predvideti niti spreminjajočih se razmer znotraj DSF, kaj šele, da bi predvidele kompleksno in nepredvidljivo spreminjanje vremena. Kot izhodišče je mogoče vzeti študijo enoslojne fasade, kjer je vreme simulirano s pomočjo metode Monte Carlo (MC) [Haarhoff in Mathews, 2006]. Avtorja članka ugotovita, da metoda poda relativno dobre rezultate. Raziskavo bi bilo morda smiselno uporabiti pri modeliranju DSF, saj lahko s pomočjo MC metode v relativno kratkem času ocenimo delovanje fasade pri spreminljivih vremenskih pogojih skozi daljše časovno obdobje. Če na primer vremenske spremembe povzročijo nenaden hiter dvig temperature, ki pa traja le en dan, se to drugače odraža na delovanju DSF kot, če je 5 dni zapored visoka temperatura okolice. V prvem primeru se (zaradi toplotne vztrajnosti) DSF morda niti ne bi odzvala z dvigom temperature v medprostoru, v drugem pa bi se zrak v medprostoru nedvomno segrel (in predvideti bi bilo potrebno na primer dodatno ohlajanje). Tako se zopet vrnemo k ugotovitvi, da DSF prenese zunanje vremenske pogoje v notranjost stavbe, kar narekuje upoštevanje dinamičnega spreminjanja vremena tudi v času načrtovanja, torej modeliranja. Vpogled v ekstreme, v katere lahko zaide

DSF, omogoči tudi priprave na posredovanje, ko/če do takšnih primerov pride.

Ko bomo znali dobro opisati, kaj točno se dogaja v DSF, bomo lahko modeliranje razširili tudi na vpliv DSF na okolico stavbe in na mikro klimo uličnega kanjona, ki ga stavba z DSF spreminja. Šele bilanca celotnega komuniciranja DSF navzven in navznoter bo izhodišče za podajanje sodbe o energetski učinkovitosti tega sistema. Ne gre namreč pozabiti, da visoke grajene strukture s svojimi energetskimi dogajanjem lahko korenito spremenijo mikro klimo, torej vplivajo tudi druga na drugo.

Diskusija

Članek obravnava trenutne principe in aplikacije DSF sistemov. Po kratkem opisu koncepta delovanja DSF in zgodovinskem ozadju razvoja, sestavek predstavi konstrukcijske elemente in tipe zasnov s poudarkom na DSF z integriranimi sistemi senčenja. Odsek o simulacijah procesov v DSF opiše pristope k modeliranju in primerjavo računalniške programske opreme za modeliranje DSF. Ocenjene so tudi primerjave med merjenimi parametri na testnih celicah in dograjenih stavbah z računalniškimi simulacijami in predvidenimi vrednostmi, ki se pojavljajo v literaturi. Na koncu je predstavljena možnost razvoja simulacij s pomočjo vključevanja spreminljivosti vremena preko metode Monte Carlo.

Kljub temu, da je ideja DSF ni nova, se še vedno pojavlja veliko nepredvidenih faktorjev in parametrov, ki vplivajo na delovanje DSF. Želja po stavbah, ki v prostore dovoljujejo vstopanje velike količine dnevne svetlobe in vizualni stik z okolico vedno znova žene raziskave o DSF. Vseeno pa so DSF rešitve okolju prijazne le v primeru, če so pravilno zasnovane že v zelo zgodnjih fazah projektiranja. Energijska učinkovitost sistema ostaja predmet mnogih raziskav. Slabo senčene fasade in dodatni toplotni prebitki zaradi električne razsvetljave povečujejo možnost pregrevanja stavbe. Pri DSF so sistemi senčenja lahko integrirani v medprostor in na ta način zaščiteni pred vremenskimi vplivi in onesnaženjem. Seveda pa je tak sistem še bolj kompleksen za modeliranje in napovedovanje energetske učinkovitosti fasadnega ovoja. Standardni sistemi senčenja so seveda lahko nadgrajeni tudi v učinkovitejše, a bolj kompleksne, sisteme. Slednji bodo obravnavani v ločeni publikaciji, ki je osredotočena na bionične aplikacije v fasadnem ovoju stavb.

Viri in literatura

- Balocco, C., (2002): A simple model to study ventilated facades energy performance. V: *Energy and Buildings* 34, številka: 469-475.
- Balocco, C., (2004): A Non-Dimensional Analysis of a Ventilated Double Facade Energy Performance. V: *Energy and Buildings* 36, številka: 35-40.
- Blum, H. J., et al., (2001): Doppelfassaden. Ernst & Sohn, Berlin
- Dorer, V., Weber, A., (1999): Air, contaminant and heat transport models: integration and application. V: *Energy and Buildings*, 30, številka: 97-104.
- Eicker, U., et al., (2008): Facades and summer performance of buildings. V: *Energy and Buildings*, 40, številka: 600-611.
- Grabe, J., (2002): A prediction tool for the temperature field of double facades. V: *Energy and Buildings* 34, številka: 891-899.
- Gratia, E. in A. Herde, (2006): Greenhouse effect in double-skin facade. V: *Energy and Buildings* 3, številka: 199-211.
- Haarhoff, J. in E. H. Mathews, (2006): A Monte Carlo method for thermal building simulation. V: *Energy and buildings*, 38, številka: 1395-1399.
- Hausladen, G., et al., (2006): Climate skin, Building-skin concepts that can do more with less energy. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- Jiru, T. E., Haghghat, F., (2008): Modeling ventilated double skin façade - a zonal approach. V: *Energy and Buildings*, In Press, Accepted Manuscript, Available online 23 February 2008,
- Köster, H. (2004). *Dynamic daylighting architecture : basics, systems, projects*, Basel, Boston, Berlin : Birkhäuser.
- Loncour, X., et al., (2004): *Ventilated Double Facades: Classification & illustration of facade concepts*. Belgian Building Research Institute, Department of Building Physics, Indoor Climate & Building Services,
- Malovrh Rebec, K. (2007). Poročilo z mednarodnega workshopa podiplomskih študentov v Københavnu 24.-30.10.2007.
- Manz, H., Frank, T., (2005): Thermal simulation of buildings with double skin facades. V: *Energy and Buildings* 37, številka: 1114-1121.
- Medved, S. in P. Novak, (2000): *Varstvo okolja in obnovljivi viri energije*. Univeza v Ljubljani, Fakulteta za stojništvo,
- Oesterle, E., (2001): *Double-skin facades: integrated planning*. Prestel, Munich, London, New York.
- Park, C., et al., (2004): Calibration of a lumped simulation model for double-skin façade systems. V: *Energy and Buildings* 36, številka: 1117-1130.
- Poirazis, H., (2006): *Double Skin Facade, A Literature Review*.
- Saelens, D., (2002): *Energy Performance Assessments of Single Storey Multiple-Skin Facades*. PhD thesis. Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, www.kuleuven.be/bwf/common/data/PhD_2002_Saelens.pdf, Leuven, Belgium.
- Simmler, H., Binder, B., (2008): Experimental and numerical determination of the total solar energy transmittance of glazing with venetian blind shading. V: *Building and Environment*, 43, številka: 197-204.
- Wigginton, M., (2002): *Intelligent skins*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Woburn.