

МУЗЕЈ ВАЗДУХОПЛОВСТВА У БЕОГРАДУ – У ТРАГАЊУ ЗА МОДЕЛОМ ХОЛИСТИЧКОГ И ОДРЖИВОГ ТЕМЕЉНОГ ЕНЕРГЕТСКОГ РЕНОВИРАЊА

МАРИЈА С. ТОДОРОВИЋ¹, ОЛИВЕРА ЕЋИМ-ЂУРИЋ²,
СТЕВАН НИКОЛИЋ², СЛАВИЦА РИСТИЋ³ и СУЗАНА ПОЛИЋ-
РАДОВАНОВИЋ⁴; ¹Академија инжењерских наука Србије,
професор-истраживач на Универзитету Куунг Хее, Кореја,
гостујући професор на Југоисточном универзитету, Нан-јинг, Кина;
²Лабораторија за термодинамику и термотехнику, Универзитет
у Београду; ³Институт Гоша, Београд; ⁴Централни институт за
конзервацију, Београд

Рад истиче синергијски однос и нераскидиву везу између конзервације и одрживости. Нити је значај конзервације културне баштине за одрживост добро препозната, нити су потребе културне баштине добро интегрисане у трагању за одрживошћу. Конзервација баштине максимизира употребу постојећих материјала и инфраструктуре, умањује отпад и штити историјски карактер старијих насеља и градова. Рад представља технички напредак у симулацијама карактеристика зграда (СКЗ) и енергетским симулацијама зграда (ЕСЗ), као и косимулацијама у циљу оптимизације енергетске ефикасности, примени обновљивих извора енергије (ОИЕ) и „озелењавања“ у урбанистичком ре-планирању историјских зграда, њиховог окружења, делова насеља и целих градова. У раду се даље наводе почетни резултати студије енергетског реновирања Музеја ваздухопловства у Београду, с посебним освртом на резултате добијене спровођењем симулација карактеристика зграде. Предвиђено темељно енергетско реновирање у циљу постизања „оптимизације свеукупних карактеристика зграде“, треба да обухвати мултифункционалну оптимизацију омотача зграде: замену застакљених површина полупровидним стаклом са ФН ћелијама уз контролисану регулацију особина пропустљивости дневне светлости, односно осветљености унутрашњег простора у циљу очувања експоната – артефаката, као и прецизну контролу меродавних особина унутрашњег ваздуха. Студија показује да реновирање уз интеграцију коришћења ОИЕ може да доведе музеј до статуса „Нула емисије CO₂“, као и статуса одрживе „Енергије+“

BELGRADE AVIATION MUSEUM – IN SEARCH OF A HOLISTIC AND SUSTAINABLE MODEL FOR DEEP ENERGY REFURBISHMENT

Paper recognizes the synergetic relationship and inextricable linkage between conservation and sustainability. Neither, the role of heritage conservation for sustainability has not been well recognized, nor heritage needs have been well integrated into sustainability search. Heritage preservation maximizes the use of existing materials and infrastructure, reduces waste, and preserves the historic character of older towns and cities. Paper presents technical advances in BPS/BES (Building Performance Simulation/ Building Energy Simulation), and in Co-simulation for energy efficiency optimization, RES integrated historic building's greening and historic neighbourhoods, settlements, as well as whole cities urban re-planning. Further, paper presents initial results of the Aviation Museum in Belgrade preliminary energy refurbishment study focusing results obtained via BPS and Co-Simulation. Foreseen is deep energy refurbishment aimed to reach the „total building performance optimization“ encompassing multifunctional optimization of building's skin – glazing replacement with the semi-transparent PV glazing and day-lighting control with the reference to the artefact preservation, as well as the IEQ control analysis. Study shows that the RES integrated refurbishment can result in Museum's

зграде. Најзад, истакнуте су потребе примене даљег развоја најновијих информационо-комуникационих технологија и развоја технологија интегралног пројектовања енергетског реновирања, укључујући посебно важан развој система меродавних репера и вредновања.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: конзервација баштине; одрживост; енергетска ефикасност; обновљиви извори енергије; симулација карактеристика зграда (СКЗ) и информационо-комуникационих технологија (ИКТ); развој система меродавних репера и вредновања

Zero CO₂ emission and even in the sustainable Energy+ status (producing more electricity than using). Finally, outlined are needs for most current ICT knowledge use and refurbishment technologies development, as well as integrated design, including particularly relevant benchmarking and rating system development.

KEY WORDS: heritage conservation; sustainability; energy efficiency; renewable energy sources; BPS and ICT; benchmarking; rating system development

1. Увод

Спровођење мера за постизање енергетске ефикасности у зградама омогућава огромно смањење потреба за енергијом и емисије гасова стаклене баште, пружајући најизгледнију могућност да се оствари значајна уштеда енергије у целом свету, уз смањење испољавања утицаја глобалног загревања. Међутим, да би се постигла одрживост, поред побољшања енергетске ефикасности, неопходно је применити технологије које користе обновљиве изворе енергије (ОИЕ), и меродавне технологије обновљивим изворима интегрисаног енергетског реновирања зграда великог опсега – индустријских размера (Тодоровић, 2012). Један од кључних циљева јесте обезбедити да уговорне стране Оквирне конвенције УН о климатским променама имају информације потребне да потпомогну смањење емисије гасова стаклене баште, које су последице енергетских потреба зграда, будући да спровођење мера за постизање енергетске ефикасности у зградама може да донесе велико смањење потребе за енергијом и смањење емисије CO₂ и осталих гасова стаклене баште, пружајући најизгледнију могућност да се оствари значајна уштеда енергије у целом свету, уз смањење утицаја глобалног загревања.

Међу критичним питањима за побољшање ефикасности у сектору зграда, а посебно у сектору унапређења – реновирања конструкције постојећих зграда, јесте раздвајање економског раста од потрошње енергије, а међу главним иницијативама јесу оне које фокусирају Земљу и њену Одрживост и Отпорност њене Заједнице (Тодоровић, 2000).

Главне карактеристике историјских зграда и зграда културне баштине јесу биоклиматско пројектовање, често специфично флексибилна архитектонска конструкција и рационално коришћење издрљивих грађевинских материјала, као и карактеристичан слободан простор и зеленило који их окружују. Њихова издрљивост и трајност, које се мере стотинама и хиљадама година, потврђује њихову одрживост. Њихов врло извесно дуг преостали животни век, нуди одличне могућности за спровођење мера за унапређење енергетске ефикасности и активну примену технологија које користе ОИЕ у и на зградама као и у њиховом непосредном окружењу, башти, дворишту, парку – чија величина често није занемарљива (NEW4OLD, 2007–2008). Наравно, спровођење технологија ОИЕ зависи од локалне доступности тих извора и националних прописа о културној баштини. Ипак, техничко, тј. инжењерско искуство показује да у многим случајевима креативност у ин-

жењерингу и пројектовању представља помоћ у проналажењу прихватљивих решења.

Наведене чињенице доприносе признавању постојања односа синергије између конзервације и одрживости. Постоји нераскидива веза између баштине и одрживости. Међутим, улога конзервације баштине ради постизања одрживости није још увек у потпуности схваћена, нити су потребе добара културне баштине довољно садржане у истраживањима одрживости. Одрживост је нераздвојива особина историјских зграда. У конзервацији се у највећој мери користе постојећи материјали и инфраструктура, смањује се отпад и штити се историјски карактер старијих насеља и градова. Одрживост почиње са конзервацијом. Узимајући у обзир првобитно прилагођавање историјских зграда климатским условима, данашња одржива технологија може да допуни нераскидиве – инхерентно одрживе особине, а да при томе не угрози јединствени историјски карактер. У раду је утврђен синергијски однос између конзервације и одрживости.

У овом раду се испитују најсавременије технологије обновљивих извора енергије за КГХ и остале техничке системе у зградама у циљу сигурног и одрживог снабдевања енергијом историјских зграда и зграда културне баштине. Технички напредак у симулацијама карактеристика зграда и енергетског понашања зграде (СКЗ/ЕПЗ), а нарочито у косимулацијама (комбиновање више ИТ алатки за предвиђање карактеристика иновативних интегралних система – зграда омотач и структура, КГХ системи и остали технички системи у згради) нуди делотворну оптимизацију њихове енергетске ефикасности и интеграцију ОИЕ (Тодоровић, 2012). На тај начин, примена ОИЕ заснована на енергетској ефикасности, као и хибридикација и комбинована дистрибуирана когенерација и тригенерација енергије, воде ка „озелењавању“ историјске зграде и одрживог историјског окружења, насеља, као и урбанистичком „репланирању“ историјских делова градова у насеља врхунских особина савремених паметних зграда и зграда „Нула емисије“ CO₂.

2. Музеј ваздухопловства у Београду – ризница историје

Музеј ваздухопловства у Београду, основан 1957. године као Музеј југословенског ваздухопловства, налази се поред београдског аеродрома „Никола Тесла“. Садашњи објекат приказан на слици 1 пројектовао је познати архитекта Иван Штраус из Сарајева и отворен је за јавност 21. маја 1989. године. Главна поставка музеја смештена је у архитектонски пажње вредном гео-



Слика 1. Застакљени омотач зграде музеја и бетонска конструкција објекта

дезијски базираном, застакљеном објекту, са додатном поставком ваздухоплова изложених на отвореном простору, тј. платоу око музеја. Збирка садржи преко 200 ваздухоплова, 130 ваздухопловних мотора, неколико радара и ракета. У предворју музеја налазе се сувенирница, ваздухопловне макете, центар за информације и савремена биоскопска сала.

Посетиоце који се приближавају аеродрому „Никола Тесла“ скоро без изузетка привлачи ова огромна стаклена округла конструкција која личи на неки необичан неидентификовани летећи објекат (НЛО, види сл. 1). Зграду окружује велики број војних и цивилних ваздухоплова, поред радара и других техничких чуда ваздухопловне технологије, јасно указујући посетиоцима да су стигли до Музеја ваздухопловства. Изградња овог великог и сложеног објекта, који заузима површину од преко 10.700 m², почела је средином 1970-тих, али се због техничких и финансијских тешкоћа прилично каснило у реализацији пројекта. Изградња зграде музеја завршена је тек 1988. године. Те године је постављена прва стална изложба и музеј је отворен за јавност 21. маја 1989. године.

Од тада стална изложбена поставка Музеја ваздухопловства привлачи пажњу великог броја домаћих и иностраних посетилаца, што га чини једном од најпопуларнијих и највише посећиваних знаменитости у Србији. Истраживања показују да посетиоце у изложбене хале музеја, поред модерне архитектуре самог објекта, доводе велика вредност и разноврсност оригиналних ваздухоплова, ваздухопловних мотора, ваздухопловног наоружања и изложених макета, и чињеница да се у музеју налазе и други предмети из ове области и документа која сведоче о развоју националног и међународног ваздухопловства у XX веку – треба истаћи посебно националног јер је Србија била међу малобројним земљама пионира света производње ваздухоплова.

Поред изложених ваздухоплова налазе се и изложбе које описују развој разних фаза и периода у историји домаћег војног и цивилног ваздухопловства. У складишту и библиотеци музеја налази се на хиљаде књига, предмета и документа о ширењу ваздухопловства у нашој земљи и на међународном плану. Није чудо да су многи светски стручњаци који су имали прилику да стекну бољи увид у вредне експонате изјавили да Музеј ваздухопловства у Београду представља праву ризницу историје ваздухопловства.

Музеј поседује преко 200 ваздухоплова који су коришћени у српском и југословенском ратном ваздухопловству, као и у ваздухопловству других држава, али и ваздухо-

пловним и авио-компанијама, од једрилица и хеликоптера до ловаца млазњака, као и ваздухоплова који су чинили део флоте неколико цивилних авио-компанија и приватних летачких клубова. У сваком тренутку унутар објекта је изложено око 50 експоната. Неколико изложених ваздухоплова представља једине преостале примерке своје врсте. Тако, музеј поседује једини познати преостали примерак модела Фиат Г. 50. (Fiat G.50 Freccia – „Стрела“) који је италијански борбени ваздухоплов из Другог светског рата. Први пут је полетео у фебруару месецу 1937. године. Фиат Г.50 је био први произведени италијански једнокрилац једносед, направљен искључиво од метала са затвореном пилотском кабином и увлачивим стајним трапом. Почетком 1938. модели „Freccia“ су коришћени у италијанском војном ваздухопловству (Regia Aeronautika) и шпанском војном ваздухопловству, „Aviazione Legionaria“, где се показао као врло брза летелица којом се одлично маневрише. Поред тога, збирка музеја садржи преко 130 ваздухопловних мотора, још више радара, ракета, разне ваздухопловне опреме, преко 20.000 референтних књига и техничке документације, као и више од 200.000 фотографија.

3. Испитивања квалитета унутрашње средине и процена ризика оштећења експоната

Као први корак у дефинисању холистичког пројекта за темељно реновирање/реконструкцију, био је неопходан пројектни задатак за одређивање квалитета унутрашње средине, укључујући квалитет ваздуха и дневно осветљење, као и за утврђивање оштећења на експонатима која су већ настала, односно да би се проценили стварни ризици за њихово даље пропадање.

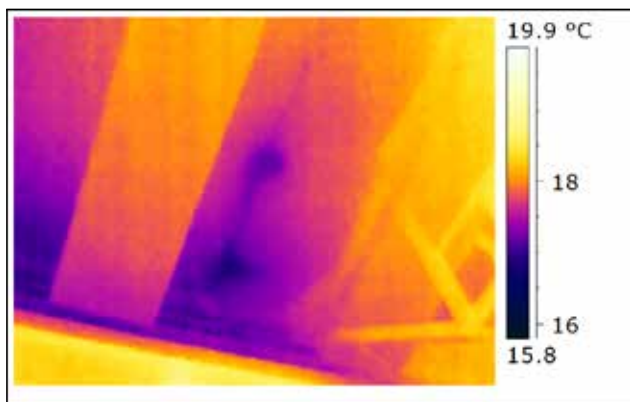
Извршена мерења температуре и влажности. Врло значајан извор информација за наш приступ дефинисању циљева и задатака пројекта реконструкције био је „Извештај о извршеним испитивањима у Музеју ваздухопловства у Београду“ (Полић-Радвановић и Живанчевић-Поповић, 2010). Извршена испитивања су обухватила квалитет унутрашње средине: мерења низа меродавних вредности температура и релативне влажности ваздуха као и влажности – углавном кондензације на површинама зидова и продора влаге у зиду депоа и простору где су изложени експонати (артефакти) на галерији, као и процена услова дневног светла и одређивање утицаја истих на експонате. Мерења и бележење температуре на различитим површинама обављени су методом термографије коришћењем

ИЦ камере (Therma CAM T-335, FLIR Systems). Циљ обављеног испитивања био је да се одреди утицај постојећих услова унутрашње средине, посебно на металне експонате, као и да укаже на потенцијалне ризике. Метод термографског мерења помоћу инфрацрвене камере коришћен је као неконтактна метода/метода без разарања која омогућава мерење са даљине и мерење предмета или њихових делова којима је немогуће прићи. Поред тога, обављено термографско снимање обухватило је металне експонате (ваздухоплов ФИАТ Г.50) под променљивим температурним условима, и унутрашњу страну омотача зграде, у року од неколико месеци, под различитим спољашњим временским условима. Дигитални и термографски записи су урађени паралелно. Резултати испитивања су приказани термограмима.

Испитивање корозије на ваздухопловима. Од великог значаја била је и анализа узорака продуката корозије сивобеле боје од легуре алуминијума, који су отпали од ваздухоплова (ваздухоплов ФИАТ Г. 50). Алуминијум Al (JCPDS 4-0787) био је доминантан у узорцима. Од продуката корозије, пронађен је кристализован алуминијум хидроксид који се стварао сваке недеље, гибсит $Al(OH)_3$ или, као што се обично наводи у литератури, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ (JCPDS 70-2038). На тај начин, резултати су показали да у депоу музеја не постоје одговарајући услови за чување металних експоната, с обзиром на влагу. Термограми су показали да је влага присутна у згради због продирања воде и кондензације, под променљивим температурним условима. Постојање влаге у депоу, доказано испитивањем помоћу термографије, ствара услове за процесе корозије.

Осим макроскопски видљиве влаге, добијени термограми су такође потврдили присуство скривене влаге у депоима на неколико локација. На галерији Музеја ваздухопловства, пронађена је влага на мањој површини. Испитивање ваздухоплова ФИАТ Г.50 помоћу термографије омогућило је да се визуелизује унутрашња конструкција авиона испод оплате ваздухоплова. Што се тиче механичке и корозионе штете, неопходно је проширити ова испитивања и користити активну импулсну термографију.

Упоредна испитивања вршена радиографијом, као и анализа продуката корозије показали су присуство високог степена корозије и корозивног оштећења. Неопходно је применити мере потпуне заштите подстичући рехабилитацију депоа и конзервацију музејских експоната, што значи да предвиђени пројекат енергетског реновирања музеја треба да буде пажљиво пројектован,



Слика 2. Термограми: део таванице изнад улаза у депо (лево) и горњи леви део; веће продирање воде и задржавање влаге у зидовима (десно)

планиран и реализован темељно и холистички (Troj A., Lollini R. 2011).

Реновирање омотача, система за КГХ, осветљења и осталих техничких система зграде музеја и укупне карактеристике (учинак) зграде, треба да обезбеде одговарајућу регулацију квалитета унутрашње средине у циљу будућег очувања експоната – елиминишући ризике од даљег оштећења и пропадања експоната тј. артефаката (Sacchi, E., Muller, C., 2005).

Термографска мерења. Неколико термографа депоа илуструју резултате испитивања влаге на сликама 2 и 3 (Полић-Радовановић и Живанчевић-Поповић, 2010).

На делу таванице изнад улазних врата у депо (сл. 2 на левој страни) присуство влаге је пронађено на деловима где су мрље већ биле уочене на видео снимку, али и на деловима где се присуство влаге не види голим оком. На слици 2 (десно), у горњем левом углу депоа уочена је количина влаге већа него она на таваници. Вода се слива низ зид. Температурна разлика између сувих и влажних делова површине била је преко 2 °C.

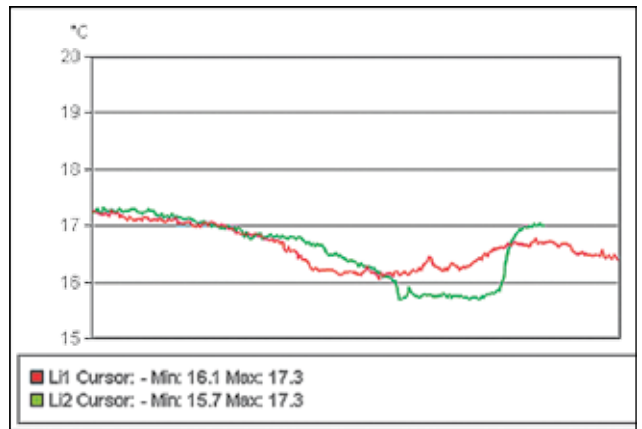
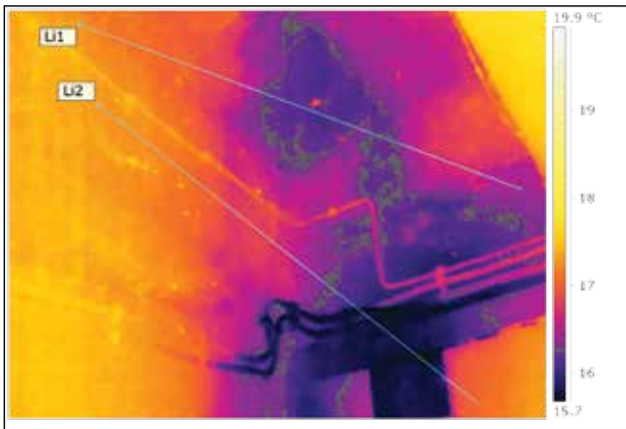
Предмети у депоу музеја су изложени вишој температури у односу на зидове у углу. У депоу, у близини зида, где је измерена температура ваздуха 19 °C и влажност ваздуха 73%, јавља се кондензација на површини зида снижавањем температуре на 4 °C (уз употребу софтверског пакета Flir).

Остали термограми показују да прозори нису добро заптивени, јер постоје хладније зоне око прозора, а поред тога доста је места на зиду испод прозора, окружених јасно издвојеним зонама са присуством влаге испод фасадних цигли, које се не могу детектовати на дигиталном – видео снимку.

Испитивање ваздухоплова Фиата 50 термографијом. Испитивање унутрашње структуре и постојећих оштећења у трупу и на крилу ваздухоплова F50 извршено је активном термографијом (предмет је делимично загреван рефлектором и праћено је термографско простирање топлоте у нехомогеној структури). Уколико је оплата ваздухоплова оштећена, одређене неправилности се могу видети у зидовима током грејања.

На основу термограма приказаних на слици 4 (Полић-Радовановић и Живанчевић-Поповић, 2010), није могуће прецизно показати оштећење у сложеној структури крила. Неопходно је вршити снимање тако што ће се обезбедити услови грејања и бележења под правим углом, са импулсним извором зрачења.





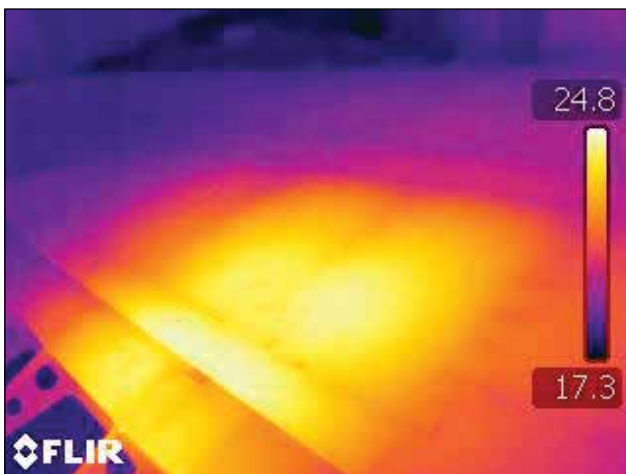
Слика 3. Изотермална зона са повећаном влагом и линија очитане вредности температуре (лево) и очитаних вредности (десно)

Испитивање изложбеног простора термографијом. У галерији Музеја ваздухопловства, изложени експонати су произведени од метала, у целисти или скоро у целисти.

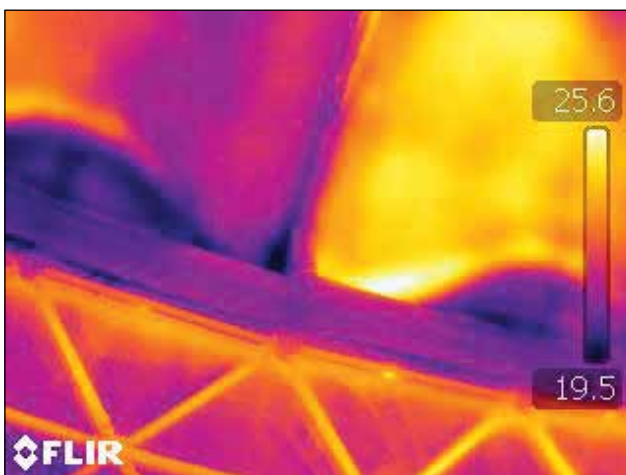
Будући да су у питању стални експонати, од великог је значаја да се испитају услови експоната, присуство влаге у конструкцији куполе као и да се покажу потенцијални услови за настајање росе или кондензације од влаге у ваздуху.

Забележени подаци на слици 5 показују велике температурне разлике на површини, што је последица сложене конструкције куполе, разлике у изолационим слојевима (лоша топлотна изолација и велики топлотни флуксеви), оријентације куполе на јужној или северној страни, итд.

Закључци о испитивању квалитета унутрашње средине и процени ризика оштећења експоната. Обављена студија и извршена мерења показала су



Слика 4. Термограф током грејања крила ваздухоплова F.50



Слика 5. Термографи и дигитално снимање куполе изнад изложбеног простора

значајну температурну неравномерност у унутрашњем простору и на унутрашњим површинама омотача зграде, као и велики број места са кондензацијом водене паре и слојевима воде на површинама зидова, па чак и непосредно присуство воде у самој зидној конструкцији, што је јасна потврда да је реконструкција или реновирање омотача неопходно, и то хитно. То је неопходно због потребе да се повећа енергетска ефикасност зграде уз смањење потрошње фосилних горива, а касније и замене потрошње фосилних горива ефикасним и економичним коришћењем чистих ОИЕ за КГХ системе, систем за осветљење и све остале техничке системе.

Други кључни закључак је да утврђено оштећење од корозије на металним експонатима захтева поновно пројектовање (ревизију пројекта) система КГХ. Квалитет унутрашњег ваздуха, пре свега његова температура и релативна влажност, морају да се прецизно регулишу у складу са њиховим дефинисаним оптималним вредностима за конзервацију одговарајуће врсте артефаката (ASHRAE, 2011). Поред вредности параметара влажног ваздуха и садржаја воде у ваздуху, који се не могу толерисати, неопходно је да квалитет ваздуха буде одређен и у вези са потенцијалним присуством загађивача.

Наиме, музеј се налази у непосредној близини београдског аеродрома, и загађивачи ваздуха од врло фреквентног ваздушног саобраћаја могу као последицу да имају високу концентрацију, нарочито гасова у спољашњем ваздуху који се користи за вентилацију. Конкретно, истраживање (ASHRAE, 2011) показује да гасовити спољашњи загађивачи могу лако да продру у све врсте објеката када не постоји хемијско филтрирање којим се ти загађивачи одстрањују. За студију енергетског реновирања музеја, а нарочито за планирање одговарајућих радова на енергетском реновирању/реконструкцији, значајно је напоменути да се током реновирања зграде ствара велика количина честица у ваздуху (који често садржи и споре гљивица и пару), и у зависности од система КГХ, концентрације загађивача у ваздуху могу да се значајно повећају изнад дозвољеног нивоа, те оштећења на експонатима могу да буду кумулативна и непоправљива.

Будући да је већ утврђена штета на неким артефактима, више је него неопходно да се елиминишу даљи ризици за стварање загађивача, водећи рачуна о главним факторима који утичу на настанак загађивача у ваздуху, а то су: оптерећење загађивача у спољашњем ваздуху са оближњег аеродрома, место на коме се налази улаз спољашњег ваздуха и врста отвора за довођење ваздуха у просторијама у којима се налази збирка, ефикасност филтера за честице и гасове и одржавање филтера, као и место и стање филтера у систему КГХ.

4. Прилаз холистичком темељном реновирању енергетских система музеја

Циљеви холистичког темељног енергетског реновирања. Пројекат реновирања музеја може да буде од врло важног међународног и светског значаја, будући да је овај музеј један од само десет музеја вадухопловства у свету. Он може да представља место за нове идеје о земаљском и екстратерестријалном претварању сунчеве енергије у електричну и бежичним путем пренете на Земљу. Не само да подсећа на генијалне инвенције Николе Тесле (Никола Тесла је такође назив оближњег београдског аеродрома), већ се на земљишту које га окружује могу излагати најсавременија открића из области авио-космо-технике.

Реновирање музеја мора се обавити уз коришћење најсавременијег знања и праксе о пројектовању зелених одрживих зграда, примењујући еколошке чисте технологије, енергетску ефикасност и обновљиве изворе енергије у што већој могућој мери. С обзиром на то да је музеј окружен прилично великом површином сопственог земљишта, и с обзиром на чињеницу да је потврђена расположивост неопходних количина подземне воде, њено коришћење као извора и понора топлоте путем топлотне пумпе може да представља добро решење за снабдевање обновљивом енергијом рада система за КГХ.

Поред тога, за погон топлотних пумпи користила би се електрична енергија добијена фотонапонским претварањем енергије сунчевог зрачења. Да би се постигао овај циљ, рад топлотне пумпе и снабдевање електричном енергијом помоћу фотонапонских ћелија морају да буду у потпуности усклађени у синергији са минимизирањем оптерећења система за КГХ.

Потребно је обавити опсежну интегралну конструкциону и енергетску анализу и наставити са развојем комплекса енергетски ефикасног објекта – развој пројекта конструкције уз одговарајуће топлотне и физичке особине које се односе на топлотне губитке и добитке, пропустљивост дневне светлости – регулацију дневног и електричног осветљења, енергетски ефикасан систем за КГХ и остале механичке и електричне системе који могу да обезбеде оптималне услове унутрашњег амбијента, стално током целе године, што је неопходно за заштиту уметничких и музејских експоната, као и људи, посетилаца и радног особља.

Потребно је пронаћи одговарајуће решење климатизационог система за изложбени простор зграде музеја. Микроклиматски услови, због осетљивих и вредних музејских експоната у том простору, представљају сложене пројектне задатке који се ретко срећу у пракси. То је разлог због кога је потребно знати како се користе знања и вештине савремених информационих технологија, како се прави виртуелни електронски модел и како се помоћу симулација испитују утицаји рада система за КГХ на температуре ваздуха, брзине ваздушне струје, поља влажности као и температуре и влажности на површинама унутрашњих зидова и влагу унутар самих зидова у изложбеном простору.

Конструкција омотача и квалитет унутрашње средине. Иако је постигнут велики напредак у технологији климатизације и грејања уз уштеду енергије у модерним зградама, већи део оштећења на збиркама уметничких дела у историјским зградама настаје услед неповољних климатских услова, и често услед ширења буђи. Знање о томе како се спречава ширење микроорганизама такође је потребно у фази планирања интервенција. Констатован је проблем развоја буђи (или плесни), између осталих оштећења на застакљеном и бетонском делу зграде музеја, и ова врста проблема може добити још већи значај због утицаја климатских промена, јер ће у разним деловима Европе временски услови бити све топлији и влажнији.

Утицаји који су у вези са енергијом – смањење емисије угљен-диоксида и других гасова стаклене баште, смањењем потреба за енергијом опреме и система КГХ, осветљењем и осталим техничким системима у зградама, регулацијом и модификацијом функционисања зграде и понашања корисника, морају да буду узети у обзир у еколошкој анализи животног циклуса. Међутим, врло утицајни фактори у оквиру процеса репројектовања ради интегралног реновирања зграде/техничких система јесу решења омотача/фасаде и избори опција за реновирање омотача зграде, застакљења и прозо-

ра, врсте термичке масе и изолационог материјала за конструкцију зграде, регулација вештачког осветљења и дневне осветљености, комбиноване вентилације, повратног коришћења отпадне топлоте и хладноће, као и регулација режима рада система за КГХ.

Анализирани су омотач зграде музеја и њена постојећа конструкција и дат је предлог репројектовања и енергетског унапређења, односно обнове и реконструкције. На слици 6 су приказани детаљи предложеног репројектовања конструкције у циљу реновирања омотача зграде: а) челични профили са три угла – структура сегмената стаклене конструкције (лево) и детаљи њеног попречног пресека (десно) који се састоји од: а) челичне конструкције направљене од кутија, б) алуминијумски профил–држач стакла, ц) термопакет: $2 \times 6 \text{ mm}$ стакло + 20 mm ваздух + $2 \times 8 \text{ mm}$ стакло, и д) алуминијумски покривни профил – капа.

На цртежу је приказан јединични елемент застакљења који се састоји од два памплекс стакла са дуплом фолијом, где спољашње стакло има димензије $2 \times 8 \text{ mm}$, а унутрашње стакло $2 \times 6 \text{ mm}$. Првобитно су врста и боја стакла изабрани према дозвољеним вредностима коефицијента пролаза топлоте, који су важили у то време $U = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Узимајући у обзир мерењем утврђена места на којима постоји оштећење заптивености стакла/профила, као улазна вредност за прорачуне и симулације топлотних карактеристика омотача коришћена је већа вредност коефицијента пролаза топлоте, $U = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

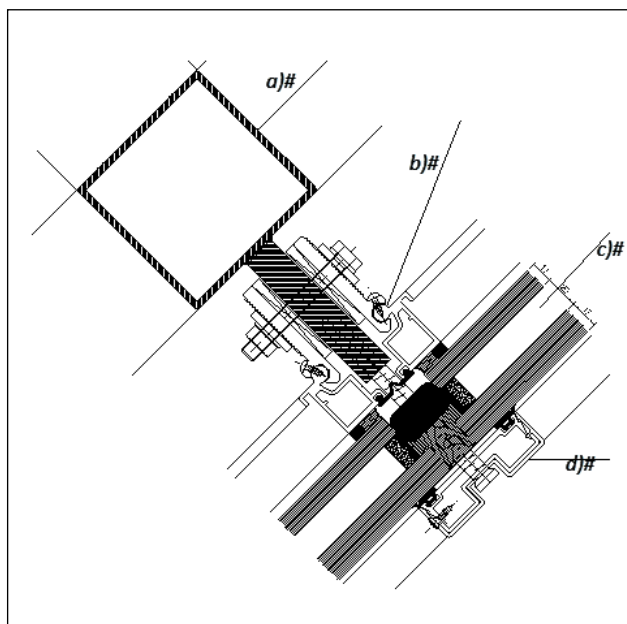
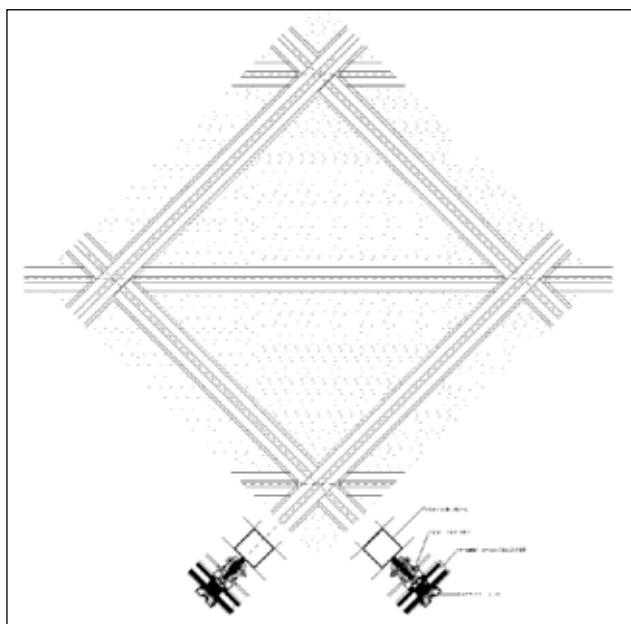
Као један од могућих сценарија за реновирање омотача, предвиђена је замена постојећег застакљења са оним које има знатно мању вредност коефицијента пролаза топлоте, односно једнако $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Поред тога, потребно је анализирати могућност коришћења стаклених јединица пуњених аргоном или криптоном. Услед линијских губитака, лајсна на стаклу такође има утицај на коефицијент пролаза топлоте и потребно је посветити пажњу на дистанцер између лајсне и стакла и његова топлотна својства, то јест минималне линијске губитке. На датим подацима може се видети да ни главна челична конструкција ни алуминијумски подупирачи стакла нису директно изложени спољашњој температури, због чега омотач има боље особине топлотне изо-

лације, а смањени су и ризици од корозије на металним деловима, нарочито оним челичним.

Ово су само грубе скице и потребно је обавити детаљнија испитивања стања конструкције, која морају да обухвате тренутно стање бетонске и челичне конструкције, дефинисање и испитивање и других потенцијалних модела – кандидата за оптимална пројектна решења реновирања. Важно је за сектор зграда уопште, а нарочито за историјске зграде, да постоји стална подршка за развој и стандардизацију процедура, технологија и техника, као и активности од значаја за побољшање поузданих процена преосталог животног века и процена еколошких и економских утицаја у оквиру енергетског реновирања зграда.

Научни докази јасно говоре да је потребно развити поуздане и исплативе мере као и саму технологију интегралног енергетског реновирања омотач-зграда-система великих размера, односно индустрију енергетског реновирања – реконструкције зграда. Посебно треба водити рачуна да краткорочни економски аспекти не умање значај анализа дугорочних утицаја на животну средину, тако што би се вршила одговарајућа процена преосталог животног циклуса (Residual Life Cycle Assessment – RLCA), односно метода за анализу и процену утицаја које на животну средину имају материјали, производи и услуге током преосталог и целог животног века зграде. Поред тога, за историјске зграде је потребно пажљиво размотрити њихове инхерентне потребе за конзервацијом и њихов инхерентни културни домен. Сложеност дефинисаних специфичности реновирања историјских зграда објашњава значај коришћења у поступку пројектовања реновирања најсавременијих знања и технологија, као што су динамичке симулације и косимулације енергетских особина зграде.

Холистички приступ поновном пројектовању (ревизији пројекта) историјских зграда захтева метод и меродавне показатеље и критеријуме како би се извршила процена укупних карактеристика као резултат интеракције између различитих техничких домена. Показатељи који се односе на енергију, као што су потрошња енергије или коришћење дневног светла, нису довољни за карактеризацију меродавних особина зграде која представља културну баштину. Историјске зграде имају



Слика 6. Детаљи челично-стаклених сегмената омотача са три угла (лево), и његов попречни пресек (десно)

исту потребу, као што је описано у „Towards Sustainability Index for Healthy Buildings – Via Intrinsic Thermodynamics, Green Accounting and Harmony“ (Kim and Todorovic, 2013).

Конзервација експоната (артефаката) као и удобност за посетиоце и кориснике зграде имају значај, те је потребан квалитет унутрашње средине који покрива више домена (топлотни комфор, осветљеност, квалитет ваздуха и акустика). Да би се омогућила симулација више домена, физички модел треба да садржи информације које захтева сваки домен посебно. Одрживо свеобухватно енергетско реновирање историјских зграда и зграда културне баштине оптимизацијом енергетске ефикасности и интеграцијом ОИЕ путем симулација карактеристика зграде и косимулације, је-сте област у којој је потребан већи степен међународне сарадње и координације симулација, те је од суштинског значаја да се убрза стицање знања и стварање нове индустрије – индустрије темељног енергетског реновирања широког опсега и развој одговарајућих технологија (Todorović, 2010, 2012).

5. Симулације енергетских особина зграде

С обзиром да је циљ реновирања музеја да се постигне статус зграде са нултом емисијом CO₂, потребно је да се анализом динамичког понашања спроведе мултифункционална оптимизација омотача/конструкције, а нарочито фасаде, и како би се конструкционим особинама зграде обезбедила могућност регулације топлотног понашања и контроле топлотног оптерећења, регулација коришћења дневног светла и коришћење ОИЕ, коришћење поузданих потенцијала топлотне пумпе која као извор топлоте користи подземну воду и производња електричне енергије помоћу фотонапонских ћелија.

Проучавана је примена симулације карактеристика зграде (СКЗ), која укључује усклађивање енергетских потреба и снабдевања са циљем да се помогне развој одрживог енергетског управљања заснован на енергетској ефикасности и коришћењу технологија које користе обновљиве изворе енергије. Задатак је био да се покаже да делотворно планирање снабдевања енергијом узимајући у обзир енергетске потребе, укључујући инте-

Табела 1. Карактеристике модела конструкције омотача зграде

Модел	Врста стакла	Дебљина [mm]	Коефицијент сунчаних добитака	Пропустљивост видљивог зрачења	U W/(m ² K)
M0	Двоструко стакло	2*6 + 2*8	0,803	0,809	3,5
M1	Двоструко стакло	2*6 + 2*8	0,475	0,809	1,4
M2	Двоструко стакло	2*6 + 2*8	0,411	0,809	1,1
M3	ФН двоструко стакло	2*6 + 2*8	0,357	0,344	1,1
M4	ФН двоструко стакло	2*6 + 2*8	0,251	0,212	1,1

Табела 2. Пројектно оптерећење за различите моделе зграде

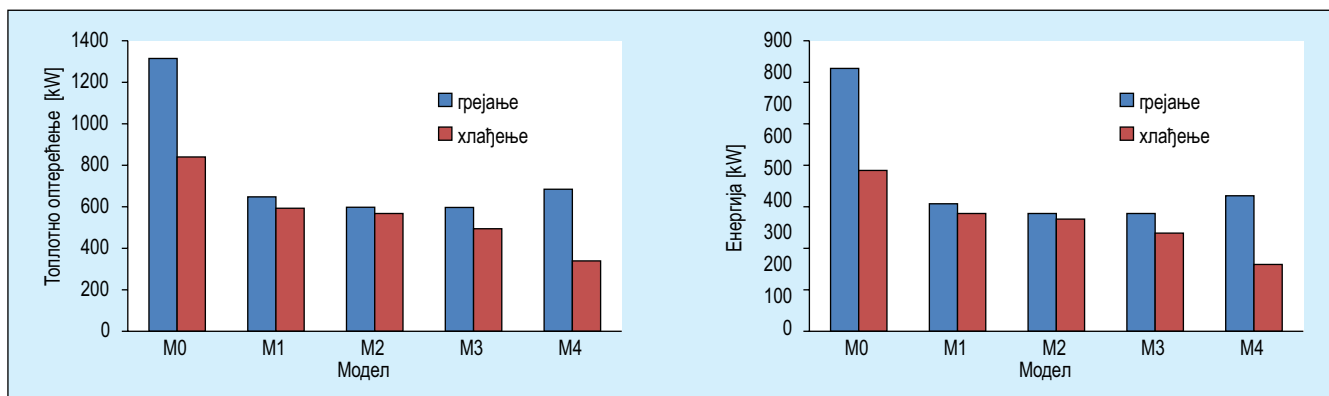
Пројектна грејна оптерећења [kW]					Пројектна расхладна оптерећења [kW]				
M0	M1	M2	M3	M4	M0	M1	M2	M3	M4
1315	648	598	597	658	840	593	568	494	339

грално планирање енергетски ефикасне зграде – планирање одрживе зграде уз комбиновање нових сегмената у конструкцији, креативних решења у којима се води рачуна о потрошњи енергије, нуди одличне могућности да се покаже поузданост одрживог темељног енергетског реновирања историјских зграда. Стратешки задаци студије превазилазе смањење емисије гасова стаклене баште и загађивача и сигурност снабдевања енергијом, крчећи пут ка даљем и крајњем циљу – да зграда музеја са темељно реновираним енергетским системима стекне статус зграде која производи више енергије него што троши, тј. статус одрживе „Енергије“ зграде.

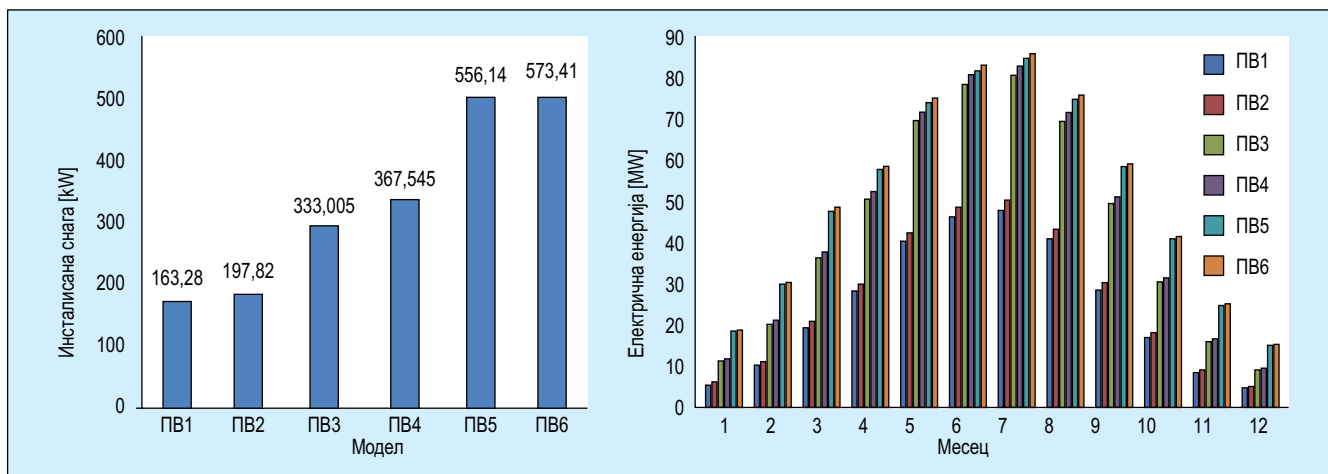
Модел конструкције омотача зграде музеја за динамичку симулацију особина. За Музеј ваздухопловства у Београду направљени су компјутерски модели (види табелу 1), и спроведене су енергетске анализе модела постојећег стања оригинално пројектованог објекта и четири модела омотача са примењеним мерама за побољшање енергетске ефикасности, за расположиве податке Типичне Метеоролошке Године (ТМГ) за мерну станицу Светске метеоролошке организације на аеродрому у Београду.

Резултати обављених прорачуна приказани су у табели 2 и на слици 7. С обзиром на расхладно и грејно оптерећење, потребе за енергијом имају значајно смањене вредности код модела са побољшаним омотачем зграде.

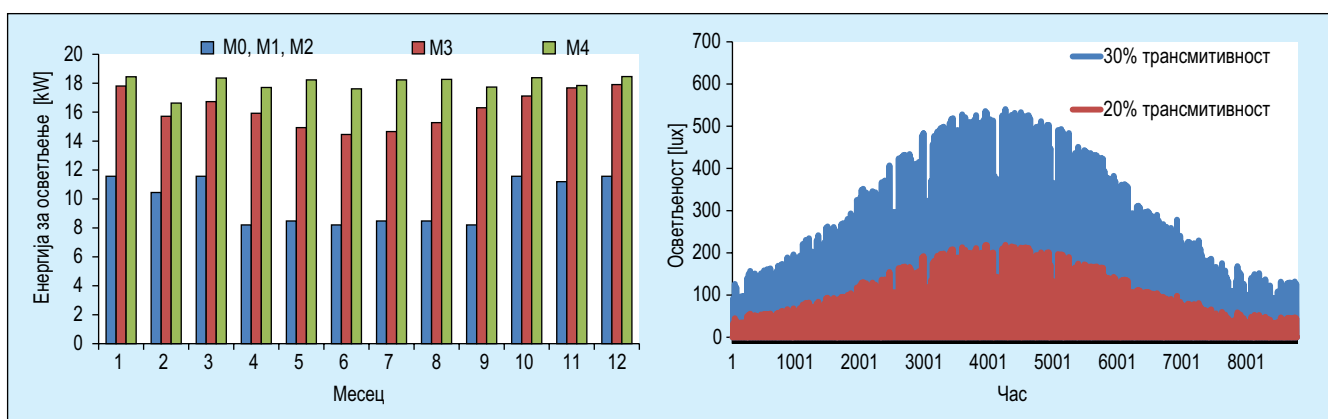
Јасно се види да је најбољи модел с обзиром на потребу грејања модел M3, а у погледу хлађења, модел M4. Поређење грејних и расхладних оптерећења постојећег стања омотача M0 и модела са различи-



Слика 7. Грејно и расхладно оптерећење различитих модела (лево) и годишња потреба за енергијом за грејање и хлађење различитих модела (десно)



Слика 8. Инсталисана фотонапонска снага за различите моделе са ФН (PV) ћелијама (лево) и месечни износи произведене електричне енергије за различите моделе са ФН (PV) ћелијама (десно)



Слика 9. Месечни износи потребне енергије за вештачко осветљење за различите моделе (лево) и промена осветљености измерена на северној страни за ФН стакла као функција пропустљивости видљиве светлости стакла

тим степеном побољшања омотача показују следеће: у поређењу са основним моделом М0, енергетско оптерећење за грејање је смањено: М1 – 50,7%, М2 – 59,8%, М3 – 59,6% и код М4 – 50%; и годишња потреба енергије за хлађење је смањена – М1 – 29,4%, М2 – 32,4%, М3 – 41,2% и М4 – 59,6%. Модели омотача зграда са побољшаним топлотним карактеристикама показују сличан однос смањења потреба за енергијом за грејање и хлађење (слика 7), као што је и однос смањења топлотних оптерећења грејања и хлађења.

Најбољи модел с обзиром на потребу за енергијом за хлађење има већу потребу за вештачким осветљењем, јер је смањење осветљености значајно, и стога одговарајуће вредности расположивих дневних осветљености унутрашњег простора треба упоредити са потребним вредностима одређеним стандардом за музеје.

На слици 8 (лево) дате су вредности инсталиране фотонапонске снаге – ФН и (десно) месечне суме ФН произведене електричне енергије за различите моделе зграда на којима су постављене фотонапонске ћелије: ПВ1 омотач – 30% пропустљивост; ПВ2 омотач – 20% пропустљивост; ПВ3 и ПВ4 омотач – 30% и 20% пропустљивост и кров са crystal-ораче; ПВ5 и ПВ6 пола омотача 30% и 20%, а друга половина омотача и кров имају нетранспарентне кристалне ФН панеле.

Месечне суме енергије потребне за вештачко осветљење код различитих модела дате су на слици 9 (лево). Резул-

Табела 3. Карактеристике типова модула са ФН ћелијама

Карактеристике ФН	Јединица	Нетранспарентно	20% транспарентно	30% транспарентно
Загарантована мин. енергија	[W]	360	120	100
Струја кратког споја	[A]	5,5	0,79	0,64
Напон отвореног кола (Voc)	[V]	89,4	238	238
Струја при P _{max} (Imp)	[A]	4,9	0,68	0,56
Напон при P _{max} (Vmp)	[V]	74,3	180	180

тати расположивости дневног светла када би се користила стакла са ФН ћелијама са две различите вредности пропустљивости светла (30% и 20%) и променом осветљености, измерене на северној страни за ФН стакло као функција пропустљивости видљивог светла стакла дати су на слици 9 (десно). Поређење инсталисане ФН снаге (слика 8 лево) и вредности потребне енергије за вештачко осветљење дате на слици 9 (лево), показују да само маргинални део електричне енергије која је произведена фотонапонским ћелијама може да задовољи потребу за енергијом за осветљење током целе године.

6. Закључци

Да би се приступило планирању енергетског унапређења Музеја ваздухопловства, обављена је експертска инспекција објекта и низ испитивања са циљем да се што прецизније утврди стање конструкције објекта, последице и узроци старења објекта, односно посебно детаљно сплет питања стања квалитета унутрашње средине, који је од кључног значаја за очување артефакта – експоната. Потребно је спречити развој микробиолошких организама, будући да је проблем развоја плесни тј. буђи утврђен међу осталим оштећењима на застакљеним и бетонским деловима конструкције зграде музеја, а посебно имајући у виду да се ови проблеми могу повећати у будућности услед утицаја климатских промена, јер се у југоисточном делу Европе очекују све топлији и влажнији временски услови.

Да би се приступило енергетској оптимизацији темељног енергетског реновирања Музеја ваздухопловства, дефинисана су различита решења/моделу примене мера за унапређење енергетске ефикасности и реновирања омотача зграде музеја, претпостављајући стриктну регулацију/контролу меродавних параметара унутрашње средине (температура и релативна влажност ваздуха, дневна осветљеност и упад сунчевог зрачења) системом за КГХ током целе године. Од технологија и опреме за коришћење ОИЕ предвиђене су топлотне пумпе које као топлотни извор и понор користе подземну воду, и ФН хелије за погон топлотних пумпи. Ова студија обухвата шест верзија зграде у којој се користи електрична енергија произведена ФН-ским хелијама, укључујући једну врсту – кристалних нетранспарентних другу врсту – делом транспарентних хелија (са пропустљивошћу светлости од 20% и 30%).

Дефинисани модели су испитани симулацијама динамике промена карактеристика подсистема зграде, рада топлотних пумпи и претварању енергије сунчевог зрачења у електричну енергију ФН хелијама, и ко-симулацијама спреге модела подсистема међусобно и у спрези са КФД¹ симулацијама у два домена (унутрашњи и спољашњи услови). Анализирана је динамика топлотног понашања, енергетска оптерећења грејања и хлађења, предвиђене енергетске потребе за грејање и хлађење, и енергија потребна за осветљење. Симулација карактеристика зграде обухвата референтни – пројектовани омотач зграде музеја и конструкцију зграде и четири побољшане верзије, и показано је да је могуће постићи значајно смањење енергетских оптерећења и енергетских потреба.

Поређењем топлотних оптерећења модела М3 и одговарајуће електричне енергије неопходне за рад топлотне пумпе која користи топлоту подземне воде од 125 kW са ФН моделом и за чији погон је довољна и најмања инсталисана ФН снага од 163,3 kW, очигледно је да постоји потенцијалан вишак инсталисане ФН снаге.

Приказани резултати студије потврђују да је укупна количина електричне енергије потребна за рад топлотне пумпе у режиму грејања и режиму хлађења, као и потреба за енергијом целог система за КГХ и осветљење мања од потенцијалне ФН инсталисане електричне снаге и произведене енергије.

На крају, ова студија показује да постоји велика вероватноћа да се достигне изузетно тежак циљ. Темељно енергетско унапређење/реновирање зграде музеја уз коришћење ОИЕ може водити томе да зграда музеја постигне статус „Нула емисије“ CO₂, при чему би се на исплатив начин ова историјска зграда претвори-

ла у одрживу зграду која производи више енергије него што је троши.

Кључни задатак у будућности биће да се осмисли и оствари развој пројекта темељног енергетског реновирања зграде музеја и да се пројектује минимизирање енергетских потреба за одговарајуће системе КГХ и остале техничке системе, уз максималну ефикасност у коришћењу ОИЕ, а све у циљу постизања највишег квалитета интегрално одрживе зграде, система КГХ, свих осталих техничких система и система снабдевања ОИЕ, поуздано достижући статус одрживе „зелене зграде – зграде енергије плус“.

Израз захвалности

Аутори изражавају захвалност госпођи Оливери Качаревић, мастер-дипломираном инжењеру архитектуру, из Пројметала. доо, Београд, за експертску анализу конструкције омотача зграде музеја.

Литература

- [1] *** ASHRAE. 2011. Handbook – HVAC Applications (SI), Chapter 21: museums, galleries, archives, and libraries.
- [2] Hancock, C., S. Hinchliff, J. Hohmann, *Daylighting Museum Guide*, Integrated Design Lab, Bozeman Montana State University, 2009.
- [3] Kim, J. T., M. S. Todorović, *Towards Sustainability Index For Healthy Buildings – Via Intrinsic Thermodynamics, Green Accounting And Harmony*, Energy And Buildings, 62, 627-637, 2013.
- [4] *** *New Energy For Old Buildings – Promoting The Integration of RES & RUE Measures In Historic Buildings*, NEW4OLD, 2007–2008.
- [5] Polić-Radovanović, S., M. Živančević-Popović, *Report On The Conducted Investigations In Aviation Museum In Belgrade*, Serbian Ministry of Culture and Central Institute for Conservation, 2010.
- [6] *** Proceedings of the Workshop on Historic Preservation and Energy Efficiency in Federal Buildings, December 6–7, 2006, Decatur House Museum Washington, DC Sponsored by FEMP – Federal Energy Management Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy.
- [7] Sacchi, E., C. Muller, *Air Quality Monitoring At Historic Sites – Redefining an Environmental Classification System for Gaseous Pollution*, August 2005 Issue of ASHRAE Journal, 2005.
- [8] Todorović, S. M., *Sustainability Research and Education via Interdisciplinarity and Harmony. Proceedings of the International Conference on Advances in Infrastructure for Electronic Business*, Science, and Education on Internet – Scuola Superiore G. Reiss Romoli, L'Aquila, F 3–6, 1–10, 2010.
- [9] Todorović, S. M., *National Energy Efficiency Action Plan Of Buildings In Serbia – An Approach To The Large Scale Municipal Energy Refurbishment*, REHVA Journal, Vol. 47, Issues 6, 22–26, 2010.
- [10] Todorović, S. M., *Large Scale Residential/Municipal Res Integrated Refurbishment Construction And HVAC Systems Engineering R&D Needs*, Transactions ASHRAE, Volume 118, Part 1, 2012.
- [11] Todorović, S. M., *In Search Of A Holistic, Sustainable And Replicable Model For Complete Energy Refurbishment In Historic Buildings*, Conservation Science in Cultural Heritage – Historical Technical Journal, 6, 28–53, 2012.
- [12] Troi, A., R. Lollini, *Interdisciplinary research: FP7 project „3ENCULT – Efficient Energy for EU Cultural Heritage*, Dubrovnik, Croatia, UNDP, 2011.

¹ КФД – Компјутерска флуидна динамика.