

Zagotavljanje zdravega bivalnega okolja z informacijskim modeliranjem stavb – BIM: metodološki pristop

ASSURING A HEALTHY LIVING ENVIRONMENT WITH BUILDING INFORMATION MODELING – BIM: A METHODOLOGICAL APPROACH

Anja JUTRAŽ¹, Katja MALOVRH REBEC^{2,3}, Laurens OOSTWEGEL³, Michael MARISSA³, Andreja KUKEC^{1,4}

¹ Nacionalni inštitut za javno zdravje, Center za zdravstveno ekologijo, Trubarjeva 2, SI-1000 Ljubljana

² Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, SI-1000 Ljubljana

³ Innorenew CoE, Univerza na Primorskem, Livade 6, SI-6310 Izola

⁴ Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Katedra za javno zdravje, Zaloška 4, SI-1000 Ljubljana

Kaj je znanega?

Znano je, da se informacijsko modeliranje stavb (angl. Building Information Modelling, BIM) uporablja za projektiranje stavb. Po našem vedenju je malo raziskav na področju uporabe BIM-a kot orodja za spremljanje okoljskih parametrov.

Kaj je novega?

BIM smo uporabili kot orodje za spremljanje okoljskih parametrov (dnevna svetloba, delci različnih velikosti v notranjem zraku, zračna vlaga, temperatura zraka) v stavbi z namenom prikaza nove metodologije in načina uporabe digitalnega orodja za zagotavljanje zdravega bivalnega in delovnega okolja. Okoljske parametre je potrebno spremljati skozi celoten življenjski cikel stavbe. BIM orodje vključuje sodelovanje strokovnjakov s področja inženirskih strok ter strokovnjake s področja arhitekture in gradbeništva. Obravnavano področje pa naslavlja tudi strokovnjake s področja javnega zdravja.

Navajajte kot:

Jutraž A. et al. Zagotavljanje zdravega bivalnega okolja z informacijskim modeliranjem stavb – BIM metodološki pristop. Javno zdravje 2022; 7: 1–11.

Prispelo:
12. 5. 2021

Sprejeto:
18. 5. 2021

Korespondenca:

anja.jutraz@nijz.si

Izvleček

UVOD: Informacijsko modeliranje stavb (angl. Building Information Modelling, BIM) predstavlja orodje za zagotavljanje zdravega življenjskega okolja. Obenem je BIM učinkovito orodje za izmenjavo interdisciplinarnih podatkov med različnimi deležniki, ki sodelujejo v celotnem življenjskem ciklu stavbe. S pomočjo uporabe senzorjev lahko spremljamo okoljske parametre, kot so: kakovost notranjega zraka, svetlobno, zvočno in toplotno udobje, energetska učinkovitost stavbe, in sicer tako pri načrtovanju nove kot pri prenovi stare stavbe. Namen raziskave je bil prikazati novo metodologijo in oceniti, ali lahko s pomočjo uporabe BIM orodja prispevamo k zagotavljanju dobrega počutja ljudi v stavbah.

METODE: Predmet naše raziskave je več kot 100 let stara hiša, Mrakova domačija na Bledu, zaščitena kot objekt kulturne dediščine lokalnega pomena. V objektu smo s senzori izvajali meritve izbranih okoljskih parametrov (temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, dnevna svetloba, različne velikosti delcev (PM)). Za prikaz pristopa smo uporabili podatke dveh sklopov senzorjev (dve lokaciji v stavbi). Prav tako smo razvili metodološki model za merjenje radona in spremljanje plesni v zaprtih prostorih. Raziskava je bila razdeljena na tri sklope: uporaba BIM pred, med in po prenovi stavbe, izvedena pa je bila v letih od 2017 do 2021.

REZULTATI: Kakovost prenove objekta, ki je zavarovan kot kulturna dediščina, bi bistveno izboljšali, če bi v proces prenove poleg načrtovalcev/projektantov (arhitekti, gradbeniki, strojniki idr.), investitorjev in bodočih uporabnikov prostora vključili tudi strokovnjake s področja javnega zdravja. Neposreden pregled okoljskih parametrov, kot so temperatura zraka, zračna vlaga, delci različnih velikosti, radon, svetloba, plesen v 3D modelu v BIM-u bi lahko predstavljal podlago odločevalcem in vsem, ki sodelujejo v procesu prenove.

ZAKLJUČEK: BIM orodje predstavlja dobro prijemališče za izboljšanje zdravja in dobrega počutja bodočih uporabnikov novih stavb.

Ključne besede: notranje okolje, zdravje, BIM, življenjski cikel stavbe, prenova

Abstract

INTRODUCTION: Building Information Modelling (BIM) is a tool for ensuring a healthy living environment. At the same time, BIM is an effective tool for the exchange of interdisciplinary data between different stakeholders involved in the entire life cycle of a building. With sensors you can monitor some environmental parameters (e.g.

indoor air quality, light comfort, sound comfort, thermal comfort, and energy efficiency) when designing new building or renovating an old one. The purpose of the research was to show a new methodology and to find out whether we can contribute to ensuring the well-being of people in buildings by using BIM.

METHODS: The subject of our research is a more than 100-year-old house, “Mrakova domačija” in Bled, protected as a cultural heritage site of local significance. We monitored different environmental parameters in the building with sensors: temperature, relative humidity, light and various particle sizes (PM). Data from two sets of sensors (two locations in the building) were used to demonstrate the approach. We also developed a methodological model for measuring radon and mould. The research was divided into three parts: the use of BIM before, during and after the renovation of the building. The research was conducted in the years from 2017 to 2021.

RESULTS: The quality of the renovation of a building that is protected as a cultural heritage would be significantly raised if, in the process of renovation, in addition to planners / designers (architects, structural engineers, MEPs, etc.), investors and future users would also include public health experts. Presentation of environmental parameters such as temperature, humidity, particles, radon, light, mould in a 3D model in BIM, could help planners, decision-makers and everyone else who is involved in the renovation process.

CONCLUSION: The BIM tool provides a basis for improving the health and well-being of future users of new buildings.

Key words: indoor environment, human health effects, BIM, building life cycle, renovation

I UVOD

Zdravo bivalno in delovno okolje prispevata k večjemu udobju in boljšemu počutju uporabnikov^{1,2}.

I.1 BIM kot orodje za zagotavljanje zdravega življenjskega okolja

Informacijsko modeliranje stavb (angl. Building Information Modelling, BIM) je učinkovito orodje za izmenjavo interdisciplinarnih podatkov med različnimi deležniki, ki sodelujejo v celotnem življenjskem ciklu stavbe (faze načrtovanja, gradnje in vzdrževanja). V fazi načrtovanja se podatki s področja arhitekture, strojnih in elektro inštalacij v BIM shranjujejo na organiziran način, tako da se tvori enoten skladen model. Vsa neskladja se tako razrešijo že pred fazo gradnje. Med samo gradnjo se BIM nadgradi s podatki o tem, kdaj bodo izvedena različna dela in koliko bo stala posamezna faza gradnje. To omogoča zmanjšanje stroškov in veliko boljše načrtovanje za investitorja in gradbena podjetja³. Ko je stavba v uporabi, se lahko BIM uporablja za upravljanje objektov (faza vzdrževanja), npr. za vključitev podatkov senzorjev za napovedovanje porabe energije in vode s ciljem optimiziranja vseh vidikov delovanja stavbe.

BIM se običajno uporablja za izdelavo statičnega modela: stavba je zasnovana in načrtovana z BIM, nato pa zgrajena. Za nadzor podatkov v zgrajenem okolju pa je potrebno ustvariti dinamični model fizičnega objekta. Tak, dinamično posodobljen, model stavbe v BIM je njegov digitalni dvojček, objekt, ki se nenehno spreminja na podlagi novih in preteklih podatkov. Parametri se posodablja v realnem času in prilagajajo razmeram v zunanjem okolju⁴.

Prav tako se 3D modeli in orodje BIM uporabljajo za načrtovanje stavb, redko pa tudi za spremljanje okoljskih parametrov ter za aktivno sodelovanje med različnimi deležniki (strokovnjaki s področja javnega zdravja večinoma niso vključeni v ta proces). Na podlagi prejšnjih raziskav^{5–9} BIM orodje sicer že ponuja vtičnike za analizo določenih okoljskih parametrov: npr. kakovost notranjega zraka, toplotno udobje, energetska učinkovitost, zračna vlaga, zvočno, svetlobno in vizualno udobje itd.

I.2 Spremljanje okoljskih parametrov s pomočjo uporabe senzorjev

Znanih je več parametrov, ki jih je potrebno nenehno spremljati in vključiti v digitalizirane predstavitve stavbe kot podlaga za odločevalce pri načrtovanju in sprejemanju učinkovitih ukrepov. Pri pregledu raziskav smo ugotovili, da so bile že narejene različne raziskave v zvezi z vključevanjem posebnih podatkov v BIM okolje^{5,7–10}, in sicer: kakovost notranjega zraka (koncentracije onesnaževal, prenos toplote, pretok zraka, prezračevanje), toplotno udobje (ogrevanje, hlajenje), zračna vlaga, energetska učinkovitost, zvočno, svetlobno in vizualno udobje. Na podlagi predhodnih raziskav smo opredelili okoljske parametre, ki jih je potrebno upoštevati pri načrtovanju nove ali pri prenovi stare stavbe in so prikazani na Sliki

1^{11,12}.

Slika 1: Okoljski parametri, ki bi jih potencialno lahko vključili v Informacijsko modeliranje stavb (BIM).

I.3 Življenjski cikel stavbe in vplivi na zdravje

Zdravje in dobro počutje sta zelo pomembna pri načrtovanju stavbe. Sindemija covid-19 je vplivala na nov, še bolj poglobljen odnos do zdravih stavb, saj je že iz predhodnih raziskav dokazana povezanost med kakovostjo notranjega zraka in učinki na zdravje ljudi^{13–15}.

Obnova stavbe je običajno bolj zahtevna, zamudna in dražja, še posebej če gre za stavbo, ki je zaščiten kot kulturna dediščina in so posegi vanjo omejeni in nadzorovani. Pri stavbah kulturne dediščine bi morali posebno pozornost nameniti upravljanju z zdravjem povezanih podatkov, tako da se le-ti vključijo v BIM model oziroma informacijski model spomeniško zaščitenih gradenj (angl. Heritage Building Information Modelling, HBIM), kot imenujemo podatkovni model posebej prilagojen zaščitenim stavbam. Trenutno je večina stavbnega fonda, ki je zaščiten kot kulturna dediščina, brez ustrezne dokumentacije trenutnega stanja in bi ga morali digitalizirati (izdelati 3D modele stavb oziroma njihove digitalne dvojčke). Tako bi z omenjenimi objekti lahko bolje upravljali v smislu prostora, energije, materialov, uporabe itd. HBIM model vključuje posebne informacije, in sicer zgodovinske, pravne, tehnične, družbene in administrativne.

Predhodne raziskave so že pokazale, da lahko v BIM vključimo tudi npr. barvno označevanje elementov, povezanih s stopnjo obrabe, pri čemer imamo v modelih označene prednostne naloge popravil. Na ta način lahko omogočimo oceno tehničnega stanja stavbe in pridobimo splošno predstav o obsegu potrebnih popravil in gradbenih ukrepov, ki prispevajo k izboljšanju kakovosti obratovanja stavbe¹⁶.

Namen naše raziskave je bil prikazati novo metodologijo in oceniti, ali lahko s pomočjo uporabe BIM orodja prispevamo k zagotavljanju dobrega počutja ljudi v stavbah. Testirano BIM orodje predstavlja vozlišče, ki omogoča spremljanje različnih podatkov v vseh fazah prenove stavbe (pred/med/po prenovi) in lahko uporabnike obvesti o različnih nevarnostih za zdravje (Slika 2).



Slika 2: Življenjski cikel stavbe.

2 METODE

2.1 Območje in obdobje opazovanja

Predmet raziskave je bila več kot 100 let stara hiša, Mrakova domačija na Bledu, ki je kulturno in varstveno zaščiten ter čaka na prenovo. Raziskava je bila izvedena v letih od 2017 do 2021.

2.2 Opazovani okoljski parametri

Opazovani okoljski parametri so bili: radon, delci z aerodinamskim premerom pod 2,5 μm (PM_{2,5}), prisotnost plesni, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka in dnevna svetloba. V Mrakovi domačiji smo na dve različni lokaciji namestili senzorje za merjenje izbranih okoljskih parametrov, in sicer na višini 1,50 m od tal, cca. 1 m stran od stene. Podatki s teh senzorjev so se s frekvenco 30 sekund pošiljali v zbirko podatkov, shranjeno v oblaku Azure. API (angl. Application Programming Interface – programski vmesnik za aplikacijo) REST (angl. REpresentational State Transfer – prenos reprezentativnega stanja) je ustvarjen za komunikacijo med oblakom in zunanji programi (npr. Autodesk Revit). V tej programski opremi je zasnovan vtičnik, ki uporablja API in lahko uvaža podatke senzorjev skoraj v realnem času. Model BIM je razširjen s posebnimi elementi, ki po meri

razvitemu programskemu vtičniku omogočajo, da pridobi podatke iz baze podatkov in jih vizualizira v programski opremi BIM.

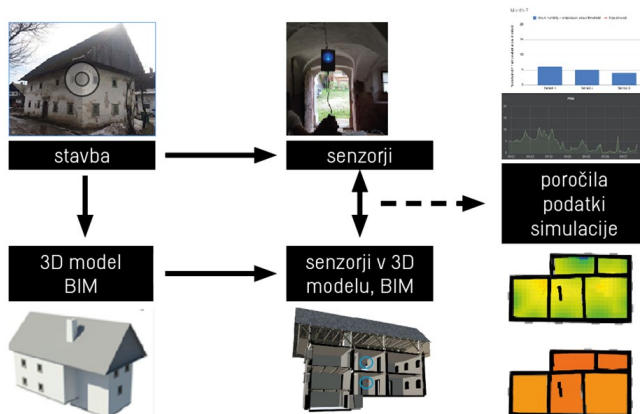
2.3 Razvoj metodološkega pristopa z uporabo BIM

Za prikaz metodološkega pristopa smo uporabili podatke dveh sklopov senzorjev (dve lokaciji v stavbi). Poleg tega smo pripravili tudi primere simulacij, kot pomoč pri razlagi novega metodološkega pristopa z uporabo BIM modela, pri čemer smo uporabili simulirane podatke. Raziskava je bila razdeljena na tri sklope:

- (1) uporaba BIM pred prenovno stavbe,
- (2) uporaba BIM med prenovno stavbe,
- (3) uporaba BIM po prenovi stavbe.

Slika 3 prikazuje metodološki pristop uporabe BIM:

- izris modela stavbe v BIM okolju;
- namestitev fizičnih in virtualnih senzorjev (v Mrakovi domačiji ter v 3D modelu Mrakove domačije);
- zbiranje podatkov okoljskih parametrov s pomočjo senzorjev v BIM – nadgradnja v digitalni dvojček;
- priprava analiz trenutnega stanja v objektu na podlagi pridobljenih podatkov;
- priprava simulacij izbranih okoljskih parametrov pred prenovno (namen se je izogniti nepredvidenim stroškom med prenovno);
- s pomočjo simulacij pregled različnih scenarijev s pomočjo BIM (npr. vpliv menjave oken na kakovost notranjega zraka).



Slika 3: Povezava med stavbo kulturne dediščine in njegovim digitalnim dvojčkom ter uporaba senzorjev za pripravo analiz in simulacij različnih okoljskih parametrov.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Predhodne raziskave so pokazale, da lahko z rednim spremljanjem in obnavljanjem kulturne dediščine preprečimo drage in obsežnejše prenove¹⁷. Izviren prispevek naše raziskave k znanosti pa je prikaz izbranih primerov, ki kažejo na pomembnost merjenja različnih okoljskih parametrov skozi celoten življenjski cikel stavbe (pred, med in po prenovi). Pri tem je pomembno, da so v prenovno objekta kulturne dediščine poleg načrtovalcev/projektantov (arhitekti, gradbeniki, strojniki idr.) vključeni tudi strokovnjaki s področja javnega zdravja ter investitorji z bodočimi uporabniki stavbe. Neposreden pregled okoljskih parametrov (npr. temperatura zraka, zračna vlaga, PM_{2.5}, radon, dnevna svetloba, plesen) v 3D modelu v BIM-u bi lahko pomagal odločevalcem in vsem, ki sodelujejo v procesu prenove, pri načrtovanju in prenovi stavbe. Digitalizacija grajenega okolja, tudi kulturne dediščine, dodaja vrednost k uporabi senzorjev in povezavi le-teh v večje sisteme za spremljanje in upravljanje stavbe.

V naši raziskavi smo se osredotočili na parametre kakovosti notranjega zraka in raziskali možnosti merjenja različnih parametrov pred, med in po prenovi stavbe. Spremljanje različnih okoljskih parametrov, povezanih s kakovostjo notranjega zraka in transparentnostjo podatkov v okolju, v katerem preživimo večino svojega časa, je pomembno zlasti v delovnem in bivalnem okolju. Tak primer je možnost preučevanja, napovedovanja in izvajanja rešitev za odpravljanje težav s prekomerno zračno vlago v stavbah in s tem povezanih zdravstvenih problemov uporabnikov. Študija Hagehed-Engman et.al.¹⁸ je obravnavala skoraj 9000 bivalnih okolij, kjer je bila zračna vlaga merjena v enodružinskih hišah, starejših hišah, hišah z ravno streho, zgrajenih v šestdesetih in sedemdesetih letih ter hiša z betonsko ploščo na tleh, ki so bile zgrajene pred letom 1983. Študija je pokazala, da je prisotnost plesni v stavbi močno povezana z alergijskimi simptomi pri otrocih. Prav tako študije kažejo, da je vonj po plesni v stavbi pogosto povezan s prisotnostjo prekomerne vlažnosti ali plesni v gradbeni konstrukciji. Študije poročajo, da je bilo v zaprtih prostorih z nezadostnim prezračevanjem v kombinaciji z vonjem po plesni opredeljenih večje število negativnih zdravstvenih posledic. Ugotovitve raziskav avtorjev D'Amico et. al. in Szabados et. al.^{19,20} so pokazale, da ima kakovost notranjega zraka pomembno vlogo pri zagotavljanju zdravega bivalnega in delovnega okolja.

Drug pomemben vidik zdravja in dobrega počutja, povezan s stavbami, je problem radona. Raziskava Sabbarese et. al.²¹ je pokazala, da sestava tal pod stavbo in gradbeni materiali vplivajo na koncentracije radona v zaprtih prostorih. Pokazali so tudi, da ima

položaj spodnjega nadstropja stanovanj pomembno vlogo pri določanju koncentracije radona, ki prehaja v stavbo.

Pri oceni kakovosti notranjega zraka obstajajo razlike med starimi in novimi stavbami²²:

- Pri novih stavbah je potrebno v modele BIM za oceno kakovosti zraka v zaprtih prostorih vključiti naslednje okoljske parametre: temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, ogljikov dioksid (CO₂), ogljikov monoksid (CO), dušikov dioksid, ozon, delci različnih velikosti (PM), radon, hitrost izmenjave zraka, prah, aldehidi: formaldehid, acetaldehid, akrolein, propionaldehid, benzaldehid, heksanal, glutaraldehid, VOC: benzen, toluen, ksileni, etilbenzen, n-heksan, trikloroetilen, tetrakloretilen, etil-pinenelen-2-etanelen 2-etilheksanol, stiren, naftalen.
- Pri prenovi stavb je potrebno v BIM modele za oceno kakovosti notranjega zraka v zaprtih prostorih vključiti naslednje okoljske parametre: temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, temperatura površine, relativna vlažnost površine, plesen, CO₂, CO, radon in PM.

3.1 Pred prenovo

Pred prenovo objekta je potrebno opraviti različne analize stanja, ki so osnova za načrtovanje/projektiranje in pripravo konzervatorskega načrta. Slika 4 prikazuje, kateri ukrepi so nujno potrebni pred prenovo objekta, pri tem pa so razdeljeni med posamezne deležnike. Strokovnjak javnega zdravja na prvem ogledu stavbe poda oceno in ovrednoti objekt na podlagi opazovanja (npr. vidna plesen na stropu) ter pomaga projektantom pri pripravi analize objekta in pripravi ukrepov, ki so potrebni pred prenovo objekta. V naslednji fazi oceni lokacijo namestitve senzorjev za merjenje različnih okoljskih parametrov ter določi, katere parametre je potrebno spremljati. Pridobljene podatke nato analizira in pripravi strokovne podlage za prenovu, na podlagi katerih nato projektanti pripravijo načrte prenove. Meritve se nato nadaljujejo tekom prenove, strokovnjaki javnega zdravja jih spremljajo in ob spremembah podajo nove strokovne podlage za prenovu.



Slika 4: Sodelovanje različnih deležnikov: ukrepi potrebni pred prenovo stavbe (levo), senzorji ter rezultati meritev radona (desno)

Pred prenovu je smiselno meriti raven koncentracije radona z namenom ustreznega ukrepanja v primeru, da bi meritve pokazale povišane začetne koncentracije. Med prenovu in po njej nam meritve senzorjev lahko pomagajo ugotoviti, kako izboljšana zrakotesnost oken in drugih delov stavbe vpliva na koncentracije radona in

posledično na zdravje uporabnikov stavbe. V primeru povišanih koncentracij, kar je lahko dokaj nepredvidljivo, lahko po prenovu dodatno ukrepamo na način, da koncentracije radona ustrezno znižamo in s tem varujemo uporabnike prostorov.

Za ponazoritev uporabe senzorjev in digitalnih dvojčkov pred prenovo stavbe kulturne dediščine prikazujemo primer merjenja radona v stavbi kulturne dediščine (hipotetični primer), ki se nahaja na območju prisotnosti radona v naravnem okolju (Tabela 1).

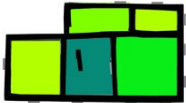
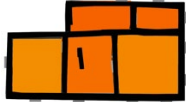



PRED PRENOVO	UKREP (predstavljen v BIM-u)	AEC strokovnjaki (angl. Architects, Engineers, Construction managers – arhitekti, gradbeniki, strojniki)	Strokovnjaki javnega zdravja
1	Nizka raven koncentracije radona. 		Podajo strokovno mnenje glede rezultatov meritev: »Ker ima stavba pred prenovo razpoke in nima ustrezne izolacije, vrednosti senzorjev kažejo nizke koncentracije radona.«
2	Predlog ukrepa prenove.	Namestitev novih oken v BIM modelu (bolj izolativna in zrakotesna).	
3	Previsoka raven koncentracije radona. 		Glede na koncentracije radona je potreben dodaten ukrep prenove.
4	Predlog dodatnega ukrepa prenove.	Arhitekturni ukrep 1: predlog dodanega mehanskega prezračevanja v stavbi.	
5	Koncentracije radona so še vedno previsoke. 		Glede na koncentracije radona je potreben dodaten ukrep prenove.
6	Predlog dodatnega ukrepa prenove.	Arhitekturni ukrep 2: predlog dodanega mehanskega prezračevanja pod hišo (le pod kritičnimi prostori).	
7	Meritve radona: ustrezne koncentracije radona. 		Koncentracija radona je ustrezna, potreben ni noben dodatni ukrep.
Legenda (koncentracije radona)			

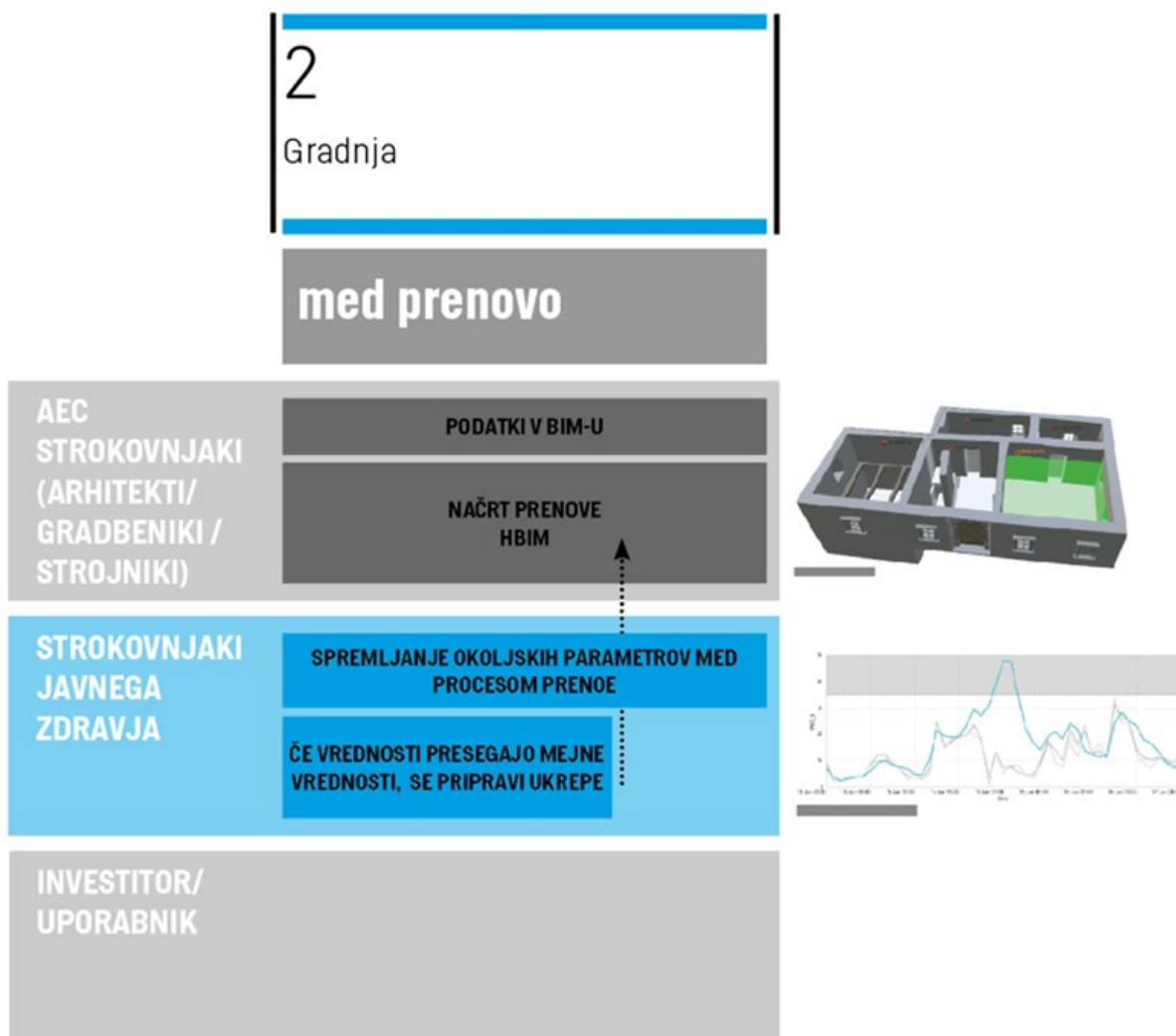
Tabela 1: Primer sodelovanja različnih deležnikov pri pripravi predloga obvladovanja in zmanjšanja koncentracij radona v stavbi kulturne dediščine pred prenoavo stavbe.

BIM je uporaben za napovedovanje različnih scenarijev, do katerih lahko pride med prenavo. Scenarije je možno z aktivnim sodelovanjem različnih deležnikov (načrtovalci in strokovnjaki s področja javnega zdravja) predvideti že pred prenavo in se tako izogniti daljšemu času prenave in večjim stroškom.

3.2 Med prenavo

Mrakova domačija bo po prenavi postala muzej. Kljub temu, da se obiskovalci v muzeju ne bodo zadržali veliko časa, moramo zagotoviti zdravo delovno okolje za vse zaposlene ter zdravo okolje za vse obiskovalce

(brez neprijetnih vonjav, prahu, prepiha, hrupa, toplotnega neugodja idr.). Poleg tega moramo zagotoviti, da okolje ne bo nevarno za delavce med samo prenavo. Pri tem morajo imeti gradbeni delavci ustrezno delovno opremo, hkrati pa je potrebno skrbeti za urejenost gradbišča. V ta namen so potrebne meritve okoljskih parametrov med samo prenavo. Med prenavo stavbe (Slika 5) strokovnjaki s področja javnega zdravja spremljajo okoljske parametre (rezultate meritev) in če vrednosti presegajo mejne vrednosti, v sodelovanju s pristojnimi strokovnjaki pripravijo dodatne predloge ukrepov.



Slika 5: Sodelovanje različnih deležnikov med prenavo stavbe, prikaz primera.

Težave med prenavo v zaprtih prostorih se lahko pojavijo zaradi neustrezne zračne vlage, uporabe materialov, ki vsebujejo kemikalije idr. Delci so pomemben pokazatelj kakovosti notranjega zraka, ki ga je smiselno meriti skozi celoten proces prenave²³. Kot primer prikazujemo merjenje delcev PM_{2.5} med prenavo

izbrane stavbe, Mrakove domačije na Bledu (Tabela 2). S pomočjo spremljanja ravni PM_{2.5} med prenavo stavbe in opozarjanjem o previsokih vrednostih s pomočjo digitalnih dvojčkov v BIM, lahko pravočasno ukrepamo in tako zagotovimo zdravo delovno okolje za delavce, ki prenavljajo stavbo.


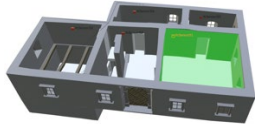
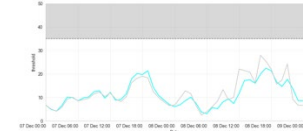
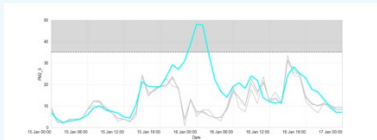
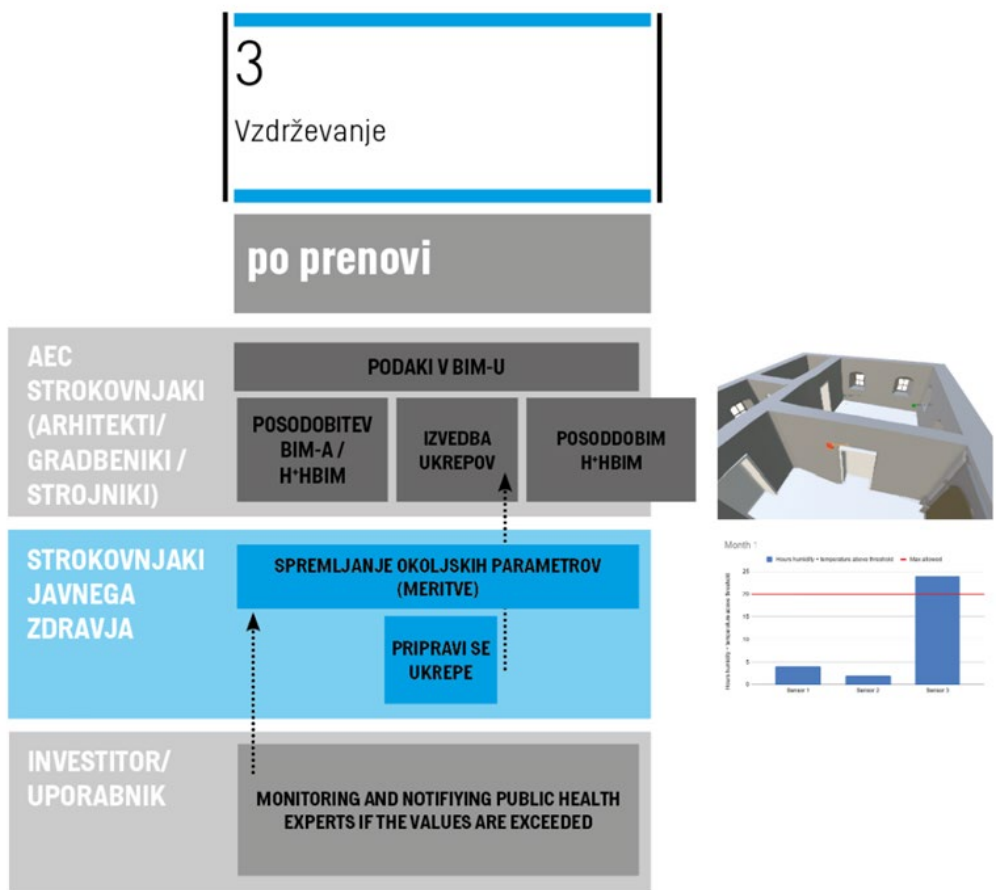
	Ukrep	AEC strokovnjaki (arhitekti, gradbeniki, strojniki)	Strokovnjaki javnega zdravja
1 Pred prenavo	<p>Namestitev senzorja v realni stavbi</p>  <p>in digitalnem dvojčku (v BIM modelu)</p> 		Določitev lokacije senzorja.
2 Pred prenavo	<p>Meritve koncentracij PM_{2,5} (dva senzorja).</p> 		Vrednosti koncentracij PM _{2,5} so ustrezne.
3 Med prenavo	Prenova objekta.	Prenova objekta po konzervatorskem načrtu, ki je bil pripravljen v fazi načrtovanja.	
4 Med prenavo	<p>Meritve koncentracij PM_{2,5} (trije senzorji).</p> <p>Vrednosti koncentracij PM_{2,5} so presegle kritično raven na enem senzorju, opozorilo se pojavi v digitalnem dvojčku.</p> 	Opozorilo na visoko koncentracijo PM _{2,5} .	Opozorilo na visoko koncentracijo PM _{2,5} .
5 Med prenavo	Ukrep za zmanjšanje koncentracije PM _{2,5} v prostoru.	Pripravijo se arhitekturni ukrepi.	Svetujejo AEC strokovnjakom pri pripravi ukrepov za zmanjšanje koncentracij PM _{2,5} .

Tabela 2: Primer spremljanja meritev PM pred in med prenavo z uporabo BIM, prikaz primera.

3.3 Po prenavi

Po prenavi stavbe (Slika 6) se nadaljuje spremljanje okoljskih parametrov (rezultatov meritev) in sprejemanje dodatnih ukrepov. Tudi v tej fazi je vključevanje strokovnjakov s področja javnega zdravja ključnega pomena. Po prenavi stavbe moramo meriti

temperaturo zraka, relativno vlažnost zraka, temperaturo površine, relativno vlažnost površine, plesen, CO₂, CO, radon in PM. Ob povišani ravni opazovanih okoljskih parametrov se v digitalnem dvojčku pokažejo alarmi, na podlagi katerih je potrebno sprejeti ukrepe. Mesečna poročila pomagajo slediti spremembam v stavbi po prenavi.



Slika 6: Ukrepi, potrebni po prenovi stavbe, prikaz primera.

Slika 7 prikazuje vidno plesen na steni in stropu stavbe. Ob namestitvi senzorjev za zračno vlago in temperaturo zraka na kritična mesta lahko pridobimo grobe podatke o potencialni prisotnosti plesni v stavbi. Z namestitvijo novih oken v Mrakovo domačijo bi lahko potencialno vplivali na različne dejavnike, ki prispevajo k rasti in razmnoževanju plesni v stavbi. Trenutno so

okna enokrilna z lesenim okvirjem in kamnitimi okenskimi policami. Pri prenovi bi lahko za boljšo izolacijo vgradili okna z dvojno ali celo trojno zasteklitvijo. Dodana izolacija bi vplivala tudi stopnjo zračne vlažnosti in temperaturo zraka. Prav tako bi se spremenil delež dnevne svetlobe, ki prodre v prostore.



Slika 7: Plesen v Mrakovi domačiji, prikaz primera.

S pomočjo digitalnega dvojčka v BIM lahko spremljamo spremembe preko meritev okoljskih parametrov, ki vplivajo na rast in razmnoževanje plesni. Za lažje spremljanje je smiselno pripravljati mesečna poročila za vsak senzor. To je mogoče izvesti z vtičnikom senzorja v Revitu (BIM orodje). Povprečne urne vrednosti lahko prikažejo, kdaj in kako dolgo so bile vrednosti pod ali nad mejnimi vrednostmi. Pred prenavo lahko s tem pripravimo poročilo o trenutnem stanju. Na podlagi tega je mogoče opredeliti ukrepe za zmanjšanje problemov. Po prenavi je mogoče s pomočjo poročil oceniti učinkovitost ukrepov in sprejeti morebitne nadaljnje ukrepe.

Naša raziskava prikazuje senzorje, integrirane v stavbo kulturne dediščine s pomočjo uporabe BIM-a, s ciljem spremljanja določenih okoljskih parametrov. V njej smo za prikaz metodološkega pristopa uporabili dva sklopa senzorjev, na dveh lokacijah, vendar pa je praktična uporaba BIM-a še vedno omejena. Uporaba BIM-a bi bila bolj smotrna, če bi bilo nameščenih več senzorjev na več lokacijah, rezultati meritev pa bi omogočali 3D simulacije. Numerične modele parametrov, povezanih z zdravjem uporabnikov, lahko primerjamo z izmerjenimi empiričnimi podatki ob upoštevanju vseh okoliščin stavbe. Sem sodijo značilnosti, kot so velikost in značilnost oken, prostorska razporeditev, količina toplotne izolacije v vsakem delu stavbe in lokacije prezračevalnih naprav ter klimatskih sistemov. Za izboljšanje modelov in natančno predvidevanje prihodnjih meritev senzorjev je mogoče uporabiti algoritme strojnega učenja in sprejeti ukrepe za izboljšanje kakovosti notranjega zraka in ostalih okoljskih parametrov. Te ukrepe bi lahko znova ocenili glede njihove učinkovitosti v virtualnem prostoru (3D modelu, BIM orodju) preden bi jih integrirali v realni stavbi.

4 ZAKLJUČEK

BIM orodje sicer že ponuja vtičnike za analizo določenih okoljskih parametrov (npr. kakovost notranjega zraka, toplotno udobje, energetska

učinkovitost, zračna vlaga, zvočno, svetlobno in vizualno udobje itd.), vendar se ti parametri običajno analizirajo v ločenih simulacijskih orodjih (ne v orodju BIM) in niso neposredno integrirani v isti 3D model v BIM-u. Načrtovalec mora tako imeti več programov in specifičnega znanja, če bi želel spremljati več okoljskih parametrov. Posledično načrtovalci vztrajajo pri uporabi osnovnih značilnosti v BIM orodju (3D modeliranje, sodelovanje med različnimi strokovnjaki, kot so gradbeniki, strojniki, arhitekti), uporaba dodatnih programov in spremljanje okoljskih parametrov ostaja prezrta. Naš prispevek prikazuje, kako bi lahko na enostaven način v istem 3D modelu v BIM orodju spremljali več okoljskih parametrov in tako pridobili podatke o bivalnem ugodju v stavbi še preden bi bila stavba zgrajena. S pomočjo pridobljenih podatkov bi lahko tudi vplivali v fazi načrtovanja – spremembe v tej fazi bi bile cenejše in enostavnejše kot kasneje, ko zgradba že stoji. V primerjavi z obstoječimi rešitvami je prednost prikazanega metodološkega pristopa in uporabe orodja BIM predvsem v tem, da je vse združeno na istem mestu, enostavnejše za uporabo in bolj povezano med seboj.

BIM orodje tako ponuja samo podlago za izboljšanje zdravja in dobrega počutja bodočih uporabnikov starih in novih stavb in se lahko uporablja kot platforma za interdisciplinarno sodelovanje med različnimi zainteresiranimi deležniki v različnih fazah postopka načrtovanja (od načrtovanja do vzdrževanja). Z našim prispevkom smo pokazali, da bi se podatki, shranjeni v oblaku, lahko uporabili tudi pri prenavi starih stavb – orodje je namreč uporabno pred prenavo in tudi pred pričetkom gradnje novih stavb, saj lahko pred gradnjo le-teh v digitalnih dvojčkih pripravimo simulacije in napovedi. Zbrani podatki imajo uporabno vrednost tudi za druge projekte, saj bi bila z novimi vtičniki orodja BIM možna simulacija okoljskih podatkov pri načrtovanju novih stavb.

Prispevek predstavlja izhodišče za integracijo različnih okoljskih parametrov v BIM orodju na enostaven in pregleden način ter aktivnejše sodelovanje med načrtovalci in strokovnjaki s področja javnega zdravja.

Nasprotje interesov: Avtorji izjavljamo, da ne obstajajo nasprotja interesov.

Zahvala: Delo je nastalo s finančno pomočjo projekta InnoRenew CoE (Horizon 2020 Framework Programme of the European Union; H2020 WIDESPREAD-2-Teaming; #739574) ter programske skupine ARRS P2-0273.

Etika raziskovanja: Prispevek je bil pripravljen v skladu z etiko raziskovanja v javnem zdravju.

LITERATURA

1. UK Green Building Council. Health and wellbeing in homes. 2016; 1–37.
2. Buffet M-A, Gervais RL, Liddle M, et al. Well-being at work: creating a positive work environment. 2013; 124.
3. Azhar S, Nadeem A, Mok JYN, et al. Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects. In: First International Conference on Construction in Developing Countries (ICCID-C). Karachi Pakistan, 2008, pp. 435–46.
4. Malykhina GF, Tarkhov DA. Digital twin technology as a basis of the industry in future. In: The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences: 18th PCSF 2018 Professional Culture of the Specialist of the Future. UK: Future Academy, 2018, pp. 416–28.
5. Ibrahim Al-Sulaihi, Khalid Al-Gahtani, Abdullah Alsugair, et al. Assessing Indoor Environmental Quality of Educational Buildings Using BIM. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 2015; 4: 451–8.
6. Natephra W, Motamedi A. Live data visualization of IoT sensors using augmented reality (AR) and BIM. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019* 2019; 632–8.
7. Marzouk M, Abdelaty A. Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling. *Energy and Buildings* 2014; 84: 252–7.
8. Habibi S. Micro-climatization and real-time digitalization effects on energy efficiency based on user behavior. *Building and Environment* 2017; 114: 410–28.
9. Tang S, Shelden DR, Eastman CM, et al. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction* 2019; 101: 127–39.
10. Natephra W, Motamedi A. Live Data Visualization of IoT Sensors Using Augmented Reality (AR) and BIM. Epub ahead of print 24 May 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0084.
11. Jutraz A, Kukec A, Ursic S. Kakovost notranjega zraka v osnovnih šolah: Priročnik za izobraževanje učencev in učiteljev osnovnih šol. Ljubljana: NIJZ, 2019.
12. Super mikroklima v bivanjskem okolju - Projekt po kreativni poti do praktičnega znanja, <http://anja.jutraz.com/pkp2015/> (2015, accessed 1 January 2015).
13. Annesi-Maesano I, Baiz N, Banerjee S, et al. Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *Journal of toxicology and environmental health Part B, Critical reviews* 2013; 16: 491–550.
14. Cincinelli A, Martellini T. Indoor Air Quality and Health. *International journal of environmental research and public health*; 14. Epub ahead of print October 2017. DOI: 10.3390/ijerph14111286.
15. Cheek E, Guercio V, Shrubsole C, et al. Portable air purification: Review of impacts on indoor air quality and health. *The Science of the total environment* 2021; 766: 142585.
16. Braila N, Vakhrusheva S, Martynenko E, et al. Development of a cultural heritage object BIM model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; 90. Epub ahead of print 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012030.
17. Eken E, Taşçı B, Gustafsson C. An evaluation of decision-making process on maintenance of built cultural heritage: The case of Visby, Sweden. *Cities* 2019; 94: 24–32.
18. Hägerhed-Engman L, Bornehag CG, Sundell J. Building characteristics associated with moisture related problems in 8,918 Swedish dwellings. *International Journal of Environmental Health Research* 2009; 19: 251–65.
19. D'Amico A, Bergonzoni G, Pini A, et al. BIM for Healthy Buildings: An Integrated Approach of Architectural Design Based on IAQ Prediction. *Sustainability* 2020; 12: 10417.
20. Szabados M, Csákó Z, Kotlík B, et al. Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe – The InAirQ study. *Indoor Air* 2021; 1–15.
21. Sabbarese C, Ambrosino F, D'Onofrio A. Development of radon transport model in different types of dwellings to assess indoor activity concentration. *Journal of Environmental Radioactivity* 2021; 227: 106501.
22. Jutraž A, Kukec A, Otrepec P, et al. Monitoring Environmental and Health Impact Data in BIM Models to Assure Healthy Living Environments. In: Sousa J, Xavier J, Castro Henriques G (eds) *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference*. Porto: University of Porto, 2019, pp. 287–94.
23. Saatsi P, Sørensen BR, Gustafsson A. Quality parameters for renovation.