

# REGULACIJA NOTRANJEGA OKOLJA Z URAVNAVANJEM STAVBNEGA OVOJA

## CONTROL OF INDOOR ENVIRONMENTS VIA THE REGULATION OF BUILDING ENVELOPES

### izvleček

Oblikovanje udobnega zdravega in stimulativnega notranjega okolja stavb ima neposreden vpliv na uporabnike, porabo energije v stavbah ter hkrati tudi na širši sistem socio-ekonomskega okolja človeške družbe. Notranje okolje v stavbah je definirano s pomočjo stavbnega ovoja, ki predstavlja interaktivni vmesnik izmenjav med zunanjim in notranjim okoljem oziroma uporabnikom. Primerno oblikovan, zadostno prilagodljiv ter primerno reguliran stavbni ovoj predstavlja osnovo za vzpostavitev kvalitetnega notranjega okolja. Sistematična obravnava lastnosti tako stavbnega ovoja kot tudi notranjega okolja, ki ima za izhodišče psiho-fiziološke zahteve oziroma potrebe uporabnikov, predstavlja načrtovalski pristop, ki omogoča holistično obravnavo stavb ter v njih vgrajenih elementov in sistemov. Predstavljena delitev notranjega okolja na vizualno, toplotno, vohalno, akustično in ergonomično pod-okolje omogoča klasifikacijo ter izbor najpomembnejših vplivnih faktorjev, s pomočjo katerih se lahko pristopi k oblikovanju in regulaciji stavbnega ovoja kot vmesnika med zunanjim in notranjim okoljem. Rezultat uporabe takšnega pristopa je predstavljen avtomatski regulacijski sistem notranjega okolja, ki je izveden v realnem okolju kabineta na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo.

### ključne besede

notranje okolje, stavbni ovoj, regulacijski sistem, grajeno okolje, stavbe

### abstract

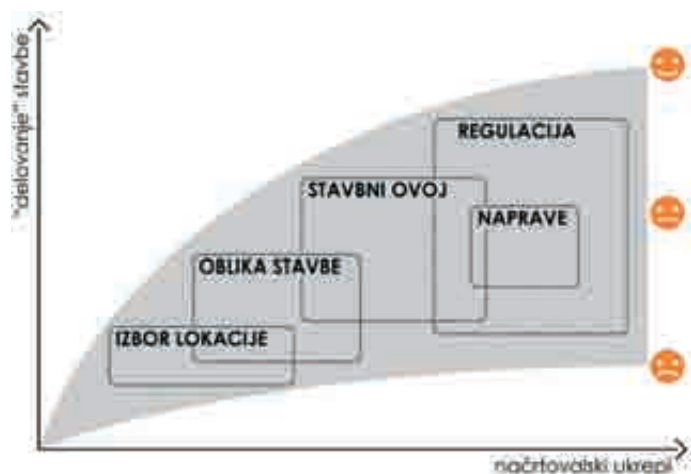
*The design of comfortable, healthy and stimulating indoor environments in buildings has a direct impact on the users and on energy consumption, as well as on the wider socio-economic environment of society. The indoor environment of buildings is defined with the formulation of the building envelope, which functions as an interface between the internal and external environments and its users. A properly designed, flexible and adequately controlled building envelope is a starting point in the formulation of a high-quality indoor environment. The systematic treatment of the indoor environment and building envelope from a user's point of view represents an engineering approach that enables the holistic treatment of buildings, as well as integrated components and systems. The presented division of indoor environment in terms of visual, thermal, olfactory, acoustic and ergonomic sub-environments enables the classification and selection of crucial factors influencing design. This selection and classification can be implemented in the design, as well as in control applications of the building envelope. The implementation of the approach described is demonstrated with an example of an automated control system for the internal environment of an office in the building of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering.*

### key words

interior environment, building envelope, regulation system, built environment, buildings

Ovoji stavbe kot vmesnik, ki omogoča izmenjavo energije, snovi in informacij med zunanjim in notranjim okoljem predstavlja ključen element pri tvorjenju umetnega notranjega bivalnega okolja [Košir, 2008]. Notranje okolje bivanja in delovanja za ljudi, torej uporabnike, predstavlja, za razliko od naravnega zunanjskega okolja, prostor nadzora, tako na psihofizičnem kot fizičnem področju bivanja. Z razvojem in specializacijo človeka in njegovega socio-ekološkega prostora se je in se še vedno dviga tudi stopnja specializacije in nadzora parametrov bivalno-delovnega okolja [Krainer, 2008a]. Kot končno stopnjo takšnega razvoja bi lahko v hipotetičnem primeru pričakovali razvoj popolnoma izoliranega notranjega okolja, ločenega od zunanjih vplivov. Kljub vsemu pa že krajši premislek pokaže, da bodo grajeni sistemi vedno predstavljali le del širšega naravnega okolja ter tako nanj fizično vezani vsaj s fizikalnimi procesi izmenjave energetskih tokov, če ne tudi snovi in informacij [Krainer, 1993]. Dodatno pa se stvari pričnejo zapletati pri človeški fiziologiji in psihi ter posledični psihološki in fiziološki povezavi ljudi z zunanjim okoljem ter vsemi povezanimi okoljskimi vplivi. Izpostavljenost zunanjim vplivom vnaša nepredvidljivo dinamiko, ki vodi do fizioloških šokov ter pozitivnega stresa, s katerim je telesu omogočena priprava na nepredvidljive situacije vsakdanjega bivanja [Stoops, 2004]. V povprečju ljudje v urbanih okoljih preživimo 80–90 % časa v notranjem okolju [Evans, 1998], kar za človeka z življenjsko dobo 80 let predstavlja kar 64–72 let. Prav zaradi tega ima kvaliteta notranjega okolja ter s tem povezan pravilno oblikovan in reguliran stavbni ovoj izrazit vpliv ne samo na učinkovitost in zdravje uporabnikov, temveč tudi na celotno družbo [Fisk, 2000, Sobocki, 2006]. Ima namreč neposreden ekonomski vpliv, ki se odraža v zmanjšanju stroškov za zdravstvo, manjšem

številu izostankov z dela ter v višji delovni učinkovitosti. Vse več dokazov potrjuje domnevo da izboljšanje načrtovanja, upravljanja in vzdrževanja stavb neposredno vpliva na zmanjševanje pojavnosti simptomov sindroma bolnih stavb, alergijskih in astmatičnih obolenj, nalezljivih bolezni dihal [Fisk, 2000] ter kardiovaskularnih težav, povezanih z izpostavljenostjo konstantnim temperaturnim pogojem [Stoops, 2004]. Zavedanje vpliva izboljšanja kvalitete bivalno-delovnega okolja v stavbah pri načrtovalcih, naročnikih in uporabnikih tako predstavlja izreden potencial za zmanjšanje negativnih zdravstvenih in ekonomskih vplivov grajenega okolja na ljudi. Posledica izboljšanja lastnosti notranjega okolja je lahko povečanje ali zmanjšanje potrebne energije za izgradnjo in delovanje stavbe. Pravilno strukturirani, uporabljeni in usklajeni načrtovalski ukrepi lahko simultano predstavljajo pozitivne učinke tako za izboljšanje kvalitete notranjega okolja, kot tudi za zmanjševanje porabe energije ter povečajo trajnost in sonaravnost celotne stavbe (Slika 1). Nasprotno pa lahko nepremišljeni ukrepi, koncentrirani na enostranske učinke (zmanjševanje porabe energije za delovanje stavbe na kakršenkoli možen način), in neprimerna uporaba tehnologije pripeljejo do nezaželenih posledic, na področju porabe energije in hkrati pri kvaliteti notranjega okolja. Končni cilj gradnje stavb naj bi tako bil oblikovanje zdravega in udobnega okolja z najmanjšo možno porabo energije in ne najmanjša možna poraba energije ob zagotavljanju fizioloških minimumov [Krainer, 2008b, Krainer et al., 2008]. S holistično obravnavo stavbe, upoštevanjem principov pasivno solarne arhitekture (PSA) [Goswami et al., 2009] ter aplikacijo primerne tehnologije je možno doseči simultane pozitivne učinke na področju oblikovanja notranjega okolja in pri zmanjšanju porabe energije (Slika 1).



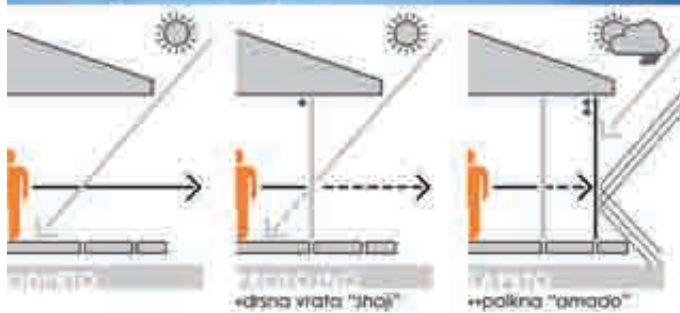
Slika 1: Sinergetični učinki načrtovalskih ukrepov odločilno vplivajo na končno "kvaliteto" stavbe – celota je več kot le seštevek posameznih elementov.

Figure 1: Synergetic effects of design interventions have a decisive influence on the final "quality" of a building – whole is greater than the sum of its parts.

V grobem je možno vsako stavbo deliti na dva med seboj neločljivo povezana dela, in sicer na stavbni ovoj ter notranje okolje. Omenjena dela stavbe sta vedno v konstantni dinamični interakciji izmenjave energije, snovi in informacij z zunanjim okoljem in uporabniki. Vzpostavitev primernih karakteristik notranjega okolja je posledica kompleksnega usklajevanja zunanjih danosti na nivoju mikro, mezo in makro lokacije z zahtevami in željami uporabnikov stavb, pri čemer predstavljajo ovoj in vgrajene tehnologije vmesnik (Slika 2), ki omogoča vzdrževanje meta-stabilnega stanja interakcij, odraženih v lastnostih notranjega okolja [Krainer, 1993, Košir, 2008]. V pričujočem članku bodo predstavljena izhodišča za holistično obravnavanje problema interakcij med zunanjim okoljem, stavbo in uporabnikom ter na teh izhodiščih zasnovan regulacijski sistem za kontrolo notranjega okolja v stavbah. Integralni Regulacijski sistem Notranjega Okolja (IRsNO) [Košir, 2008] je aplikacija izvedena v realnem okolju kabineta na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (FGG) v Ljubljani, ki predstavlja celostno rešitev za uravnavanje parametrov notranjega okolja, ob hkratnem zmanjševanju porabe energije s spreminjanjem lastnosti stavbnega ovoja in koordiniranim upravljanju vgrajenih naprav.

### Struktura notranjega okolja – definicija področja delovanja

Ljudje zaznavamo okolje na dveh različnih vendar medsebojno neločljivo prepletenih nivojih, ki sta močno odvisna od socio-kulturološkega in psiho-fiziološkega odziva posameznika. Kulturno pogojeno zaznavanje okolja je v glavnem posledica pričakovanj, vtisov, povezav, vplivov in želja, ki so običajna v nekem specifičnem socialnem okolju [Krainer, 2008a], ter so posledica zgodovinskega razvoja kulturološkega okolja. Kot takšna je kulturno pogojena zaznava okolja, ki nas obdaja, izrazito subjektivna kategorija, na katero vpliva razvoj posameznika tako v širših (družba) kot tudi ožjih (družina, prijatelji) kulturološko socialnih skupinah. Drug nivo zaznavanja okolja je psiho-fiziološki odziv človeškega telesa na okoljske stimulanse [Schiffman, 1996]. Odziv človeškega telesa predstavlja lažje določljivo in bolj predvidljivo kategorijo, ki pa je kljub vsemu individualna ter različna od osebe do osebe ter hkrati ni neodvisna od kulturološko pogojenega



Slika 2: Stavbni ovoj tradicionalne japonske hiše predstavlja izredno prilagodljivo, ročno regulirano vmesnik med notranjim in zunanjim okoljem [vir fotografije: [http://homepage2.nifty.com/hsuzuki/wallpaper\\_archives/japanese/11\\_engawa\\_1024.jpg](http://homepage2.nifty.com/hsuzuki/wallpaper_archives/japanese/11_engawa_1024.jpg)].

Figure 2: Building envelope of a traditional Japanese house acts as a highly flexible manually regulated interface between indoor and outdoor environment [source of photograph: [http://homepage2.nifty.com/hsuzuki/wallpaper\\_archives/japanese/11\\_engawa\\_1024.jpg](http://homepage2.nifty.com/hsuzuki/wallpaper_archives/japanese/11_engawa_1024.jpg)].

zaznavanja okolja. Človeško telo zaznava okoljske razmere preko čutnih sprejemnikov, ki posredujejo odgovarjajoče informacije možganom, ti jih interpretirajo kot lastnosti okolja, ki pa jih je možno povezati s specifičnim čutom oziroma čuti. Povezava med okoljskimi lastnosti in človeškim receptorskim živčnim sistemom ter posledično interpretacijo možganov v čutne dražljaje, lahko predstavlja enostaven in učinkovit način klasifikacije značilnosti notranjega okolja na podlagi psiho-fiziološkega odziva človeka, torej uporabnika prostora. Ta pristop omogoča definiranje petih pod-okolij (vizualno, toplotno, vohalno, akustično in ergonometrično okolje), ki skupaj tvorijo višjo celoto notranjega okolja (Slika 3). Vsako od petih pod-okolij je možno definirati z vplivnimi faktorji (Slika 3), ki odločilno vplivajo na sprejemljivost okoljskih karakteristik. Za primerno oblikovano, zdravo in uporabniku prilagojeno notranje okolje je ključnega pomena prav regulacija oziroma možnost vpliva na vse ali pa vsaj na ključne vplivne faktorje posameznih pod-okolij. Medsebojna povezanost in prepletenost posameznih vplivnih faktorjev narekuje holistično obravnavo sistema notranjega okolja, saj so lastnosti le-tega rezultat medsebojnih vplivov vseh elementov, kar bi bilo možno v psihološki terminologiji opisati tudi kot neke vrste "okoljski gestalt" [Szokolay, 2008].

Iz praktičnih razlogov je število vplivnih faktorjev sistema notranjega okolja smiselno zmanjšati na minimalno še

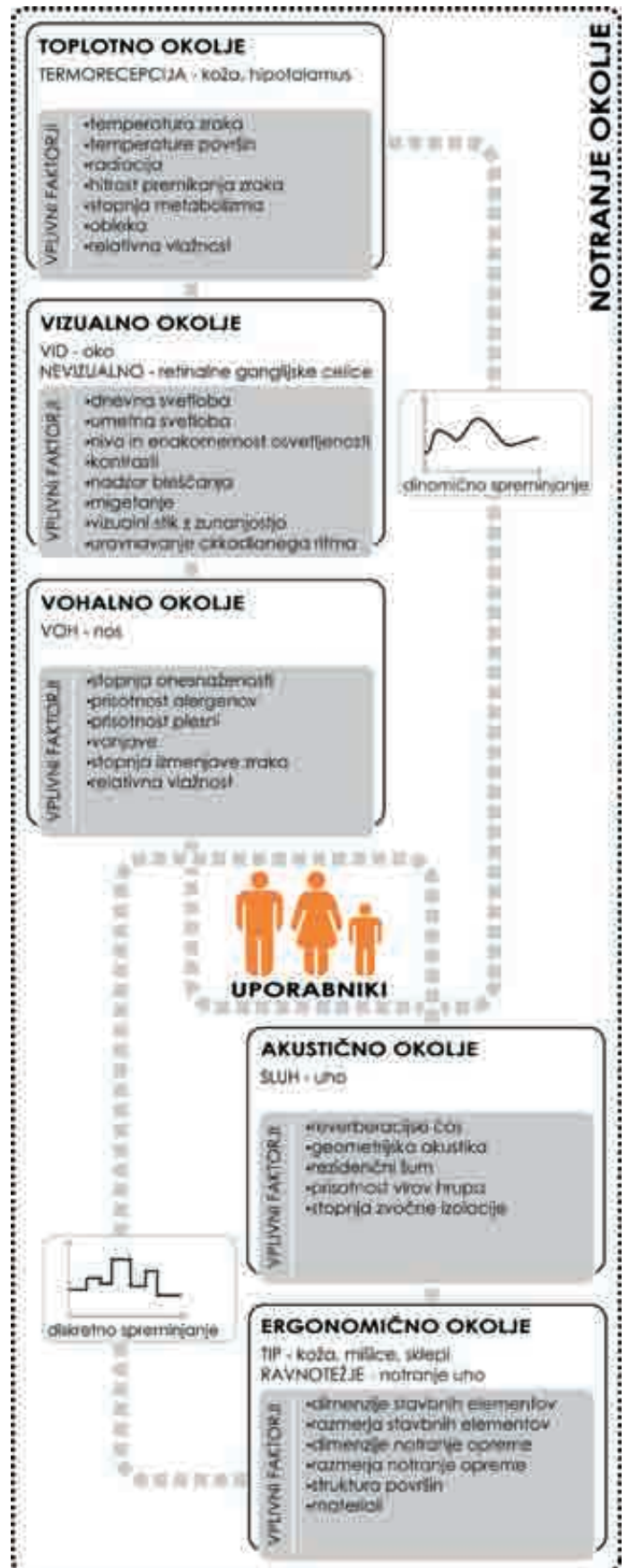
sprejemljivo število s katerim je možno zadovoljivo opisati njegovo delovanje. Takšna redukcija ima predvsem praktične posledice, saj je poenostavljen model primernejši za uporabo tako pri načrtovanju kot tudi pri upravljanju stavbe in njenih sistemov. Redukcija glede na dinamičnost sprememb in vplivov posameznih vplivnih faktorjev kot tudi pod-okolij predstavlja enostaven in uporaben mehanizem za poenostavitev modela notranjega okolja. V tem kontekstu je možno okarakterizirati akustični in ergonomični pod-okolji kot predvidljivi in z izrazito diskretno dinamiko sprememb (Slika 3), saj sta relativno nespremenljiva vse dokler ne nastopi sprememba v zunanjem ali notranjem okolju. Primer takšne diskretne spremembe v primeru akustičnega okolja je dvig nivoja prometnega hrupa v zunanjem okolju ob izgradnji nove avtoceste ali pa sprememba namembnosti stavbe, kar vpliva na uporabo prostorov ter s tem na ergonomično pod-okolje. V primerjavi z akustičnim in ergonomskim pod-okoljem so za toplotno, vizualno in vohalno pod-okolje značilne izrazito bolj dinamične in nepredvidljive dnevne ter sezonske spremembe v zunanjih danostih, kot tudi v zahtevah uporabnikov. Primer izrazitih in nepredvidljivih sprememb je nivo zunanje osvetljenosti, kjer so nihanja med 1000 in 5000 lx v časovnem intervalu 10 minut ali manj zelo pogosta (ob trenutni pooblačitvi neba). Ob upoštevanju zgoraj navedene predpostavke o delitvi na dinamično in diskretno spreminjajoče se vplivne faktorje je možno zaključiti, da je na lastnosti notranjega okolja možno vplivati z aktivnimi in pasivnimi posegi. Tako za reguliranje akustičnega in ergonomičnega pod-okolja v večini primerov zadostujejo pasivni ukrepi na nivoju stavbnih elementov ali komponent, kot je recimo izvedba zvočne izolacije (akustično pod-okolje) ali pa primerno oblikovano delovno mesto (ergonomično pod-okolje). Pri uravnavanju toplotnega, vizualnega in vohalnega pod-okolja je smiselna uporaba kombinacije aktivnih in pasivnih ukrepov, kjer je iz gledišča zmanjševanja porabe energije v stavbah potrebno primarno optimizirati pasivne ukrepe (primerno zasnovan stavbni ovoj) ter nato omogočiti zadosten nivo tehnologije za aktivno optimizacijo notranjega okolja (npr.: avtomatsko senčenje, fiziološko regulirano prezračevanje) [Košir, 2008]. Iz stališča dinamične regulacije notranjega okolja s pomočjo prilagajanja stavbnega ovoja so tako primarna področja ukrepov toplotno pod-okolje (solarni pritoki, pasivno hlajenje, aktivno ogrevanje in hlajenje), vizualno pod-okolje (dnevna svetloba, umetno osvetljevanje) in vohalno pod-okolje (fiziološko prezračevanje na osnovi koncentracije CO<sub>2</sub>).

### Toplotno pod-okolje

Toplotno okolje v stavbah je neposredno povezano in odvisno od mikro, mezo in makro klimatskih danosti lokacije stavbe, kjer imajo največji vpliv dnevne in sezonske spremembe zunanjih temperaturnih pogojev. Najbolj razširjen in obilen vir toplote v vseh klimatskih tipih je sončno sevanje, ki ima disproporcionalno večji vpliv na oblikovanje toplotnega pod-okolja v stavbah

Slika 3: Struktura notranjega okolja deljena na pet pod-okolij, osnovanih na psiho-fiziološkem odzivu človeškega telesa. Vsako od pod-okolij ljudje zaznavamo z določenim čutom oziroma čuti, celovita slika notranjega okolja pa je pogojena z vplivom in interakcijami med posameznimi deli.

Figure 3: Structure of the indoor environment with the corresponding five sub-environments based on the psycho-physiological response of the human body. Each of the five sub-environments is perceived by a specific sense or senses while the final perception of the indoor environment is defined by the influence and interactions between each part.



[Goswami et al., 2009] v primerjavi z ostalimi viri (zunanji topel zrak, notranji viri). Popolnoma drugačna pa je situacija pri toplotnih ponorih (radiacijsko hlajenje, zunanji hladen zrak, evaporacijsko hlajenje), kjer so le-ti izrazito odvisni od makro in mikro-lokacijskih lastnosti stavbe. Lastnosti toplotnega pod-okolja stavb so tako kombinacija direktnega vpliva sončnega sevanja (solarni pritoki), izmenjave toplotnih tokov z zunanostjo (transmisijski in ventilacijski pritoki ali izgube), načina uporabe (metabolna toplota, toplota naprav) in dovedene energije (ogrevanje, hlajenje).

Za ljudi primerno in udobno toplotno okolje je predvsem odvisno od pričakovanj in zahtev, kjer veliko vlogo igra homeotermična narava človeškega telesa. Za optimalno toplotno okolje lahko smatramo takšno kombinacijo pogojev, pri katerih je človeški termoregulacijski sistem pod najmanjšim stresom. Takšni pogoji so izpolnjeni, ko je ambientalna temperatura okolice izenačena z nevtralnostno temperaturo [Nicol in Roaf, 1996], ki definira območje temperaturne uravnovešenosti človeškega telesa ob upoštevanju sezonske adaptacije. Za večino aplikacij v notranjem delovno-bivalnem okolju lahko trdimo, da so uporabnikom sprejemljivi temperaturni pogoji takrat, ko je ta enaka nevtralnostni temperaturi z odstopanjem  $\pm 2.5$  K. Pri individualizaciji toplotnega okolja pa je potrebno upoštevati tudi stopnjo metabolizma, faktor obleke, radiacijsko asimetrijo, hitrost premikanja zraka in relativno zračno vlažnost. Orisana kompleksnost faktorjev, ki sooblikujejo notranje toplotno pod-okolje nakazuje smer razvoja, ki se giblje v vse večjo individualizacijo notranjega okolja, kjer nezadovoljna manjšina ni zanemarjena zaradi zadovoljne večine uporabnikov.

### Vizualno pod-okolje

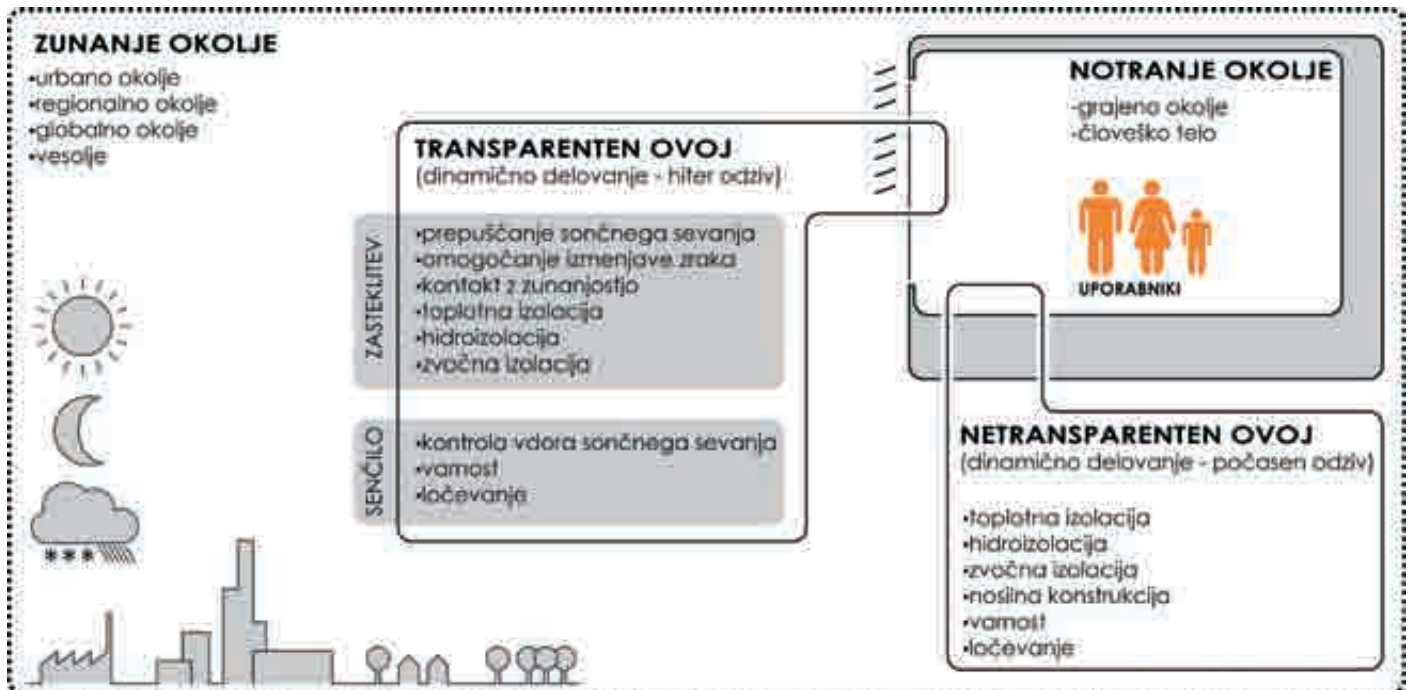
Svetloba v notranjih okoljih je nujna za opravljanje večino procesov, ki se opravljajo v stavbah, nepogrešljiva pa je predvsem v bivalnih in večini delovnih okoljih zaradi svoje kvalitete in intenzitete ( $lm/W$ ), ki jo ne dosega noben vir umetne osvetlitve [Krainer et al., 2008]. Vpliv dnevne svetlobe na uporabnike notranjih okolij v stavbah se odraža na fiziološkem in psihološkem nivoju, saj omogoča regulacijo cirkadianega ritma [Hubalek et al., 2010] s sprožanjem mehanizma za proizvodnjo hormona melatonina ter posledično uravnavanje spalnega cikla, zbranosti in sposobnost koncentracije. Izpostavljenost človeške kože dnevni svetlobi povečuje sposobnost sintetizacije vitamina D ter s tem povezane absorpcije kalcija, kar posledično zmanjšuje možnost nastopa osteoporozе in rahitisa [Ander, 2003]. Študija, ki jo je v Kaliforniji izvedla Heschong Mahone Group je neizpodbitno dokazala pozitivne učinke dnevne svetlobe na sposobnost učenja in delovno uspešnost v šolah [Heschong, 2003a] ter delovno učinkovitost v pisarniških okoljih [Heschong, 2003b]. Pri primerjavi uspešnosti šolskih otrok se je izkazalo, da so tisti, ki so bili izpostavljeni večji količini dnevne svetlobe v učilnicah napredovali za 20 % hitreje pri matematičnih testih ter za 26 % pri bralnih sposobnostih, v primerjavi s tistimi v z dnevno svetlobo slabo osvetljenih učilnicah. Z gledišča porabe energije v stavbah uporaba dnevne svetlobe močno vpliva na porabo električne energije za osvetljevanje ter posledično tudi na potrebo po ohlajevanju prostorov [Dogrusoy in Tureyen, 2007], kar pride do izraza predvsem v poslovnih in trgovskih stavbah. Seveda je umetna razsvetljava v grajenem okolju nujna kot dopolnilni vir svetlobe v času, ko naravna svetloba ni na voljo (nočni čas) ali ko je le-ta nezadovoljive intenzitete (oblačno vreme).

Oblikovanje stavb na način, da je omogočen primeren nivo in kvaliteta osvetljenosti z dnevno svetlobo za vizualne naloge je dobro raziskano področje gradbene fizike, ki omogoča z upoštevanjem osnovnih pravil in ob uporabi primernih analitičnih orodij oblikovanje zelo kvalitetnega vizualnega pod-okolja. Veliko slabše pa je raziskan nevizualen oziroma biološki vpliv dnevne svetlobe na cirkadiani ritem in splošno zdravje ljudi. Ker človeško telo ločeno zaznava vizualne (čepki in paličice v očesu) in nevizualne (retinalne ganglijske celice) učinke dnevne svetlobe lahko prihaja v notranjih okoljih do nezadostne izpostavljenosti dnevni svetlobi z gledišča nevizualnih učinkov ob hkratni zadostni osvetljenosti za vizualne naloge [Košir et al., 2011].

### Vohalno pod-okolje

Kvaliteta vohalnega pod-okolja oziroma notranje atmosfere v stavbah je verjetno najbolj neraziskano in zanemarjeno področje oblikovanja notranjega okolja v stavbah kljub temu, da ima izrazite vplive na zdravje in počutje uporabnikov [Fisk, 2000]. Kvaliteta zraka v stavbah je lahko vzrok za nezadovoljstvo uporabnikov na dveh nivojih, in sicer na zaznavnem nivoju kot posledica zatohlega zraka in izvorov neprijetnih vonjav (npr.: človeški metabolizem). Drug nivo predstavlja prisotnost različnih kemičnih spojin [CR 1752, 1998], kjer primarno nevarnost predstavlja izpostavljenost strupenim snovem, ki jih človeško telo ni sposobno zaznati. Izvor nevarnih snovi v notranjem zraku so predvsem materiali vgrajeni v stavbo in opremo, slabo načrtovani ali nevezdrževani prezračevalni sistemi, nepravilno hranjene kemikalije ter naravni viri. Ker je področje vpliva kemičnih spojin, predvsem pa vpliv kombinacije različnih kemičnih spojin v notranjem okolju stavb, slabo raziskano [World Health Organization, 2000], je najbolj smiseln ukrep odstraniti vse potencialne vire iz notranjega okolja. Ob predpostavki, da so iz notranjega okolja odstranjeni vsi ali vsaj večina potencialnih virov strupenih kemikalij, lahko zaključimo, da na kvaliteto notranjega vohalnega pod-okolja v stanovanjskih in poslovnih stavbah vplivajo predvsem metabolni procesi uporabnikov ter njihove aktivnosti [Košir, 2008]. Izjemo predstavljajo okolja, v katerih takšna odstranitev ni mogoča (industrijska okolja), saj je prisotnost strupenih substanc (npr.: azbest, toluen, vinil klorid, benzen, radioaktivne snovi) posledica procesa, ki se vrši v stavbi. V takšnih primerih je potrebno izvajati ukrepe na nivoju osebnih zaščitnih ljudi, ki delajo v takšnem okolju, ter s tem zmanjšati oziroma ublažiti nezaželene posledice.

Za primerno vzdrževanje kvalitete zraka v notranjem okolju, kjer je primarni vir onesnaženja človeški metabolizem (zaznavne obremenitve) se izkaže kot zelo praktičen pristop uravnavanje koncentracije  $CO_2$ . Čeprav človeški olfaktorični sistem ni sposoben zaznati  $CO_2$ , je le-ta dokazano [CR 1752, 1998] zelo dober pokazatelj kvalitete zraka. S primerno izmenjavo zraka z zunanostjo je tako možno doseči vrednosti koncentracije  $CO_2$ , ki se ne razlikujejo od zunanjih ter jih ljudje zaznavamo kot "svež" zrak. Primerno stopnjo prezračevanja je možno doseči s tehnološko enostavnimi (npr.: ročno lokalno prezračevanje) ali sofisticiranimi (npr.: avtomatsko vodeno lokalno prezračevanje) rešitvami, vendar z različno stopnjo učinkovitosti. Pri izbiri prezračevalnega sistema notranjega okolja ni zanemarljiv tudi psihološki učinek možnosti ročnega odpiranja oken, ki uporabnikom ponuja večjo fleksibilnost uporabe in tako vpliva na njihovo učinkovitost [Heschong, 2003a].



Slika 4: Stavbni ovoj kot vmesnik med zunanjim in notranjim okoljem je možno ločiti na dva dela okarakterizirana z izrazito različnima časovnima odzivoma. Ker je za transparentni del stavbnega ovoja značilen hiter odziv, predstavlja tudi primarno polje aplikacije dinamičnih ukrepov za regulacijo notranjega okolja.

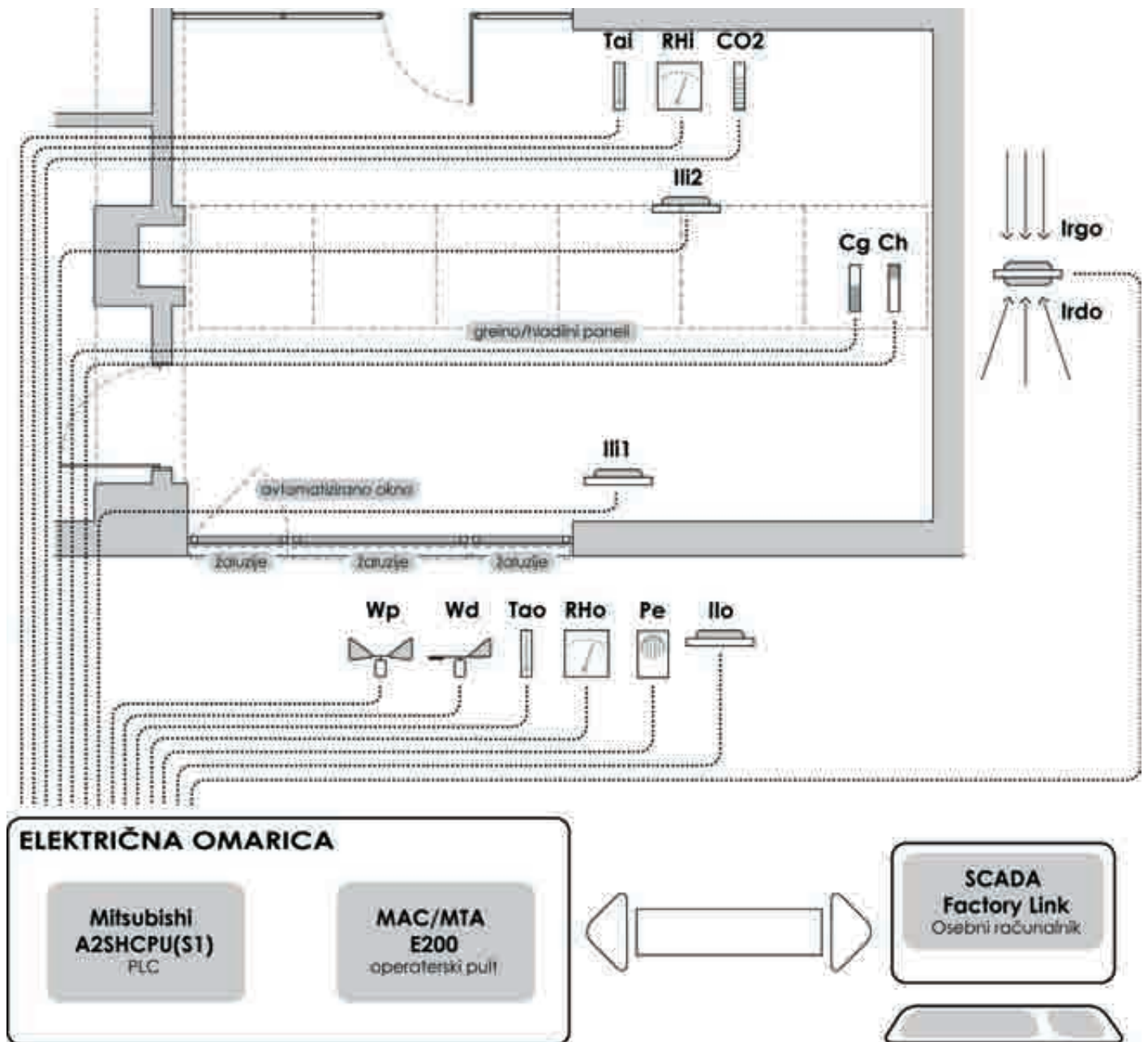
Figure 4: Building envelope represents an interface between external and indoor environments with two distinctively different temporal responses. Due to its quick response to external influences the transparent part of the building envelope is also the primary field of dynamical interventions for the regulation of internal environment.

### Stavbni ovoj – interaktivni vmesnik

Sistemi notranjega bivalno-delovnega okolja so z izmenjavo energije, snovi in informacij neločljivo vezani na zunanje okolje ter tako v konstantni dinamični interakciji z zunanjimi danostmi. Ta izmenjava se vrši preko vmesnika, ki ima vlogo zaščite in ločevanja ter hkrati posredovanja zelenih in zadrževanja neželenih vplivov iz zunanosti v notranost in obratno. Vmesnik, ki se v primeru stavb manifestira v obliki stavbnega ovoja, predstavlja element stavbe, ki omogoča interakcijo grajenega okolja z zunanostjo ter tako na splošno tudi definira obseg bivalno-delovnega okolja. Stavbni ovoj kot zaključena celota, ki objema notranji prostor in ga tako ločuje kot tudi povezuje z zunanostjo, je kulturološko izvoren ter tehnološko in klimatološko pogojen del stavbe [Canadian Architect] [Deplazes, 2008] [Krainer, 2002]. Stavbni ovoj je izrazito heterogena struktura, ki jo je možno deliti glede strukturo (transparentni, netransparentni deli), funkcijo (nosilna konstrukcija, toplotna zaščita, zaščita pred vodo, zvočna zaščita, psihofizična zaščita, ...) in pozicijo v stavbi (strehe, odprtine, tla, stene, ...).

Iz stališča obravnavanja interakcij med zunanjim in notranjim okoljem je najbolj zanimiva delitev na transparentne in netransparentne elemente ovoja (Slika 4), ki se z upoštevanjem trenutne tehnologije gradnje razlikujejo zlasti v časovni odzivnosti, transparentni deli so tako bolj in netransparentni deli manj časovno odzivni. Prvi tako omogočajo uporabnikom hiter odziv na njihove zahteve in tudi na zunanje pogoje pri prenosu energije, snovi in informacij. Za netransparentni del stavbnega ovoja pa je ob izpolnitvi zadostne toplotne zaščite značilno, da opravlja predvsem nosilno in ločevalno funkcijo (psihofizična zaščita ter zaščita pred vdorom vode in vlage). Aktivna vloga oziroma hitrost in stopnja prilagodljivosti transparentnih elementov je v veliki meri odvisna od njihove

strukture oziroma zasnove. Tako v principu gradnja na višjem tehnološkem nivoju omogoča tudi večjo prilagodljivost odprtini željam in zahtevam uporabnikov [Canadian Architect]. Pogled v konceptualno zasnovo transparentnih elementov pa odkrije, da v zadnjih 2000 letih na tem področju ni bilo večjih preskokov, saj je prihajalo le do tehnoloških izboljšav. Tako kot v preteklosti tudi dandanes osnovo zunanjega transparentnega dela stavbnega ovoja predstavljata zasteklitve in v neki obliki aplicirana sončna zaščita (Slika 4). Okno oziroma zasteklitve v sistemu stavbnega ovoja omogoča vizualni kontakt z zunanostjo, prehod sončnega sevanja v notranji prostor, pritoke oziroma odtok toplote ter izmenjavo zraka z zunanjim okoljem [Deplazes, 2008]. Senčila pa uporabnikom omogočajo regulacijo pritočev sončnega sevanja in nivoja dnevne svetlobe ter vzpostavljajo zasebnosti, ko stik z zunanostjo ni zaželen. Učinkovitost senčil pri opravljanju navedenih nalog pa je zelo močno odvisna od uporabljenega tipa (fiksna, premična) in pozicije senčila (zunaj, med stekli, v notranosti) [Deplazes, 2008] [Košir, 2008]. Oba funkcionalna sloja, združena v sistem transparentnega ovoja stavbe, tako predstavljata izrazito aktiven element interakcije notranjega okolja z zunanostjo. Funkcionalnost sistema zasteklitve in senčila je nadalje možno še dodatno razširiti s vključitvijo aktivnih sistemov za izkoriščanje sončnega sevanja (npr.: fotovoltaični moduli, solarni kolektorji) v senčilo [Košir et al., 2010], ali pa z integracijo senčila in zasteklitve (elektrokromna, gasokromna stekla) zmanjšati količino mehanskih elementov. Dinamična narava transparentnih delov stavbnega ovoja skupaj s pripadajočimi elementi senčenja zahteva za primerno delovanje vzpostavitev zadostnega nivoja regulacije. V splošnem je možno trditi, da večja kot je prilagodljivost uporabljenih sistemov, višjo stopnjo regulacije ti zahtevajo. Kljub vsemu pa je v današnjih stavbah večinoma v uporabi le ročna regulacija,



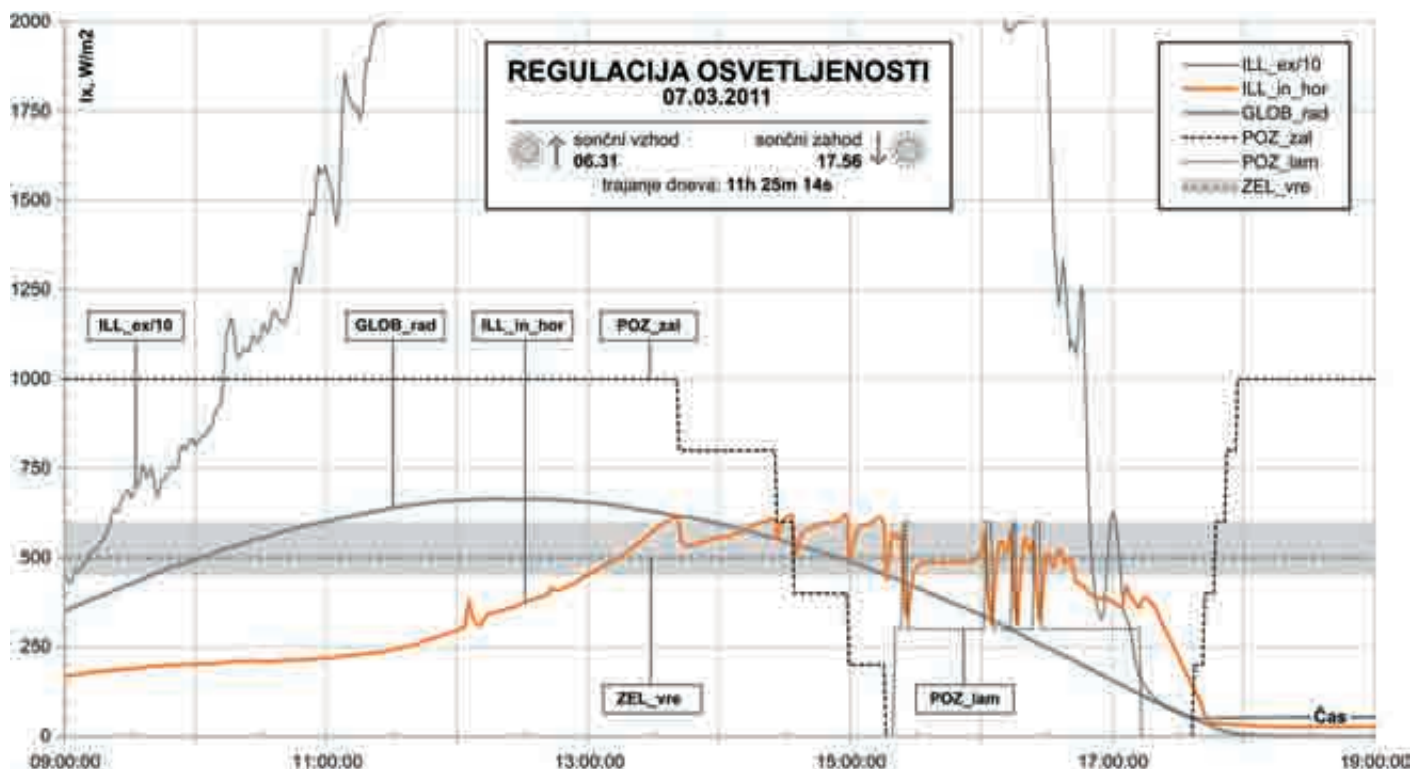
Slika 5: Shematski prikaz tlorisa kabine, senzorske mreže in osnovnih elementov IRsNO. Elementi senzorske mreže so sledeči: Ili1 in 2 – notranja osvetljenost, Tai – notranja temperatura zraka, RHi – notranja relativna vlažnost, CO2 – koncentracija CO2, Cg in Ch – poraba energije za ogrevanje in ohlajevanje, Irgo – direktno sončno sevanje, Irdo – odbito sončno sevanje, Ilo – zunanja osvetljenost, RHo – zunanja relativna vlažnost, Tao – zunanja temperatura zraka, Pe – senzor padavin, Wp – jakost vetra, Wd – smer vetra.

ki ne omogoča dovolj velike fleksibilnosti niti pri kontroli stavbnega ovoja niti pri ostalih vgrajenih napravah, in se je zaradi človeške sposobnosti adaptacije na klimatske razmere izkazala kot neučinkovita oziroma premalo odzivna. Naslednji tehnološki korak v oblikovanju bolj učinkovitega stavbnega ovoja ter posledično bolj udobnega notranjega okolja je zagotoviti primeren nivo avtomatske regulacije. Takšen sistem mora pristopati k regulaciji notranjega okolja in stavbnega ovoja celovito, saj parcialne rešitve, kjer se obravnava samo del problema (npr.: ogrevanje, prezračevanje, osvetljevanje) zanemarjajo holistično naravo sistema notranjega okolja stavb.

Figure 5: Representation of the IRsNO system with its basic elements. Sensor array is comprised of the following sensors: Ili1 & 2 – internal illumination, Tai – internal air temperature, RHi – internal relative humidity, CO2 – concentration of CO2, Cg & Ch – energy consumption for heating and cooling, Irgo – direct solar radiation, Irdo – reflected solar radiation, Ilo – external illumination, Rho – external relative humidity, Tao – external air temperature, Pe – precipitation detector, Wp – wind power, Wd, wind direction.

### Regulacija notranjega okolja - primer

Sistem za regulacijo notranjega okolja IRsNO uravnava lastnosti toplotnega (senčenje, hlajenje s prezračevanjem, aktivno hlajenje in ogrevanje), vizualnega (dnevna svetloba, umetna razsvetljava) in vohalnega (fiziološko pogojeno prezračevanje glede na koncentracijo CO<sub>2</sub>) pod-okolja kabine v stavbi FG na Jamovi cesti 2 [Košir, 2008]. Kabinet ima površino 38.80 m<sup>2</sup>, z zahodno orientirano zasteklitvijo skupne površine 11.40 m<sup>2</sup>, ter relativno nizko zasedenostjo prostora, saj ta znaša le 0.05 oseb/m<sup>2</sup>. Zasteklitev je deljena na šest pod-enot, pri čemer je vsaka opremljena z motorizirano žaluzijo na zunanji strani,



Slika 6: Regulacija osvetljenosti notranjega okolja kabineta v stavbi FGG dne 7.3.2011 med 9.00 in 19.00. Na grafu je prikazana zelena notranja osvetljenost z definiranimi zadovoljivimi odstopanji (ZEL\_vre), dejanska notranja osvetljenost (ILL\_in\_hor), zunanja osvetljenost deljena s faktorjem 10 (ILL\_ex/10), globalno sončno sevanje (GLOB\_rad), položaj žaluzij (POZ\_zal) ter naklon lamel (POZ\_lam).

Figure 6: Regulation of the indoor environment of the office in the FGG building during March 7th 2011 between 9:00 and 19:00. The featured graph presents internal illuminance set-point value with the defined acceptable deviations (ZEL\_vre), internal illuminance (ILL\_in\_hor), external illuminance divided by factor of 10 (ILL\_ex/10), global solar radiation (GLOB\_rad), position of blinds (POZ\_zal) and the inclination of blades (POZ\_lam).

te pa se uporabljajo za regulacijo solarnih pritokov in dnevne osvetljenosti prostora. Prezračevanje in hlajenje z prezračevanjem je omogočeno z odpiranjem motoriziranega okna, dovajanje dodatne energije za ogrevanje in hlajenje pa s pomočjo stropnih nizkotemperaturnih radiacijskih panelov. V primeru nezadostne osvetljenosti delovnih mest z dnevno svetlobo je dodatna umetna osvetlitev omogočena s šestimi stropnimi fluorescentnimi svetili. Strukturno gledano je IRsNO deljen na senzorsko mrežo, procesno enoto in nadzorni sistem (Slika 5). Jedro regulacijskega sistema je zasnovano okoli industrijskega programabilnega logičnega krmilnika (PCL), ki opravi vse potrebne spremembe stanja aktuatorjev glede na predhodno definirana pravila in želje uporabnikov. Nadzor in spreminjanje nastavitve delovanja sistema je vodeno preko standardnega osebnega računalnika in namensko oblikovane aplikacije izvedene v SCADA Factory Link (Supervisory Control and Data Acquisition & Human Machine Interface) programskem okolju. Vsi izmerjeni okoljski podatki in vsi podatki o delovanju sistema so shranjeni v zunanji Microsoft SQL bazi ter so tako na voljo za kasnejšo nadaljnjo obdelavo. IRsNO je zasnovan kot hibridni regulacijski sistem, v katerem so uporabljeni konvencionalni proporcionalno-integrirni (PI) regulatorji kot tudi napredni regulatorji na osnovi mehke logike, vse skupaj pa je med seboj povezano v obliki kaskadnega regulacijskega sistema. Prednost uporabe mehke logike v primerjavi s konvencionalnimi regulacijskimi pristopi je predvsem v bolj intuitivni izvedbi regulacijskih pravil, saj so le-ta formulirana s pogojno posledičnimi pravili v obliki "ČE", "POTEM". Takšen pristop je zelo podoben človeškemu načinu

razmišljanja in dojemanja ter omogoča matematično modeliranje lingvističnih spremenljivk kot so zelo hladno, toplo, presvetlo [Munakata, 1998]. Uporaba mehke logike za nadzor notranjega okolja v stavbah se je izkazala kot upravičena pri mnogih drugih uspešnih eksperimentalnih aplikacijah [Košir et al., 2006]. Regulirane količine notranjega okolja kabineta so horizontalna osvetljenost delovne površine (vizualno pod-okolje), notranja temperatura zraka (toplotno pod-okolje) in koncentracija CO<sub>2</sub> (vohalno pod-okolje). Funkcionalno gledano je IRsNO sestavljen iz regulacijskih zank za osvetljenost, ogrevanje, hlajenje in prezračevanje. Ker pa se regulacija posameznih parametrov notranjega okolja velikokrat izvaja z istimi aktuatorji (npr.: uravnavanje solarnih pritokov in dnevne osvetljenosti se regulira s pomočjo senčil) je potrebno obravnavati sistem celovito ter predvideti potencialne medsebojne interakcije. Takšna organizacija neizbežno pripelje do hierarhične strukture, pri kateri imajo nekateri ukrepi prednost pred drugimi. Običajno to pomeni, da sistem prioritetno izbere regulacijo tistega parametra, na katerega so uporabniki bolj občutljivi (osvetljenost, kvaliteta zraka). Tako ima prezračevanje prednost pred zmanjševanjem toplotnih izgub, saj ima slaba kvaliteta notranjega zraka negativne posledice na udobje in storilnost ter hkrati na zdravje uporabnikov. Človeški odziv na visoke koncentracije CO<sub>2</sub> je skoraj takojšen (pojav glavobola, zaspanost), pri spremembah temperatur pa prihaja do časovnega zamika zaradi inercije procesa prenosa toplote ter adaptacije človeškega telesa. Podobno je z regulacijo notranje naravne osvetljenosti, na spremembe katere so uporabniki bolj občutljivi

kot pa na temperaturna nihanja, pod pogojem da le ta niso pretirana (nihanja  $\pm 2.5$  K so za večino uporabnikov še vedno sprejemljiva [CR 1752, 1998]). Pri izbiri ukrepov oziroma aktiviranju aktuatorjev, IRsNO podobno uporabi najprej tiste ukrepe, ki so energetske bolj učinkovite. To pomeni, da se notranje lastnosti okolja najprej poskuša regulirati s PSA ukrepi, kot so senčenje ali hlajenje s prezračevanjem, šele če ti ukrepi ne dosežejo zadovoljivih rezultatov se aktivira aktivno hlajenje in ogrevanje ali umetna razsvetljava. Za zadovoljivo delovanje avtomatskega regulacijskega sistema v stavbah je poleg njegove dejanske učinkovitosti potrebno zagotoviti, da takšen sistem sprejmejo tudi uporabniki notranjega okolja. Velikokrat je lahko prav delovanje avtomatskega sistema tudi vzrok za nezadovoljstvo uporabnikov [Ruck et al., 2000]. Največjo težavo predstavljajo neprestano aktiviranje aktuatorjev (npr.: pogosto premikanje senčila, ali prižiganje luči) ter nezmožnost ročnega posega v delovanje sistema. V zasnovi IRsNO sta obe potencialni težavi rešeni na takšen način, da je ročni poseg v delovanje vedno omogočen ter ima prednost pred avtomatsko regulacijo. Prepogosto aktiviranje aktuatorjev pa je omejeno s pasovnimi območji še sprejemljivih vrednosti ter časovnimi intervali, znotraj katerih je dovoljena le ena sprememba stanja aktuatorjev. Primer takšnih pravil je definicija zelene vrednosti notranje osvetljenosti (npr.: 500 lx) z definiranimi sprejemljivimi odstopanji  $+100$  lx in  $-50$  lx, premiki senčil, rotacije posameznih lamel senčila ter prižiganje umetne razsvetljave pa so omejeni s časovnimi intervali.

IRsNO kontinuirano regulira notranje okolje kabineta v stavbi FGG od začetka leta 2009. V obdobju zadnjih dveh let se je sistem izkazal kot zanesljiv in primerno zasnovan, saj je zagotovil primerne notranje pogoje v večini primerov. Na sliki 6 je prikazana regulacija notranje horizontalne osvetljenosti prostora dne 7.3.2011 v obdobju med 9.00 in 19.00 uro. V času prikazanega eksperimenta je bila umetna razsvetljava izključena, osvetljenost je bila regulirana izključno s pomočjo premikanja senčil, zelena vrednost osvetljenosti je bila nastavljena na 500 lx z dovoljenimi odstopanji  $+100$  lx in  $-50$  lx. Vremenski pogoji so bili izrazito sončni, kar je razvidno iz meritev globalnega horizontalnega sončnega sevanja (GLOB\_rad). Zaradi zahodne orientacije prostora, ima direktno sončno sevanje vpliv na notranjo osvetljenost šele v popoldanskem času, ko preide sonce v zahodni del nebesne poloble. Med 13.00 in 17.00 je sistem zadovoljivo sledil zeleni vrednosti notranje osvetljenosti (ZEL\_vre) z občasnimi trenutnimi odstopanji, ki so posledica rotacije lamel žaluzij oziroma premikov žaluzij. Primeren nivo notranje osvetljenosti je bil dosežen z manj kot tremi premiki žaluzij v času ene ure. Na diagramu prikazana pozicija žaluzij (POZ\_zal) označuje premike šestih enot, pri čemer vrednost 1000 odgovarja stanju, ko so vse žaluzije dvignjene, vsak naslednji korak pa predstavlja spustitev ene žaluzije. Ko so aktivirane vse žaluzije imajo le-te lamele v horizontalni poziciji (POZ\_lam), kar na diagramu ustreza vrednosti 0. Rotacija lamel se izvaja v korakih od  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  do  $90^\circ$ ; slednja pomeni popolnoma zaprto žaluzijo (POZ\_lam = 900). Trenutni veliki padci, vidni na diagramu med 15.20 in 16.30 uro, so posledica nizkega vpadnega kota sonca, kar pomeni, da je sonce posijalo direktno na senzor osvetljenosti, na kar se je sistem odzval z rotacijo lamel. To je posledično pomenilo padec notranje osvetljenosti, v naslednjem koraku pa je bilo stanje ponovno korigirano. Prikazano delovanje ilustrira prednosti avtomatske regulacije, saj bi brez senčenja notranja osvetljenost narasla do zelo visokih

vrednosti, kar bi bilo za uporabnike izredno moteče. Če bi bila regulacija izvedena ročno, pa bi zaradi adaptacije uporabnikov prihajalo do zapoznelega odziva na spremenjeno stanje.

### Zaključek

Izhodišče vseh načrtovalskih intervencij predstavljenega holističnega ter sistematičnega urejenega pristopa k obravnavanju interakcij med zunanjim in notranjim okoljem ter posledično ovrednotenje vloge stavbnega ovoja je uporabnik. S tem je izpolnjen pogoj za oblikovanje zdravega, udobnega ter stimulativnega notranjega okolja ter posledično energetske bolj učinkovitega sistema, gledano ne samo na nivoju stavbe, ampak tudi na nivoju celotnega socio-ekonomskega sistema. Z razvojem in specializacijo grajenega okolja se sočasno povečujejo zahteve in pričakovanja glede kvalitete in prilagodljivosti notranjega okolja, kar pripelje do potrebe po vse bolj tehnološko naprednih stavbnih sistemih. Sistem avtomatske regulacije notranjega okolja IRsNO s pomočjo prilagajanja karakteristik stavbnega ovoja predstavlja primer nadgradnje funkcionalnosti stavbe, ki omogoča boljše bivalne pogoje, večjo učinkovitost uporabnikov ter istočasno manjšo porabo energije. Zasnovan je na predpostavkah holističnega obravnavanja notranjega okolja stavb ter izkoriščanju PSA ukrepov za reguliranje njihovega delovanja. Eksperimenti s sistemom IRsNO izvedeni v zadnjih dveh letih so pokazali upravičenost in učinkovitost sistema, saj le ta omogoča avtomatsko uskladitev uporabnikovih zahtev za osvetljevanje, ogrevanje, hlajenje ter prezračevanje ob hkratnih energetskih prihrankih

Oblikovanje notranjega delovno-bivalnega okolja s pomočjo stavbnega ovoja predstavlja osnovo graditeljstva oziroma arhitekturnega oblikovanja stavb, saj se grajeno okolje vzpostavi šele takrat, ko se širši sistem zunanjega okolja loči z neko razmejitvijo. Razmejitev oziroma vmesnik med dvema okoljema pa neizbežno postane polje interakcij bolj ali manj nasprotujočih si pogojev. Stavbni ovoj torej zagotavlja dinamično interakcijo z zunanjim okoljem ter istočasno zagotavljanje primernih pogojev v notranjem okolju. Takšna aktivna vloga stavbnega ovoja predstavlja bistvo PSA načrtovanja stavb, saj predvideva izkoriščanje izmenjave energije, snovi in informacij za doseg uporabniku prijetnega, zdravega in energetske učinkovitega notranjega okolja. Poudariti je potrebno, da je udobno in zdravo notranje okolje vedno primarnega pomena in tako bolj pomembno kot energetska učinkovitost stavbe, saj lahko le zdravi in zadovoljni uporabniki zagotovijo učinkovitejšo družbo, ki je predpogoj za vzpostavitev energetske bolj učinkovitih sistemov. Kljub temu pa se pod okriljem perečih problemov energetske krize in sprememb globalnega klimatskega okolja v arhitekturi in z njo povezanih disciplinah pojavlja parcialno gledanje na težavo učinkovitosti stavb. Kot rešitve za zmanjšanje porabe energije se pojavljajo sistemi oziroma stavbe, ki poizkušajo čim bolj zmanjšati dinamično interakcijo med notranjim in zunanjim okoljem [Krainer et al. 2008]. Primarni cilj takšnih stavb je doseči večjo energetske učinkovitost, s pomočjo vzpostavitve čim bolj stacionarnega stavbnega ovoja, kjer je interaktivnost le-tega motnja in ne prednost. Tehnološki posegi v takšnih stavbah so večinoma naravnani na zmanjšanje porabe energije brez dejanskega premisleka o vplivih na kvaliteto bivalnega okolja in zdravje uporabnikov, ki predstavlja kolateralno škodo.



Takšen pristop predstavlja ostanek redukcionističnega pogleda na naravo in človeka iz 19. stoletja, saj ne priznava kompleksne povezanosti in interaktivnosti med človekom, naravo in umetno ustvarjenim okoljem človeške družbe.

### Viri in literatura

- Ander, D. G., (2003) Daylighting: Performance and design. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Canadian Architect The National Review of Design and Practice, Architectural Science Forum,  
[http://www.canadianarchitect.com/asf/arch\\_science\\_forum.htm](http://www.canadianarchitect.com/asf/arch_science_forum.htm) <dostop marec 2011>.
- CR 1752, (1998): Ventilation for buildings – Design criteria for the indoor environment, European Committee for Standardization, Brussels, 1998.
- Deplazes, A. (ur.), (2008): Constructing architecture: materials, processes, structures. A handbook. – 2nd ed. Birkhäuser, Basel.
- Dogrusoy, I. T., Tureyen, M., (2007): A field study on determination of preferences for windows in office environments. *Building and Environment*, Let. 42, št. 4, str.: 3660-3668.
- Evans, G. W., McCoy, J. M., (1998): When buildings don't work: The role of architecture in human health. *V: Journal of Environmental Psychology*, Let. 43, št. 1, str.: 85–94.
- Fisk, W. J., (2000): Health and productivity gains from better indoor environments and their implications for the U.S. Department of Energy. *V: Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Goswami D. Y. (ur.), Haggard K., Bainbridge D., Aljilani R., (2009): *Passive Solar Architecture Pocket Reference*. International Solar Energy Society, Freiburg.
- Heschong, L., (2003a): *Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment*. Heschong Mahone Group, California Energy Commission, Fair Oaks.
- Heschong, L., (2003b): *Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment*. Heschong Mahone Group, California Energy Commission, Fair Oaks.
- Hubalek, S., Brink, M., Schierz, C., (2010): Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *V: Light Research & Technology*, Let. 42, št. 1, str.: 33-50.
- Košir, M., (2008): *Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike: doktorska disertacija*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Košir, M., Krainer, A., Dovjak, M., Kristl, Ž., (2011): Automatically controlled daylighting for visual and non-visual effects. *V: Light Research & Technology*, članek sprejt v objavo.
- Košir, M., Kristl, Ž., Krainer, A., (2006): Parametrical study of fuzzy control approaches for regulating thermal and optical flows. *V: EuroSun 2006 : Conference Proceedings*, Glasgow, International Solar Energy Society, str. 1-9.
- Košir, M., Kristl, Ž., Orel, B., Krainer, A., (2010): Shading device integrated solar collector for better utilization of renewable solar energy in buildings. *V: Renewable energy 2010: advanced technology paths to global sustainability: joint with 4th International solar energy society conference, Asia Pacific region, 27 June-2 July, 2010, Pacifico Yakahama, Yokahama Japan*. Yokahama: International Solar Energy Society, str. 1-4.
- Krainer, A., (1993): *Building Science and Environment-Conscious, Design Module 1: Design Principles, 7 Toward Smart Buildings*. European Commission TEMPUS Joint European Project JEP-1802.

- Krainer, A., (2002): Sistem, Modul 1, Konstrukcijski sklopi 1. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Krainer, A., (2008a): SUSTAINABLE? ARCHITECTURE, bioclimatic architecture, on line teaching package. SARA – Sustainable Architecture Applied to Replicable Public Access Buildings, [http://kske.fgg.uni-lj.si/Index\\_SI.htm](http://kske.fgg.uni-lj.si/Index_SI.htm).
- Krainer, A., (2008b): Passivhaus contra bioclimatic design – Dedicated to em. Univ.-Prof. Dr. Ing. habil. Dr.h.c. mult. Karl Gertis on the occasion of his 70th birthday. V: Bauphysik, Let. 30, št. 6, str.: 393-404.
- Krainer, A., Košir, M., Kristl Ž., Dovjak M., (2008): Pasivna hiša proti bioklimatski hiši V: Gradbeni vestnik, Let. 57, št. 3, str.: 58-68.
- Munakata, T., (1998): Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Beyond Traditional Paradigms. Springer-Verlag, New York.
- Nicol, F., Roaf, S., (1996): Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project. V: Energy and Buildings, Let. 23, št. 3, str.: 169–174.
- Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L. Scartezzini, J.-L., Selkowitz, S., (2000): Daylight in Buildings A source book on daylighting systems and components. International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems, Paris.
- Schiffman, H. R., (1996): Sensation and perception: an integrated approach. – 4th ed. John Wiley, New York.
- Sobocki, P., Jönsson B., Angst J., Rehnberg C., (2006): Cost of depression in Europe. V: Journal of Mental Health Policy and Economics. Let. 9, št. 2, str.: 87-98.
- Stoops, J. L., (2004): A possible connection between thermal comfort and health. V: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Szokolay, S. V., (2008): Introduction to architectural science: The basis of sustainable design. – 2nd ed., Architectural Press, Oxford.
- World Health Organization, (2000): Air quality guidelines for Europe – 2nd ed., World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen.