

dr. Uroš Bohinc, univ. dipl. inž. fiz.  
uros.bohinc@zag.si  
Zavod za gradbeništvo Slovenije,  
Dimičeva ul. 12, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek  
UDK 539.4.019.1:692.447(497.5Zadar)

# RAČUNSKI MODEL ZA OPIS TEMPERATURNEGA VPLIVA NA MERITVE DEFORMACIJ

## NUMERICAL MODEL OF TEMPERATURE INFLUENCE ON DEFORMATION MEASUREMENTS

### Povzetek

V prispevku je predstavljen izviren način za napoved odvisnosti izmerjenih deformacij od temperature okolice. Izhaja iz poenostavljenega fizikalnega modela, ki je umerjen s pomočjo niza obstoječih meritev, ki pokrivajo časovni razpon enega leta. Spremljanje konstrukcijskega stanja zvonika stolnice sv. Anastazije v Zadru je bilo opravljeno z namenom, da bi zanesljivo določili morebitne dolgotrajne trende obnašanja in tako omogočili pravočasno ukrepanje. Za uspešno določitev dolgotrajnih trendov je ključna ločitev temperaturnega vpliva na meritve. Rezultati kažejo, da je mogoče na predstavljeni način dokaj dobro izločiti temperaturni vpliv na meritve in tako izboljšati zaznavo morebitnih dolgotrajnih trendov.

Ključne besede: meritve deformacij, modeliranje temperaturnega vpliva, spremljanje konstrukcijskega stanja

### Summary

The paper presents an original method for predicting the dependence of measured deformations on ambient temperature. It is derived from a physical model calibrated using a set of existing measurements covering the time span of one year. The aim of the structural health monitoring of the bell tower of the Cathedral of St. Anastasia in Zadar was to reliably determine any long-term trends in behavior and thus enable timely planning of interventions. Separating the effects of temperature on measurements is key to successfully determining long-term trends. The results show that the temperature influence on the measurements can be eliminated well in the presented way.

Key words: deformation measurements, modelling of temperature influence, structural health monitoring

## 1 UVOD

### 1.1 Zakaj spremljanje konstrukcijskega stanja s pomočjo senzorjev postaja globalni trend

Spremljanje konstrukcijskega stanja (Structural Health Monitoring – SHM) objektov postaja globalno prepoznan trend, saj se uveljavlja praktično povsod, kar pomeni skokovit razvoj metod in pristopov za učinkovito merjenje, analizo podatkov, modeliranje in napovedovanje ukrepov. Bistvo SHM je, da pravočasno zaznamo spremembe na konstrukcijah, na podlagi česar lahko ustrezno reagiramo in preprečimo nesorazmerno škodo. Poleg tega je SHM lahko eden od pomembnih preventivnih varnostnih sistemov v primeru nepredvidenih dogodkov, na primer potres, bistveno povečan promet, močan veter, nepredvidene obtežbe zaradi posebne rabe. Grajeni objekti so v rabi daljša časovna obdobja in so lahko podvrženi različnim nepredvidljivim vplivom in spremembam v življenjski dobi. Njihovega spreminjanja torej ne moremo predvideti vnaprej, zato je pomembno, da spremembe spremljamo sproti in po potrebi nanje reagiramo. Na ta način dosežemo, da ne pride do nepopravljivih poškodb, sploh na objektih z veliko kulturno vrednostjo ali na pomembni infrastrukturi, kjer bi lahko prišlo do varnostnih tveganj, popravila pa lahko načrtujemo in opravljamo tudi ekonomsko bolj učinkovito. Med odmevnimi primeri uspešne uporabe SHM v Evropi je glavna železniška postaja v Berlinu, jez Eder v Nemčiji, kraljeva vila v Monzi v Italiji ter cerkev San Vigilio ob jezeru Lugano v Švici [Habel, 2009]. V Sloveniji je med drugim SHM-sistem vzpostavljen za spremljanje stanja viadukta Ravbarkomanda, ki je bil vzpostavljen ob zadnji sanaciji objekta leta 2018 [Anžlin, 2021].

### 1.2 Kaj zajema sistem SHM in kje je uporaben

Tehnološki razvoj ponuja vedno širši nabor tipal, hkrati se olajšujeta zapisovanje in hramba izmerkov v ustrezne podatkovne zbirke. Napredni SHM-sistemi so sestavljeni iz več komponent: (1) senzorični sistem, (2) sistem za pridobivanje in prenos podatkov, (3) sistem za obdelavo in nadzor podatkov, (4) sistem za modelno spremljanje stanja konstrukcije, (5) sistem za upravljanje s podatki, (6) sistem za pregledovanje in vzdrževanje. Ob tem je možna navezava na informacijsko modeliranje gradenj (Building Information Modelling – BIM), saj prinaša dodatne pozitivne učinke pri načrtovanju in upravljanju grajenih objektov.

Poleg visokih stavb SHM pogosto vzpostavimo na mostovih, podzemni infrastrukturi in nizkih gradnjah. Izzivi, s katerimi se spoprijemamo pri meritvah in njihovi interpretaciji, so odvisni od tipa konstrukcije, lokacije, rabe, vgrajenih materialov in drugih parametrov. Tehnologija optičnih vlaken je omogočila zanesljive, stabilne in robustne senzorje, ki lahko dolgoročno delujejo tudi v bolj zahtevnih okoljih [Glisic, 2013].

Pri stavbah s pomočjo SHM lahko spremljamo pojavljanje napak, ki bi zahtevale sanacijo, lahko pa so razlogi za uporabo SHM tudi zagotavljanje varnosti. Pogosto je tudi, da nas za-

nima toplotni odziv konstrukcije, senzorski sistem pa lahko uporabimo tudi skupaj s spremljanjem toplotnega odziva za namene gradbene fizike. Tak primer je opisan v študiji Canton Tower (supervisoka zgradba, 610 m), kjer so uporabili SHM z več kot 16 vrstami senzorjev (skupno objekt spremlja več kot 600 senzorjev) za spremljanje obnašanja objekta v realnem času med gradnjo kot med obratovanjem [Wang, 2014]. SHM na tem objektu med drugim vključuje nadzor vibracij in nadzor nad tehnologijami izkoriščanja obnovljivih virov energije. Meritve so različne tudi glede na konstrukcijske materiale. Pri jeklenih premostitvenih objektih nas na primer zanimajo procesi korozije [Urban, 2017], pri armiranobetonskih spremljamo nastajanje in razvoj razpok, medtem ko je pri lesenih konstrukcijah ključno spremljanje vlage. Ker gre običajno za majhne spremembe, zanesljiva določitev časovnega trenda odziva predstavlja velik izziv.

### 1.3 Spremljanje deformacij na izbranih konstrukcijskih detajlih

Najpogosteje spremljane količine so deformacije oz. pomiki, ki jih merimo na izbranih konstrukcijskih detajlih. Z analizo časovnega razvoja meritev želimo razbrati, ali je stanje stabilno, ter zaznati morebitne postopne spremembe, ki zmanjšujejo nosilnost ali kako drugače kažejo na zmanjšanje funkcionalnosti. Lokalne deformacije so odvisne od mehanskih sprememb kakor tudi od spreminjanja temperature konstrukcije. Nema lokrat je vpliv temperature večji, zato je v časovnem odzivu prevladujoč in bistveno oteži analizo dolgotrajnih trendov. V večini primerov imamo opraviti z zelo počasnimi spremembami, zato je zanesljiva določitev časovnega trenda še toliko težja. Skupni vpliv temperaturnega raztezanja na posamezno meritev pomika oz. deformacije je odvisen od temperaturnega polja v konstrukciji, česar običajno ne moremo meriti neposredno. Največkrat je edina dosegljiva posredna informacija o temperaturi konstrukcije, meritev temperature zraka na mestu v bližini razpok ali v najboljšem primeru na nekaj mestih. Očitno je to premalo, da bi lahko določili celotno temperaturno polje in tako predvideli deformacijo, ki jo ta povzroči. Vendarle lahko iz te informacije izluščimo dovolj, da vsaj v omejenem obsegu predvidimo temperaturni vpliv na meritev. To nam omogoči, da se pri analizi časovnega trenda osredotočimo le na deformacijo, ki jo povzročajo mehanske napetosti oz. spremembe v razporeditvi obtežbe.

### 1.4 Modeli za napovedovanje temperaturnega odziva konstrukcij

Obstoječe modele za napoved temperaturnega vpliva je mogoče v grobem razdeliti na tiste, ki izhajajo iz fizikalnega modela konstrukcije, in tiste, ki za napoved uporabljajo zgolj meritve. Prvi so za širšo uporabo manj primerni, saj zahtevajo natančno modeliranje termomehanskega odziva, običajno z metodo končnih elementov. Prejšnje študije so na primer že testirale učinkovitost različnih regresijskih metod za numerične modele, ki obravnavajo razmerja med temperaturnimi porazdelitvami in strukturnim odzivom [Kromanis, 2014]. Gradnja natančnega modela je žal zamudna in potrebuje vhodne podatke, ki večkrat niso dosegljivi. Dodatno je treba za napo-

ved odziva izračunati celotno temperaturno polje konstrukcije, za kar bi potrebovali širšo mrežo meritev temperature. To pa je v praksi redko izvedljivo.

Po drugi strani modeli, ki fizikalnega ozadja ne upoštevajo, ne trpijo za omenjenimi težavami in lahko napovedo odziv na temperaturna nihanja zgolj z analizo preteklih časovnih serij. Tak pristop zahteva uporabo modernih metod strojnega učenja in nevronskih mrež in se v zadnjem času vedno bolj uveljavlja [Mishra, 2021]. Takšni modeli so računsko zahtevni, predvsem pa je lahko težavna njihova interpretacija. Zato je v nekaterih primerih smiselno uporabiti srednjo pot in zgraditi model, ki temelji na najosnovnejših fizikalnih principih in zato ni odvisen od natančnega numeričnega modela konstrukcije.

Pri cikličnem spreminjanju zunanje temperature v razsežnem polprostoru je mogoče globinski profil temperature relativno dobro opisati z rešitvijo 1D parcialne diferencialne enačbe za prevajanje toplote v analitični obliki. Značilnost rešitve je, da z naraščajočo globino pada amplituda temperaturnih nihanj in hkrati narašča fazna razlika. Na analitično rešitev se opira tudi standard SIST EN ISO 13786:2017 [SIST, 2017], ki obravnava dinamične toplotne značilnosti s preprostimi računskimi metodami. Model, ki je predstavljen v tem prispevku, smiselno upošteva osnovne lastnosti analitične rešitve, vendar na zelo poenostavljen način, ki omogoča izračun ob minimalnem številu parametrov.

## 1.5 Namen raziskave

V tem prispevku je predstavljen izviren način za napoved odvisnosti izmerjenih deformacij od temperature zunanjega zraka. Izhaja iz fizikalnega modela, ki je umerjen s pomočjo niza obstoječih meritev, ki pokrivajo časovni razpon sezonskega cikla

temperaturnih nihanj. Pristop je preizkušen na meritvah deformacij obstoječih razpok na zvoniku stolnice sv. Anastazije v Zadru v kombinaciji s podatki, izmerjenimi s pomočjo vremenske postaje v bližini.

## 2 MERITVE IN METODOLOGIJA IZRAČUNA

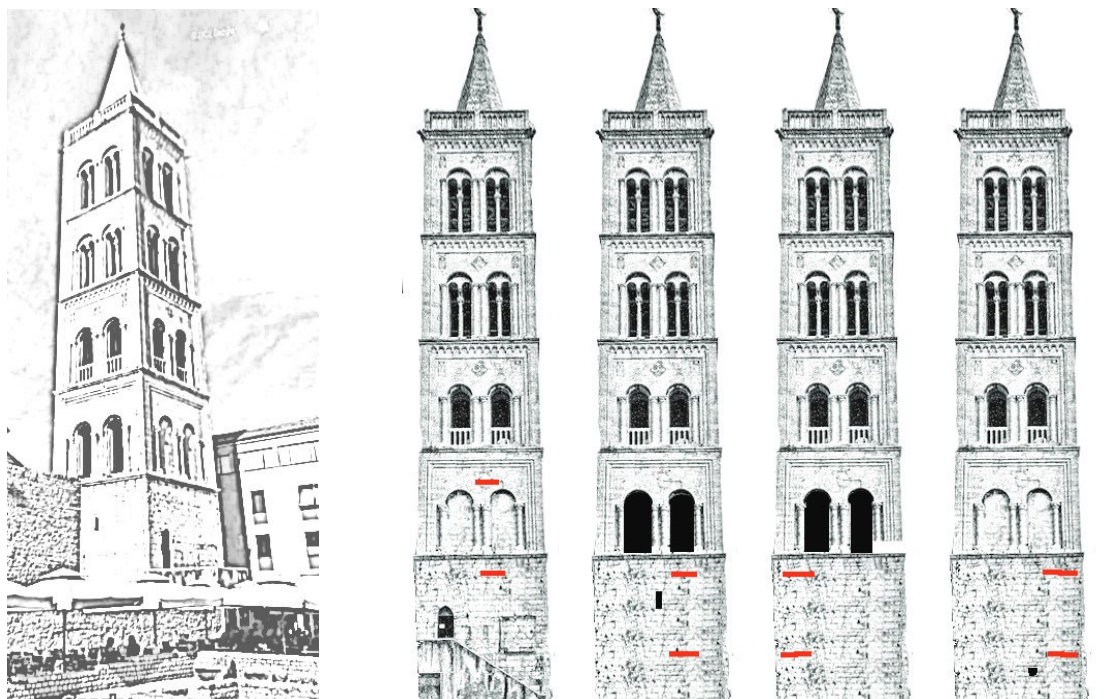
### 2.1 Opravljene meritve

Meritve deformacij smo izvajali na zvoniku katedrale sv. Anastazije Zadru, ki je visok 54,9 m, v obdobju 12 mesecev [Uglešič, 2014]. Vzpostavljen je bil merilni sistem z merilniki pomika na osnovi optičnih vlaken (merilni sistem SMARTEC SOFO). Merilniki pomika so bili nameščeni preko dveh sidrišč na zunanji površini zidu čez 8 razpok, ki se nahajajo na vseh štirih fasadah zvonika (po dve razpoki na vsaki od štirih fasad), glej sliko 1. Merska mesta so označena z oznako fasade in vertikalnega položaja (spodaj/zgoraj).

Razdalja med sidrišči merilnikov pomika je znašala 0,5 m. Na zračni razdalji okvirno 150 m od zvonika smo vzpostavili vremensko postajo z zajemom temperature in vlažnosti zraka, zračnega pritiska, padavin ter hitrosti in smeri vetra. Podatke iz vremenske postaje smo zajemali v podatkovno bazo sočasno s podatki o meritvah deformacij, in sicer 1 meritev vsakih 10 min.

### 2.2 Metodologija za izračun temperaturnega vpliva

Vpliv spreminjajoče se temperature okolice na meritev širine razpoke modeliramo s poenostavljenim numeričnim mode-



**Slika 1.** Levo: pogled na zvonik katedrale sv. Anastazije v Zadru, desno: rdeče okvirno označena merilna mesta, od leve proti desni: JV, JZ, SV in SZ fasada.



lom. Predpostavimo, da je sprememba širine razpoke  $d$  sorazmerna spremembi temperature podlage  $\theta(t)$ , ki pa je ne merimo in ne poznamo.

$$\Delta d_{model} = k\Delta\theta(t) \quad (1)$$

Osnovna neznanica je torej temperatura  $\theta(t)$ , ki jo poskušamo oceniti iz meritev temperature zraka  $\theta_z(t)$  na podlagi modela temperaturnega odziva konstrukcije. Dosleden fizikalni model temperaturnega odziva sloni na reševanju parcialne diferencialne enačbe za prenos toplote in je v praksi zaradi zahtevnosti neizvedljiv. Temperaturo podlage zato poskušamo napovedati s poenostavljenim modelom, ki se po osnovnih fizikalnih principih le zgleduje, ne upošteva pa jih v celoti. Glavni cilj je tako v čim boljši meri napovedati temperaturo podlage le na osnovi meritev temperature zraka, pri čemer osnovna ideja modela izhaja iz razmisleka, da se temperatura podlage zaradi končne toplotne kapacitete z zamikom odziva na spremembe zunanje temperature.

Sprememba temperature  $d\theta$  je sorazmerna toploti  $dQ$ , ki prehaja iz okolice, pri čemer je sorazmernostni koeficient obratno sorazmeren toplotni kapaciteti  $C$ :

$$d\theta = dQ/C \quad (2)$$

Toplotni tok  $dQ/dt$  v opazovani del na površini konstrukcije je vsota toplotnega toka, ki teče iz notranjosti in toplotnega toka, ki teče v okolico. Ta je v prvem približku sorazmeren s temperaturno razliko med zrakom in podlago  $dQ=K(\theta_z-\theta)dt$ , kjer  $K$  označuje konstanto, ki opredeljuje odvisnost toplotnega toka od temperaturne razlike. Toplotni tok, ki teče iz notranjosti, je sorazmeren z gradientom temperature in ga ni mogoče preprosto oceniti. Zavrlo rešljivosti modela toplotni tok proti notranjosti v primerjavi s tokom proti okolici zanemarimo.

Zvezo med hitrostjo spreminjanja temperature in temperaturno razliko med okolico in telesom tako lahko opišemo s preprosto diferencialno enačbo:

$$\frac{d\theta}{dt} = (\theta_z - \theta)/t_c. \quad (3)$$

S časovno konstanto  $t_c=C/K$  opišemo skupni vpliv razmerja med toplotno kapaciteto in toplotno prehodnostjo, ki določa časovni zamik odziva temperature podlage proti temperaturi okolice.

Oceno za  $\theta(t)$  dobimo z numeričnim integriranjem zgornje enačbe med časoma  $t_0$  in  $t_1$ , pri čemer izhajamo iz izmerjene temperature zraka  $\theta_z(t)$  in predpostavimo, da je  $\theta(t_0)=\theta_z(t_0)$ . Za numerično integracijo diferencialne enačbe uporabimo eksplisitno metodo Runge-Kutta.

Konstanti  $k$  in  $t_c$  določimo z optimiranjem razlike med izmerjenim  $\Delta d_{meritev}(t)$  in napovedanim odzivom  $\Delta d_{model}(t)$  v izbranem časovnem nizu meritev med  $t_0$  in  $t_1$ :

$$\int_{t_0}^{t_1} (\Delta d_{meritev} - \Delta d_{model})^2 dt \quad (4)$$

Optimizacijo izvedemo v dveh korakih. Najprej ločeno določimo  $t_c$ . To storimo tako, da za različne parametre  $t_c$  integriramo diferencialno enačbo in tako dobimo različne časovne poteke temperature  $\Delta\theta_{model}(t)$ , ki jih primerjamo s časovnim potekom meritev širine razpok  $\Delta d_{meritev}(t)$ . Da bi lahko opravili primerjavo,

najprej oboje pretvorimo v brezdimenzijsko obliko z normiranjem vrednosti na območje  $[-1,1]$ . Normiranje signala  $x(t)$ , ki v danem območju med  $t_0$  in  $t_1$  zavzame največjo vrednost  $x_{max}(t)$  in najnižjo vrednost  $x_{min}(t)$ , opravimo s pomočjo transformacije  $\tilde{x}=(x-x_0)/\Delta x$ , kjer je  $x_0=(x_{min}+x_{max})/2$  in  $\Delta x=(x_{max}-x_{min})/2$ . Normirani signal označimo z  $\tilde{x}(t)$ . Parameter  $t_c$  tako določimo z minimiziranjem razlike  $\int_{t_0}^{t_1} (\Delta\tilde{\theta}_{meritev} - \Delta\tilde{d}_{model})^2 dt$ . Numerična integracija je hitra in zato cel postopek računsko nezahteven. Ko določimo  $t_c$ , nazadnje določimo še parameter  $k$  s pomočjo metode najmanjših kvadratov.

Z modelom (1) lahko sorazmerno dobro opišemo sezonske variacije, ki predstavljajo pretežni del odziva, zaradi preproste zasnove modela pa ni mogoče hkrati zajeti tudi dnevnih variacij. Zato model (1) razširimo v vsoto dveh prispevkov

$$\Delta d_{model} = k_1\Delta\theta_1(t) + k_2\Delta\theta_2(t), \quad (5)$$

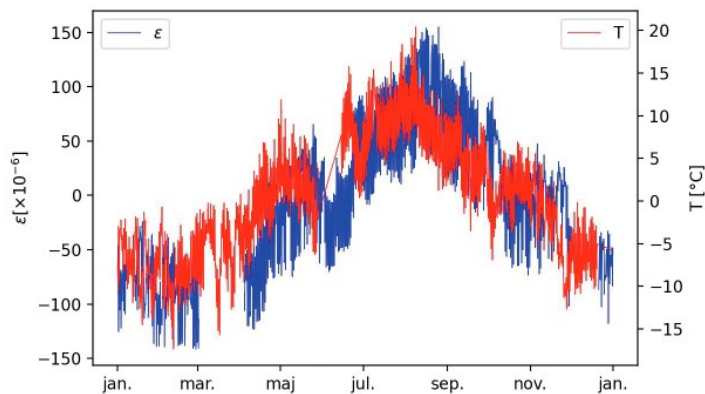
kjer je  $\Delta\theta_1$  sezonska in  $\Delta\theta_2$  dnevna variacija temperature. Dnevno variacijo temperature določimo na podoben način kot sezonsko, pri čemer rešujemo nekoliko modificirano diferencialno enačbo (3), kjer namesto  $\theta_z$  privzamemo razliko  $\theta_z-\theta_p$ , kjer temperatura  $\theta_p$  predstavlja temperaturo sloja, kjer dnevna nihanja temperature niso več opazna. Pri integraciji diferencialne enačbe nastavimo začetno vrednost  $\theta_2(0)=0$ . Temperaturo spodnjega sloja  $\theta_p$  neodvisno ocenimo z numerično integracijo (3), kjer za  $t_c$  privzamemo oceno 1 dan, ki je izbrana izkustveno.

Osnovna ideja za tovrstni pristop izhaja iz predpostavke, da je toplotni tok, ki ogreva površinski sloj, različna toplotnih tokov, ki izhajajo od površine in proti notranjosti. Čeprav sta tokova različna, lahko v prvem približku privzamemo, da je skupni toplotni tok sorazmeren temperaturni razliki med površino in spodnjim slojem  $\theta_z-\theta_p$ . Časovno konstanto  $t_{c2}$  določimo z optimizacijo časovnega zamika med razliko  $\Delta d_{model}-k_1\Delta\theta_1(t)$  ter  $\Delta\theta_2(t)$ . Vrednost  $t_{c2}$  iščemo v območju od nekaj minut do nekaj ur, pri čemer fiksiramo parametra  $k_1$  in  $t_{c1}$ , ki ju določimo že v prvem koraku. Sledi le še določitev  $k_2$  ob fiksiranju vseh preostalih parametrov.

Z možnostjo nastavitve različnih koeficientov  $k_1$  in  $k_2$  lahko model zajame različne konfiguracije meritev. V skrajnem primeru, ko gre za merjenje razdalje med sidrišči na homogeni površini, predvidevamo, da velja  $k_1=k_2$ . V primeru pa, ko sta sidrišči merilnika vgrajeni čez razpoko in lahko privzamemo, da je zgornji sloj od spodnjega ločen, raztezanje zgornjega sloja povzroči zapiranje razpoke, zato sta predznaka  $k_1$  in  $k_2$  različna, kar je predstavljeno na sliki 3.

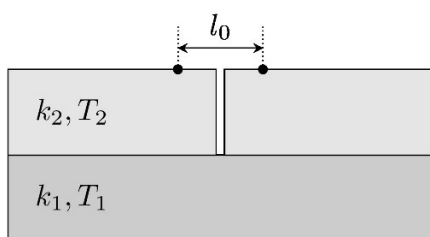
### 3 REZULTATI

Na sliki 2 in 3 sta prikazana časovna diagrama meritev temperature zraka (rdeče) in relativne deformacije razpoke na JV fasadi zgoraj  $\varepsilon=\Delta d/l_0$  (modro), pri čemer je  $l_0$  začetna razdalja med sidrišči merilnika razpok,  $\Delta d$  pa izmerjena sprememba razdalje. Meritvi sta zaradi lažje primerjave prikazani na ločenih oseh. Slika 2 prikazuje časovni potek temperature zraka in deformacije v razponu enega leta. Razvidno je, da meritve deformacij časovno zaostajajo za temperaturnimi nihanji, kar kaže na toplotno vztrajnost objekta, ki se na spremembe temperature okoliškega zraka odziva s približno 14,6-dnevnim zamikom (glej preglednico 1).

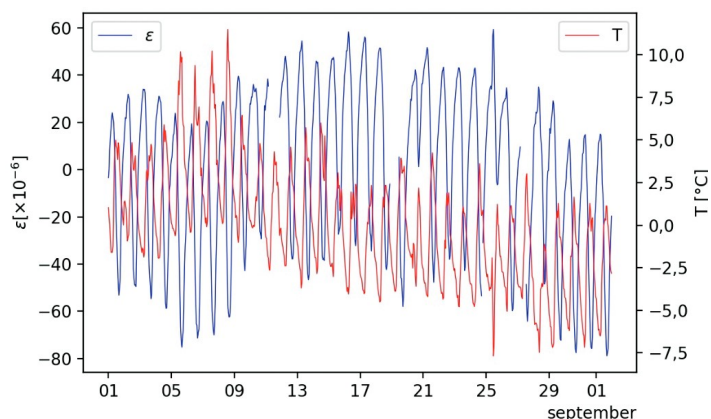


**Slika 2.** Časovni potek temperature zraka in deformacije za merilno mesto JV zgoraj v razponu enega leta.

Podrobnejša primerjava časovnega poteka deformacij proti poteku temperature zraka za obdobje 30 dni na sliki 4 razkriva, da je predznak spremembe deformacij nasproten predznaku temperaturnih sprememb, iz česar je mogoče sklepati, da se razpoke z ogrevanjem zraka zapirajo. Tudi v primeru dnevnih temperaturnih nihanj deformacije razpok sledijo z zamikom, vendar je ta bistveno krajši. Zapiranje razpok z naraščajočo zunanjo temperaturo je na prvi pogled nekoliko presenetljivo, vendar ga je mogoče razložiti sorazmerno preprosto. Če je površinski sloj od spodnjega ločen, raztezanje površinskega sloja povzroči zmanjševanje razdalje med sidriščema, raztezanje podlage pa povečevanje razdalje (prikaz na sliki 3).

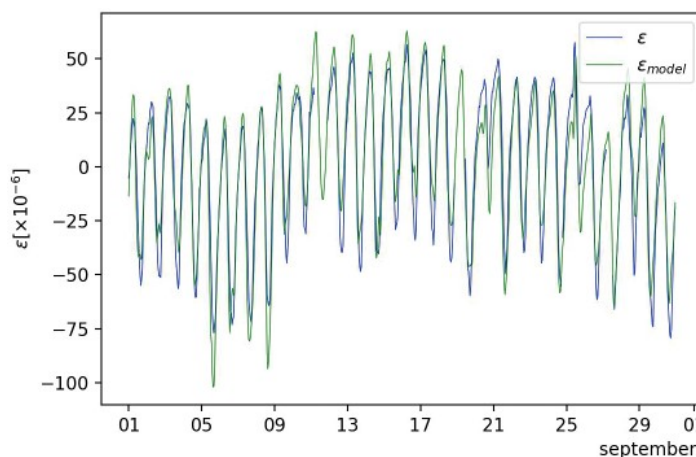
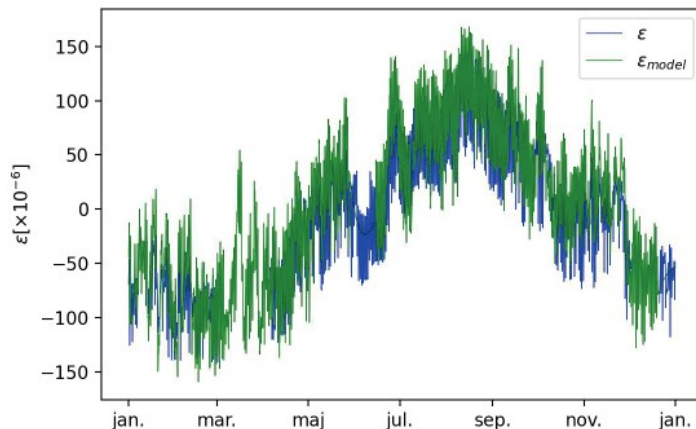


**Slika 3.** Model razpoke.



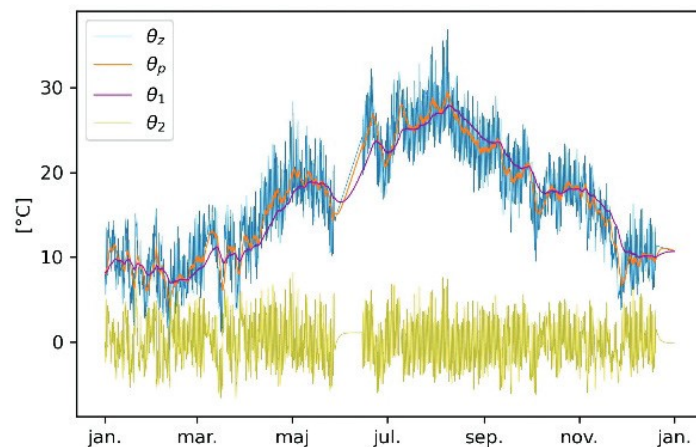
**Slika 4.** Časovni potek temperature zraka in deformacije za merilno mesto JV zgoraj v razponu 30 dni.

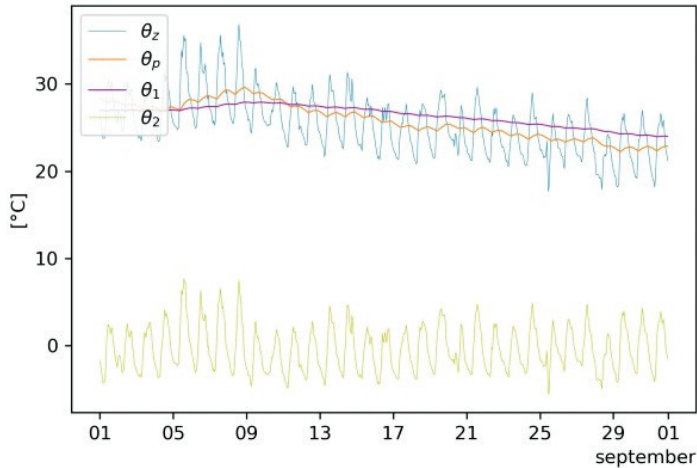
Na sliki 5 je predstavljena primerjava med izmerjeno (modro) in modelirano (zeleno) deformacijo razpoke na JV fasadi



**Slika 5.** Primerjava modelske napovedi deformacij z izmerjenimi v razponu enega leta in enega meseca za merilno mesto JV zgoraj.

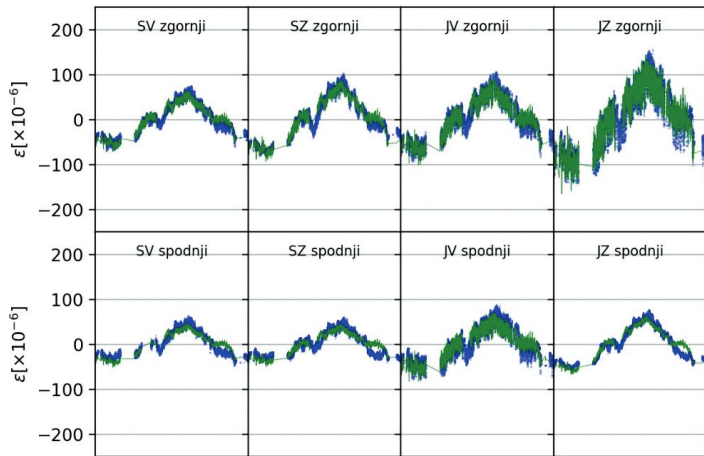
zgoraj. Kljub preprosti zasnovi je model sposoben sorazmerno dobre napovedi, saj absolutna vrednost razlike med modelom in meritvijo ne presega vrednosti  $30 \times 10^{-6}$ . Dobro opiše tudi fazno razliko pri sezonskem kakor tudi pri dnevnem nihanju. Razlike med izmerjenim in napovedanim odzivom so posledica poenostavitve modela in deformacij, ki so neodvisne od temperaturnih nihanj in jih povzročijo mehanske spremembe ali spremembe v obremenitvi.



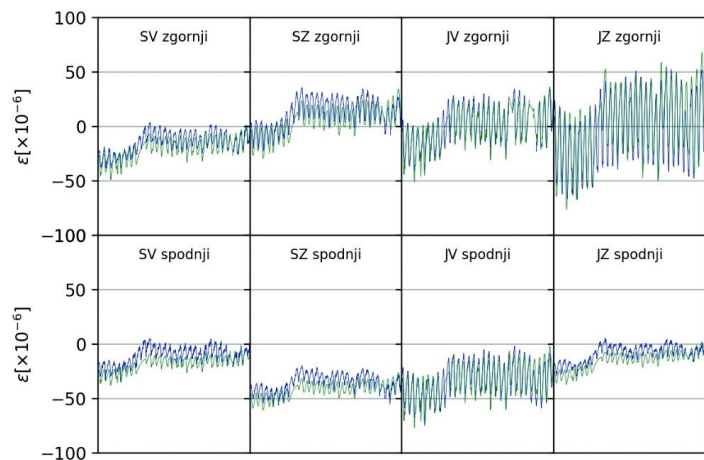


**Slika 6.** Primerjava temperaturnih nizov za model meritve JV zgoraj v časovnem razponu enega leta in enega meseca.

Slika 6 prikazuje primerjavo različnih temperaturnih nizov, ki so uporabljeni v modelu meritve razpoke na mestu JV



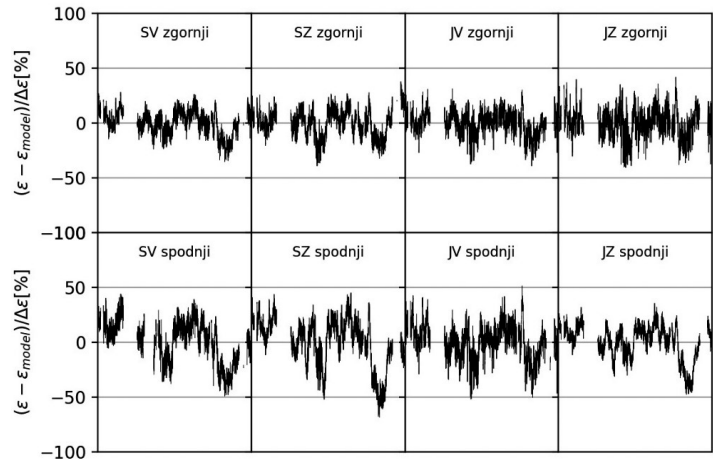
**Slika 7.** Primerjava meritve razpok (modro) z modelsko napovedjo (zeleno) za vsa merska mesta v obdobju enega leta.



**Slika 8.** Primerjava meritve razpok (modro) z modelsko napovedjo (zeleno) za vsa merska mesta v obdobju 30 dni.

zgoraj. Poleg temperature zraka  $\theta_z$  so prikazane še sezonska in dnevna variacija temperature  $\theta_1$  in  $\theta_2$  ter temperatura  $\theta_p$ , ki sicer služi le za računski pripomoček pri izračunu dnevne variacije  $\theta_2$ .

Slika 7 prikazuje primerjavo med modelsko napovedjo in meritvami v obdobju enega leta za vsa merska mesta. Na sliki 8 so na diagramih, ki obsegajo isto časovno obdobje, prikazane relativne razlike med modelsko napovedjo in meritvami  $\epsilon - \epsilon_{model}$  glede na razpon  $\Delta\epsilon = (\epsilon_{max} - \epsilon_{min})/2$ . Vidimo lahko, da so v prikazani razliki sezonska in dnevna nihanja znatno manj izrazita, kar olajšuje interpretacijo in zaznavo morebitnih dolgotrajnih trendov.



**Slika 9.** Diagrami prikazujejo razliko med meritvijo razpok in modelsko napovedjo za vsa merska mesta v obdobju enega leta relativno glede na razpon  $\Delta\epsilon = (\epsilon_{max} - \epsilon_{min})/2$ .

Parametri modelov za posamezne razpoke, ki so bili izračunani na podlagi optimizacije, so podani v preglednici 1. Časovne konstante sezonskih nihanj so v razponu od 7,1 do 17,3 dneva, za dnevna nihanja pa od 9 do 141 min. Koefficienti  $k_1$  so v relativno majhnem razponu od 0,9 do 1,8. Enako velja za koefficiente  $k_2$ , ki ležijo v območju od -0,1 do -1,6. Predznak koefficientov  $k_1$  in  $k_2$  je nasproten, kar je v skladu z opažanjem, da se razpoke ob segrevanju zapirajo.

	$tc_1$ [dni]	$k_1$	$tc_2$ [min]	$k_2$
SZ spodaj	9,6	0,9	127	-0,3
SZ zgoraj	10,1	1,8	141	-0,4
SV spodaj	7,1	1,0	9	-0,2
SV zgoraj	8,4	1,3	19	-0,3
JZ spodaj	10,1	1,4	59	-0,1
JZ zgoraj	17,3	2,4	79	-1,6
JV spodaj	14,6	1,3	9	-0,8
JV zgoraj	9,3	6,7	9	-0,8

**Preglednica 1.** Parametri modelov razpok.



## 4 DISKUSIJA

Modeliranje temperaturne odvisnosti meritve širine razpoke zgolj na podlagi zunanje temperature je mogoče le z modelom, ki fizikalnih zakonitosti ne upošteva povsem dosledno, zato ga je treba obravnavati le kot računsko orodje, ki pomaga pri lažji interpretaciji meritev. Kljub temu je zanimivo, da je mogoče oceniti red velikosti za  $t_{c1}$  z grobo oceno. Najprej zapišemo  $t_{c1} = m_q / K = mc_p / K$ , kjer je  $K$  skupni toplotni tok na enoto temperaturne razlike in je produkt toplotne prestopnosti in površine. Toplotno prestopnost  $\Lambda = \lambda S / dx = 1300 \text{ kW/K}$  ocenimo iz toplotne prevodnosti apnenca, ki znaša  $\lambda = 1,3 \text{ W/mK}$ , površine  $S$ , ki jo ocenimo na ca.  $2000 \text{ m}^2$  (višina 55 m, stranica zvonika približno 5 m, štejemo dvojno površino, ker je zvonik odprt), in debeline mejne plasti  $dx$ , ki jo ocenimo na ca. 2 mm. Maso zvonika določimo iz ocene debeline zidov 0,5 m in ocene gostote apnenca  $\rho = 2000 \text{ kg/dm}^3$  na ca. 1000 ton. Če upoštevamo še toplotno kapaciteto apnenca  $c = 840 \text{ kJ/kgK}$ , dobimo

$$t_{c1} = \frac{mc_p}{\Lambda} = \frac{10^6 \text{ kg} \cdot 840 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}}{1300 \frac{\text{kW}}{\text{K}}} = 7,5 \text{ dni}$$

Čeprav gre za izjemno grobo oceno, je ta vendarle v okviru razpona vrednosti, ki jih dobimo z optimizacijo, in znaša od 7 do 17 dni za različna merska mesta.

Pri sinusno spreminjajočem se poteku zunanje temperature s periodo  $t_0$  lahko ocenimo vdorno globino  $\delta$  (globino, pri kateri se amplituda zmanjša za  $e=2,71828$  krat) s pomočjo izraza  $\delta = \sqrt{\frac{\lambda t_0}{\pi \rho c}}$ , ki je povzet po definiciji, podani v členu 3.2.7 iz standarda SIST EN ISO 13786:2017 [SIST, 2017]. Za konkretni primer za periodo  $t_0=1$  dan znaša vdorna globina 4,7 mm, za periodo  $t_0=1$  leto dni pa 8,8 cm.

## 5 SKLEP

Prikazan način modeliranja temperaturnega vpliva na meritve deformacij je kljub preprosti zasnovi učinkovit in omogoča izračun modelske napovedi, na podlagi katere je mogoče izboljšati zanesljivost napovedi meritev deformacij. Temperaturni vplivi na izmerjene deformacije so lahko bistveno večji od konstrukcijskih vplivov, ki jih želimo spremljati, zato je pri oceni obnašanja koristno odšteti temperaturni vpliv in tako bolj jasno izpostaviti ključne dejavnike, ki vplivajo na časovni razvoj razpok. Z razvitim modelom temperaturne odvisnosti, ki ga umerimo na enoletni časovni zgodovini meritev temperature in deformacij, je mogoče v nadaljevanju iz meritev okoliške temperature sorazmerno dobro napovedati deformacije razpok. Razlika med meritvijo in modelsko napovedjo zato lahko služi za koristno orodje pri interpretaciji meritev. Ključno spoznanje je, da uspešna interpretacija meritev deformacij ni mogoča, če ob meritvi deformacij hkrati ne merimo vsaj še temperature okoliškega zraka. Z meritvijo temperature in s preprostim modelom, ki je predstavljen v tem prispevku, je mogoče napovedati vpliv temperature na meritve deformacij in ga izločiti pri skupni oceni vpliva deformacij.

## 6 ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela infrastrukturne skupine Preizkušanje materialov in konstrukcij (ARRS – IO-0032), ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujem.

## 7 LITERATURA

Anžlin, A., Bohinc, U., Hekič, D., Kreslin, M., Kalin, J., Žnidarič, A., Comprehensive permanent remote monitoring system of a multi-span highway bridge. In Proceedings of the 2nd International Conference CoMS 2020/21 (p. Volume 2, p. 12), 2021.

Glisic, B., Fiber optic sensors for subsea structural health monitoring, *Subsea Optics and Imaging*, 434–470, <https://doi.org/10.1533/9780857093523.3.434>, 2013.

Habel, W. R., Structural health monitoring research in Europe: Trends and applications, *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*. Woodhead Publishing Limited, <https://doi.org/10.1533/9781845696825.2.435>, 2009.

Kromanis, R., Kripakaran, P., Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories, *Computers & Structures*, 136, 64–77, <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2014.01.026>, 2014.

Mishra, M., Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies, *Journal of Cultural Heritage*, 47, 227–245, <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.09.005>, 2021.

SIST, SIST EN ISO 13786:2017 Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods (ISO 13786:2017, Corrected version 2018-03), Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2017.

Uglešič, D., Bohinc, U., Monitoring of cracks on the bell tower of St. Anastasia cathedral in Zadar Croatia, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014 - 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society, (June), 2020–2027, 2014.

Urban, V., Krivy, V., Kubzova, M., Development of Corrosion Processes on Weathering Railway Bridge, *Procedia Engineering*, 190, 275–282, <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.05.338>, 2017.

Wang, M. L., Lynch, J. P., Sohn, H., Sensor Technologies for Civil Infrastructures, *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (Vol. 1). Elsevier Inc., <https://doi.org/10.1533/9781782422433>, 2014.