



Martina Stopar, mag. inž. grad.
martina.stopar@c-i.si



doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.
bojan.cas@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.
peter.cesarek@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 531/534:519.673:625.745.11

VPLIV TEMPERATURE IN DUŠENJA NA VIBRACIJE BRVI Z NOSILNIM SISTEMOM NATEZNEGA TRAKU: ŠTUDIJA PRIMERA BRVI V IRČI VASI

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DAMPING ON THE VIBRATIONS OF A STRESS RIBBON FOOTBRIDGE: CASE STUDY OF FOOTBRIDGE IN IRČA VAS

Povzetek

Mostovi oz. brvi z nosilnim sistemom nateznega traku so specifične in tehnološko zahtevne konstrukcije, ki so zaradi svoje vitkosti dovzetne za vibracije, ki nastanejo kot posledica dinamičnega vzburjanja zaradi hoje in teka pešcev in tekačev. Njihov dinamični odziv je močno odvisen od temperaturnih sprememb, ki vplivajo na togost brvi, ter od dušenja, ki ga je vnaprej težko natančno oceniti.

V prispevku predstavimo, kakšen vpliv imajo temperaturne spremembe in dušenje na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku ter posledično na udobje uporabnikov. Preučevanje omenjenih vplivov smo izvedli na konkretni brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi pri Novem mestu, ki je prva in trenutno edina konstrukcija tega tipa v Sloveniji. V prispevku je predstavljen računski model obravnavane brvi, katerega odziv je primerjan z dejansko izmerjenim statičnim in dinamičnim odzivom brvi. Predstavljene so tudi ugotovitve obsežnih parametričnih dinamičnih analiz, ki so bile izvedene ob različnih temperaturnih pogojih in pri različnih deležih kritičnega dušenja.

Ključne besede: natezni trak, brv Irča vas, vibracije, pešci, temperaturne spremembe, dušenje

Summary

Stress ribbon bridges and footbridges are specific and technologically demanding structures which, due to their slenderness, are susceptible to vibrations resulting from dynamic excitation caused by pedestrian and runner activity. Their dynamic response is highly dependent on temperature changes that affect the stiffness of the structure, as well as on damping, which is difficult to estimate accurately in advance.

This article examines the influence of temperature variations and damping on the vibrations of a stress ribbon footbridge and, consequently, on user comfort. The case study of these effects was conducted on the pedestrian and cyclist bridge over the Krka River in Irča vas near Novo mesto, which is the first and currently the only structure of this type in Slovenia. The article also presents a numerical model of the analysed footbridge, with its response compared to the measured static and dynamic response of the actual structure. Furthermore, the findings of extensive parametric dynamic analyses are presented, performed under varying temperature conditions and considering different ratios of critical damping.

Key words: stress ribbon, footbridge Irča vas, vibrations, pedestrians, temperature changes, damping

1 UVOD

Mostovi z nosilnim sistemom nateznega traku (ang. stress ribbon bridges) predstavljajo specifično vrsto mostov in spadajo med zahtevnejše konstrukcije tako z vidika načrtovanja kot z vidika tehnologije njihove izgradnje. Lahko bi dejali, da imamo opraviti z neke vrste visečimi konstrukcijami, sestavljenimi iz rahlo povešenih napetih kablov, ki so vgrajeni v armiranobetonsko prekladno ploščo mostu. Ta je v primerjavi z velikim razponom izjemno tanka, kar daje tovrstnim konstrukcijam eleganten in lahkoten videz, ki se lepo umesti v naravno okolje, zaradi česar so takšni tipi mostov največkrat uporabljeni kot brvi za pešce in kolesarje [Strasky, 2011]. Zaradi izjemne vitkosti pa so omenjene brvi dovezetnejše za nastanek vibracij, ki nastanejo kot posledica dinamičnega vzbujanja zaradi hoje pešcev. Te z vidika nosilnosti za konstrukcijo običajno niso nevarne, lahko pa povzročijo nelagodje in čustveno reakcijo pešcev [Heinemeyer, 2009].



Slika 1. Pogled na natezni trak brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi [Ponting, 2025]

Različne študije so pokazale, da so mostovi nateznega traku zelo občutljivi tudi na temperaturne spremembe okolja, ki zaradi raztezanja in krčenja materialov mostu spreminjajo deformacijsko-napetostno stanje in togost konstrukcije kot celote [Strasky, 2011], [Kogovšek, 2024]. Ta je namreč ena ključnih lastnosti, ki določajo odziv konstrukcije na dinamično obtežbo. Poleg tega je dinamični odziv pogojen z dušenjem, ki je izjemno kompleksen pojav, zaradi česar je njegova natančna opredelitev možna le na osnovi meritev, opravljenih, ko je brv že v celoti zgrajena [Heinemeyer, 2009].

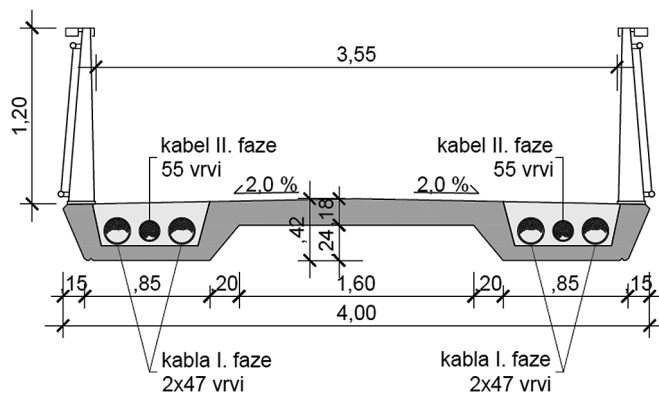
V okviru raziskav smo tako poskušali ugotoviti, kako in v kolikšni meri na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku vplivajo temperaturne spremembe in dušenje ter kakšen vpliv imata ta dva parametra na udobje uporabnikov. Preučevanje omenjenih vplivov smo izvedli na primeru brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi pri Novem mestu, ki je prvi in trenutno edini most z nosilnim sistemom nateznega traku v Sloveniji [Weingerl, 2023]. Več podrobnosti o omenjeni tematiki je predstavljenih v [Stopar, 2025].

2 KRATKA PREDSTAVITEV BRVI ZA PEŠCE IN KOLESARJE ČEZ REKO KRKO V IRČI VASI

Gradnja brvi v Irči vasi se je začela z izvedbo podporne konstrukcije, ki jo sestavljata krajna opornika, temeljena na vodnjakih, katerih medosna oddaljenost je 131 m. Zaradi velikih horizontalnih reakcij sta oba opornika sidrana v temeljna tla s skupno 74 geotehničnimi sidri. Prvi del geotehničnih sider je bil napet po izgradnji opornikov, drugi del pa po napenjanju nosilnih kablov prekladne konstrukcije brvi.

Tudi napenjanje kablov prekladne konstrukcije je potekalo v dveh fazah. Med opornikoma so se v prvi fazi napeli štiri nosilni kabli, sestavljeni iz 47 vrvi preseka 150 mm² (vsak s silo 6600 kN), ki so služili za montažo 46 prefabriciranih elementov, ki predstavljajo armiranobetonski del prereza prekladne konstrukcije. Širina segmentov je 4,0 m, njihova debelina pa se v

prečni smeri spreminja od 42 cm na robu do 18 cm v srednjem delu. Prečni prerez konstrukcije sestavljata še dva kablja za prednapenjanje iz 55 vrvi preseka 150 mm², ki sta bila po montaži prefabriciranih segmentov položena v njihove vzdolžne



Slika 2. Prečni prerez obravnavane brvi v Irči vasi [Weingerl, 2023]

kanale. Ti so bili skupaj s prečnimi utori med segmenti in krajnima monolitnima ploščama naknadno zabetonirani. Za tem je sledilo napenjanje kablov druge faze (kablov za prednapenjanje), ki so se napeli na silo 8500 kN, s čimer so se v betonski prerez vnesle tlačne napetosti za zagotovitev dodatne togosti konstrukcije. Kabelske vrvi so kvalitete Y 1860 S7-16,0-A z nizko stopnjo relaksacije in so v zaščitnih HDPE-ceveh, ki so bile po končani gradnji zainjektirane, s čimer je zagotovljena tudi visoka antikorozijska zaščita jeklenih vrvi in s tem povezana dolgoročna nosilnost ter trajnost objekta. Montažni betonski elementi so izdelani iz betona kvalitete C45/55, monolitni del prekladne plošče pa iz betona C50/60. Zasnova obravnavane brvi kot tudi tehnološki postopki njene gradnje so podrobneje predstavljeni v [Weingerl, 2023] in [Likar, 2023].

V zadnji fazi je sledila finalizacija objekta, v sklopu katere sta se izvedla epoksidni premaz pohodne površine ter obojestranska namestitve ograj [Likar, 2023]. Po končani gradnji je bila opravljena tudi obremenilna preizkušnja, ki je obsegala testiranje na statično in dinamično obtežbo [Štrukelj, 2023].

3 STATIČNA ANALIZA

Za namene lastnih računskih analiz smo v programskem okolju SOFISTIK 2024 [SOFISTIK AG, 2024] izdelali prostorski računski model obravnavane brvi. Računski model je vključeval prekladno konstrukcijo med krajnima opornikoma s svetlim razponom 120,6 m, podprto s sistemom linearnih vzmeti, ki je nadomeščal masivno sidrano podporno konstrukcijo. Togost posameznih vzmeti je bila določena na podlagi izmerjenih pomikov in zasukov krajnih opornikov med napenjanjem kablov prve faze ter obremenilno preizkušnjo.

Na izdelanem prostorskem računskem modelu smo najprej izvedli statično analizo z upoštevanjem vseh relevantnih vplivov. Na ta način smo določili »končno« napetostno-deformacijsko stanje konstrukcije, ki je predstavljalo vhodni podatek za nadaljnje dinamične analize. Na napetosti in deformacije v natezних trakovih ključno vplivajo veliki povesi prekladne konstrukcije ter faznost gradnje, zato smo uporabili geometrijsko

nelinearno analizo, ki je zajemala enajst gradbenih faz ob upoštevanju časovno odvisnih deformacij zaradi lezenja in krčenja betona ter relaksacije kablov.

Ustreznost izdelanega statičnega računskega modela smo ovrednotili s primerjavo izračunanih in izmerjenih povosov izvedene konstrukcije na sredini njenega razpona v posameznih gradbenih fazah. Kot je prikazano v preglednici 1, so odstopanja med izračunanimi in izmerjenimi povosi majhna in v mejah inženirske sprejemljivosti. Ker je ujemanje še posebej dobro v končni fazi (dograjena konstrukcija z izvršenimi reološkimi vplivi), lahko zaključimo, da je statični računski model konstrukcije ustrezno zasnovan.

4 DINAMIČNE ANALIZE

Tematiki vibracij brvi zaradi dinamične obtežbe pešcev je v sistemu veljavnih standardov Evrokod namenjena bistveno premajhna pozornost. Z namenom usklajevanja in razvoja Evrokodov je Joint Research Centre (JRC) [Heinemeyer, 2009] pripravil tehnično poročilo (v nadaljevanju JRC-smernica), ki temelji na rezultatih dveh evropskih raziskovalnih projektov. Smernica podaja postopek, ki ga je mogoče uporabiti pri projektiranju lahkih brvi na dinamične obtežbe pešcev. Omenjenemu postopku, ki je predstavljen v nadaljevanju, smo sledili tudi pri izvedbi dinamičnih analiz obravnavanega nateznega traku.

4.1 Analiza lastnega nihanja

Z analizo lastnega nihanja smo določili lastne frekvence f_i in pripadajoče efektivne mase nateznega traku v stanju takoj po izgradnji (faza št. 4080 – namestitev nenosilnih elementov). Kot prikazujemo v preglednici 2, smo lastne frekvence računskega modela primerjali z izmerjenimi lastnimi frekvencami izvedene konstrukcije, ki so bile identificirane med obremenilno preizkušnjo. Izkaže se, da je ujemanje lastnih frekvenc izjemno dobro, pri čemer znaša največje odstopanje le nekaj več kot 2 %. Izdelani računski model je, poleg ustreznega statičnega odziva, izkazoval tudi ustrezen dinamični odziv, zato smo ga ocenili kot primernega za nadaljnje računske analize.

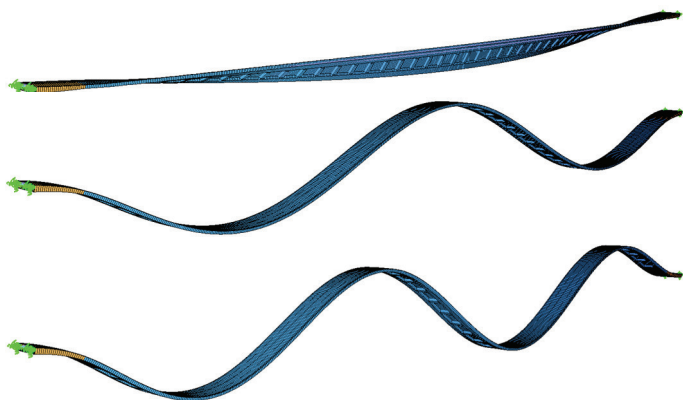
Št. faze	Opis faze	Računski model [cm]	Izmerjeno [cm]	Odstopanje [%]
4011	Namestitev in napenjanje nosilnih kablov prve faze	16,7	16,8	0,6
4030	Montaža prefabriciranih betonskih segmentov	142	152	6,6
4050	Monolitizacija prekladne konstrukcije	214	208	2,9
4071	Prednapetje druge faze	185	175	5,7
4075	Lezenje in krčenje do namestitve nenosilnih elementov	175	-	-
4080	Namestitev nenosilnih elementov	178	177	0,6
4090	Obremenilna preizkušnja	190	190	0,0
4099	Lezenje in krčenje do $t = \infty$	169	170 (ocena)	0,6

Preglednica 1. Primerjava povosov na sredini razpona nateznega traku po posameznih fazah gradnje; računski model in meritve na izvedeni konstrukciji [Weingerl, 2023]

i	Identificirane f_i [Hz]	Izračunane f_i [Hz]	Odstopanje [%]
1	0,659	0,658	0,2
2	0,977	0,964	1,3
3	-	1,189	-
4	1,489	1,490	0,0
5	1,880	1,842	2,0
6	-	2,044	-
7	2,686	2,656	1,1
8	-	3,008	-
9	3,369	3,323	1,4
10	-	3,658	-
11	4,126	4,054	1,7
12	-	4,850	-
13	5,078	4,960	2,3
14	5,835	5,714	2,1
15	-	6,245	-
16	-	6,648	-
17	6,787	6,710	1,1
18	7,837	7,654	2,3

Preglednica 2. Primerjava lastnih frekvenc izdelanega računskega modela in izmerjenih lastnih frekvenc na izvedeni konstrukciji [Štrukelj, 2023]

V povezavi z lastnimi frekvencami brvi dodajamo, da JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] navaja kritična območja lastnih frekvenc, ki so dovzetna za vzbujanje z dinamično obtežbo, ki jo povzroča tok pešcev. Kritične lastne frekvence za vzbujanje v vertikalni in vzdolžni smeri so v območju med 1,25 in 2,3 Hz, v prečni smeri pa med 0,5 in 1,2 Hz. Za vse nihajne oblike brvi z lastnimi frekvencami znotraj navedenih kritičnih območij je treba izvesti kontrolo pospeškov brvi. V našem primeru so to 3. prečna ter 4. in 6. vertikalna nihajna oblika.



Slika 3. Analiza lastnega nihanja obravnavanega nateznega traku: 3. 4. in 6. nihajna oblika

4.2 Dušenje

Dušenje je mogoče razumeti oz. predstaviti kot disipacijo energije znotraj konstrukcije, ki jo povzročata lastno dušenje konstrukcijskih materialov ter nekonstrukcijskih elementov brvi, kot so oprema, ograje in obloge. Zaradi soobstoja različnih mehanizmov disipacije energije je dušenje izjemno kompleksen pojav, ki ga je mogoče natančno opredeliti le na osnovi meritev, opravljenih, ko je brv že v celoti zgrajena [Heinemeyer, 2009]. Zaradi navedenega je bilo na brvi v Irči vasi med obremenilno preizkušnjo identificirano tudi dušenje. Iz meritev 4. nihajne oblike so ocenili, da znaša delež kritičnega dušenja ξ od 1,6 % do 2,2 % [Štrukelj, 2023]. Na podlagi navedenega podatka smo v opravljenih računskih analizah za delež kritičnega dušenja privzeli vrednost 2,0 % in sicer za vse nihajne oblike. Pri tem smo uporabili t. i. Rayleighov model dušenja [Chopra, 2020].

4.3 Določitev maksimalnega pospeška

Ob redni uporabi so brvi podvržene sočasnemu delovanju obtežb več pešcev, pri čemer to delovanje ni le seštevek dejanj posameznikov, saj je obtežba pešcev naključna. Maksimalni pospešek konstrukcije, ki ga povzroči tok naključnih pešcev različnih gostot, je mogoče, skladno s smernico [Heinemeyer, 2009], izračunati na dva načina, in sicer s spektralno metodo ali s časovno odvisno analizo ob upoštevanju harmoničnega obtežnega modela. V obsegu opravljenih računskih dinamičnih analiz smo upoštevali oba navedena načina. JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] razvršča gostote tokov pešcev v pet prometnih razredov, ki so predstavljeni v preglednici 3.

Prometni razred	Gostota d [P/m ²] (P – pešec)	Opis	Značilnosti
TC1	15/(BL)	Zelo redke promet	Skupina 15 pešcev (B – širina, L – dolžina prekladne konstrukcije)
TC2	0,2	Redke promet	Prosta in udobna hoja, prehitevanje je možno, posamezni pešči lahko prosto izbirajo hitrost hoje.
TC3	0,5	Gost promet	Še vedno neovirana hoja, prehitevanje je lahko občasno onemogočeno.
TC4	1,0	Zelo gost promet	Svoboda gibanja je omejena, hoja je ovirana, prehitevanje ni več možno.
TC5	1,5	Izjemno gost promet	Neprijetna hoja, nastajanje gneče, nihče od pešcev ne more več prosto izbirati hitrosti.

Preglednica 3. Prometni razredi in pripadajoče gostote tokov pešcev [Heinemeyer, 2009]

Poleg maksimalnega pospeška, ki ga povzroči tok naključnih pešcev, smo maksimalni pospešek določili še za skupino štirih popolnoma usklajenih tekačev, kjer smo obtežbo upoštevali kot deterministično. V tem primeru je bila izvedena časovno odvisna analiza s premikajočo se obtežbo skupine tekačev [Bachmann, 1995].

4.3.1 Spektralna metoda za tok pešcev

Spektralna metoda ne zahteva časovno odvisne analize, pač pa zadostuje le izvedba analize lastnega nihanja, s katero določimo vrednosti lastnih frekvenc in efektivnih mas. Z uporabo enačb in konstant, ki so bile izpeljane na podlagi simulacij Monte Carlo [Heinemeyer, 2009], lahko na relativno preprost način izračunamo vrednost maksimalnega pospeška.

Ob upoštevanju prometnega razreda TC3 (gost promet) s pripadajočo gostoto pešcev $d = 0,5 \text{ P/m}^2$ dobimo naslednje maksimalne pospeške za kritične nihajne oblike:

Nihajna oblika i	3	4	6
Lastna frekvenca f_i [Hz]	1,189	1,490	2,044
Smer nihanja	prečna	vertikalna	vertikalna
Efektivna masa m_i [t]	280,6	48,0	74,8
Maksimalni pospešek a_{max} [m/s^2]	0,053	1,591	1,173
Redukcijski koeficient ψ	0,05	0,53	1,00
Reduciran maksimalni pospešek ψa_{max} [m/s^2]	0,0029	0,848	1,173

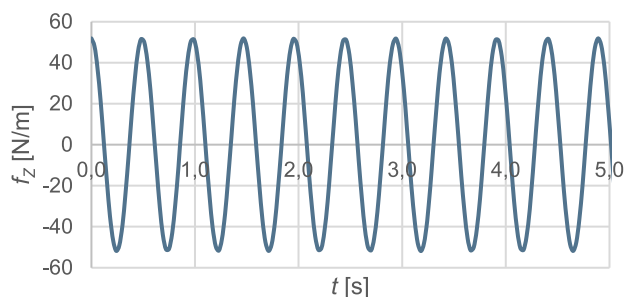
Preglednica 4. Izračun maksimalnega pospeška po spektralni metodi skladno s [Heinemeyer, 2009]

Pri izračunih smo upoštevali tudi redukcijski koeficient ψ , ki upošteva verjetnost, da se frekvenca korakov približa kritičnemu območju obravnavanih lastnih frekvenc ob upoštevanju vzbujanja s prvo harmonično frekvenco obtežbe pešcev.

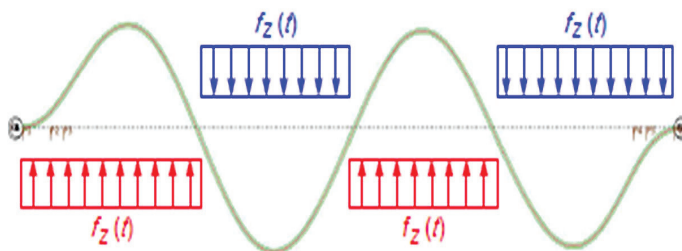
4.3.2 Časovno odvisna analiza s harmoničnim obtežnim modelom za tok pešcev

Za modeliranje toka pešcev, ki ga sestavlja n naključnih pešcev, JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] določa idealiziran tok, ki ga sestavlja n' popolnoma sinhroniziranih pešcev. Ta je določen tako, da povzroči enak učinek na konstrukcijo kot realen tok pešcev, le da ga je mogoče modelirati kot deterministično obtežbo. Pri takšnem obtežnem modelu je harmonična obtežba enakomerno porazdeljena vzdolž brvi in simulira enako število pešcev na fiksni lokaciji. V odvisnosti od gostote toka pešcev je treba izbrati enega od dveh obtežnih modelov, in sicer za tokove z manjšo gostoto ($d < 1,0 \text{ P/m}^2$) in gostejše tokove ($d \geq 1,0 \text{ P/m}^2$).

Harmonični model predpostavlja, da je frekvenca korakov idealiziranega toka pešcev enaka obravnavani lastni frekvenci brvi. Primer obtežne funkcije za 6. nihajno obliko in ob upoštevanju prometnega razreda TC3 ($d = 0,5 \text{ P/m}^2$) je prikazan na sliki 4. Enakomerno porazdeljeno harmonično obtežbo je treba aplicirati na računski model skladno z obravnavano nihajno obliko, kot prikazujemo na sliki 5.



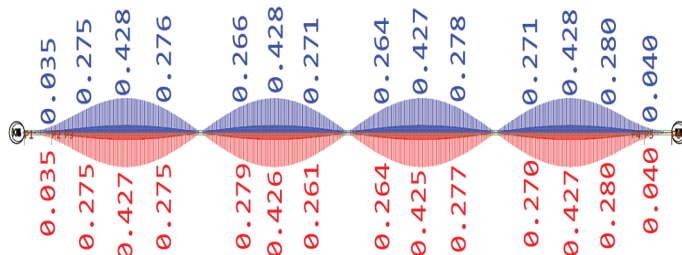
Slika 4. Harmonična obtežna funkcija vzbujanja v vertikalni smeri za 6. nihajno obliko



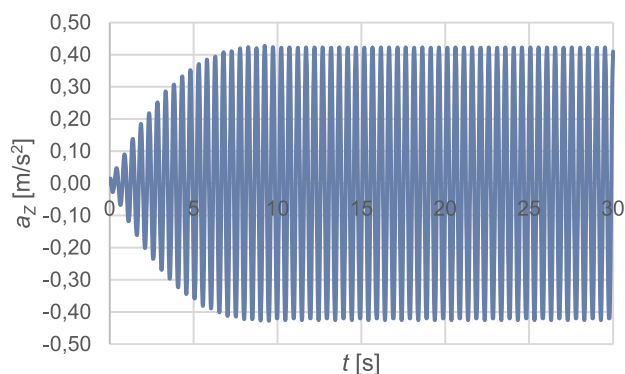
Slika 5. Delovanje vertikalne harmonične obtežbe za 6. nihajno obliko

V izvedenih dinamičnih analizah je časovni korak znašal $\Delta t = 0,03 \text{ s}$. Konstrukcijo smo s harmonično obtežbo vzbujali 30 s, za kar je bilo potrebnih 1000 časovnih korakov. Za reševanje enačbe gibanja smo uporabili implicitno Hilber-Hughes-Taylorjevo metodo (HHT- α) [Hilber, 1977], kot je implementirana v programskem paketu SOFISTIK z vrednostjo parametra $\alpha = -0,3$, ki povzroča dobro dušenje v visokofrekvenčnih območjih [Hilber, 1977].

Rezultat časovno odvisnih analiz predstavljajo časovno odvisni pospeški konstrukcije. Na sliki 6 je prikazana ovojnica pospeškov pri vzbujanju 6. nihajne oblike. Za točko na osmini razpona, v kateri se pojavi največji pospešek, je na sliki 7 prikazan še časovni razvoj pospeškov.



Slika 6. Ovojnica vertikalnih pospeškov za 6. nihajno obliko



Slika 7. Vertikalni pospešek točke na osmini razpona za 6. nihajno obliko v odvisnosti od časa

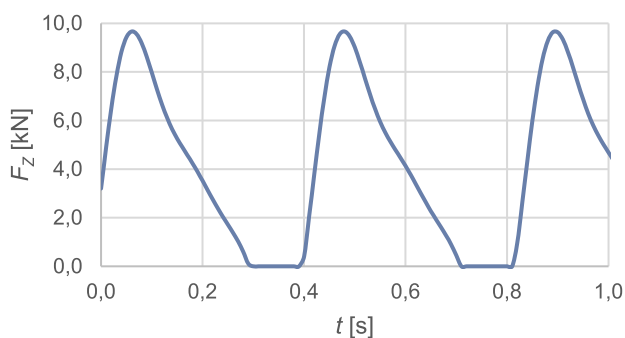
Rezultati maksimalnih pospeškov vseh obravnavanih nihajnih oblik, dobljenih s časovno odvisno analizo, so naslednji:

- 3. nihajna oblika; $a_{max} = 0,0027 \text{ m/s}^2$
- 4. nihajna oblika; $a_{max} = 0,271 \text{ m/s}^2$
- 6. nihajna oblika; $a_{max} = 0,428 \text{ m/s}^2$

Maksimalni vertikalni pospeški 4. in 6. nihajne oblike, ki so določeni s časovno odvisno analizo, so bistveno manjši kot tisti, ki so določeni s spektralno metodo. Pri tem je treba omeniti tudi, da je bila slednja razvita na modelih mostov s statičnim sistemom nosilca. JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] tudi opozarja, da je v primerih, ko se statični sistem obravnavane brvi bistveno razlikuje od sistema nosilca, treba razmisliti o uporabnosti te metode. Kot se očitno izkaže, daje spektralna metoda pri brveh z nosilnim sistemom nateznega traku konservativne rezultate. Glede na izračunane številčne vrednosti so ti zagotovo na varni strani, zavedati pa se je treba, da lahko uporaba konservativnih postopkov privede do neracionalne konstrukcijske zasnove tovrstnih brvi.

4.3.3 Časovno odvisna analiza s premikajočo se obtežbo skupine tekačev

Dinamične sile tekačev je mogoče opisati kot funkcijo časa in prostora, ki se periodično ponavljajo v enakomernih časovnih intervalih. Vsako periodično vzbujaje, kakršna je tudi sila zaradi ritmičnega gibanja človeškega telesa, lahko matematično zapišemo s Fourierjevo vrsto [Bachmann, 1995].



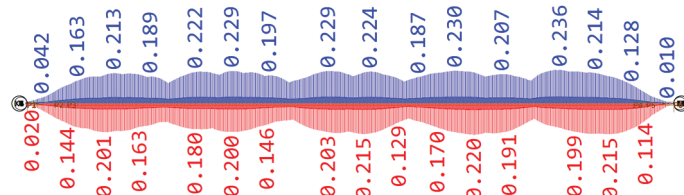
Slika 8. Obtežna funkcija – časovni potek vertikalne komponente obtežbe skupine štirih tekačev

Fourierjeve koeficiente oz. dinamične faktorje obtežbe so z eksperimentalnimi raziskavami za različne vrste aktivnosti izmerili različni avtorji. V našem primeru smo pri določitvi obtežne funkcije tekačev upoštevali Bachmannove koeficiente za tek [Bachmann, 1995].

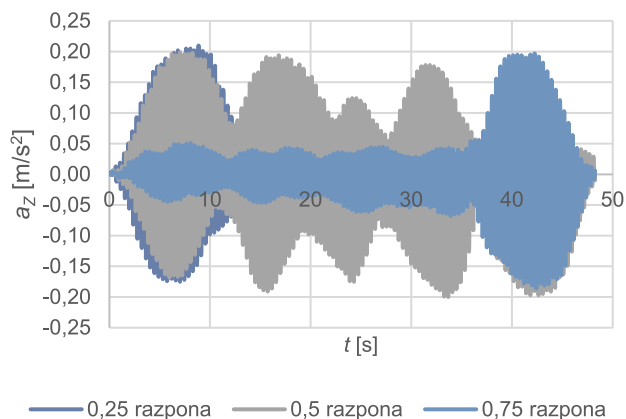
Obravnavali smo skupino štirih tekačev, ki so med seboj popolnoma usklajeni. Ti tečejo s frekvenco korakov $f_s = 2,4 \text{ Hz}$ ter se vzdolž brvi premikajo s hitrostjo $v_s = 2,5 \text{ m/s}$. Na ta način obtežbe nismo obravnavali kot naključne kot v predhodnih primerih, temveč kot povsem deterministično. Uporabljeno obtežno funkcijo prikazuje slika 8.

Časovno odvisna nelinearna dinamična analiza s časovnim korakom $\Delta t = 0,03 \text{ s}$ je trajala skupaj 48,24 s, in sicer vse dokler obtežba ni prepotovala celotne dolžine brvi. Za to je bilo potrebnih kar 1608 časovnih korakov. Za reševanje enačbe gibanja smo ponovno uporabili metodo HHT- α z vrednostjo parametra numeričnega dušenja $\alpha = -0,3$.

Slika 9 prikazuje ovojnico vertikalnih pospeškov med računsko analizo prehoda štirih tekačev preko brvi. Za točke, ki so na četrtini, polovici in treh četrtinah razpona, so na sliki 10 prikazani še vertikalni pospeški v odvisnosti od časa. Največji izračunani vertikalni pospešek pri prehodu štirih medsebojno usklajenih tekačev preko brvi je znašal $0,236 \text{ m/s}^2$.



Slika 9. Ovojnica vertikalnih pospeškov zaradi skupine tekačev



Slika 10. Vertikalni pospeški treh točk prekladne konstrukcije brvi zaradi skupine tekačev

4.4 Kontrola razredov udobja

JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] podaja štiri razrede udobja uporabnikov brvi ter z njimi povezane mejne vrednosti maksimalnih vertikalnih in prečnih pospeškov.

Razred udobja	Stopnja udobja	Vertikalni pospešek a_{limit} [m/s ²]	Prečni pospešek a_{limit} [m/s ²]
CL1	Maksimalna	< 0,50	< 0,10
CL2	Srednja	0,50-1,00	0,10-0,30
CL3	Minimalna	1,00-2,50	0,30-0,80
CL4	Nesprejemljiva	> 2,50	> 0,80

Preglednica 5. Razredi udobja s pripadajočimi območji mejnih pospeškov [Heinemeyer, 2009]

Obravnavana brv v Irči vasi pri toku pešcev z gostoto 0,5 P/m² z uporabo spektralne metode zadosti tretjemu razredu udobja, medtem ko izračun s časovno odvisno analizo konstrukcijo uvrsti v prvi razred. Tudi pri teku skupine tekačev preko brvi ta izpolnjuje najvišji (prvi) razred udobja.

Metoda	Nihajna oblika	a_{max} [m/s ²]	Razred udobja
Spektralna metoda (tok pešcev)	3	0,0029	CL1
	4	0,848	CL2
	6	1,173	CL3
Časovno odvisna analiza (tok pešcev)	3	0,0027	CL1
	4	0,271	CL1
	6	0,428	CL1
Časovno odvisna analiza (skupina tekačev)	/	0,236	CL1

Preglednica 6. Izračunani maksimalni pospeški in pripadajoči razredi udobja uporabnikov brvi

5 REZULTATI PARAMETRIČNIH ŠTUDIJ

Da bi ugotovili, kako sprememba temperature in dušenje vplivata na vibracije brvi v Irči vasi, ki jih povzročajo pešci in tekači, je bila izvedena serija 377 dinamičnih analiz na način, kot je predhodno predstavljen v 4. poglavju. Pri tem smo spreminjali naslednja dva parametra: (i) enakomerno temperaturno spremembo ΔT v prečnem prerezu nateznega traku in (ii) delež kritičnega dušenja ξ . Zaradi relativno nizke upogibne togosti prečnih prerezov nateznih trakov v primerjavi z njihovo osno togostjo smo vpliv neenakomerne temperaturne spremembe zanemarili. Dinamični odziv brvi smo ugotavljali za končno obratovalno stanje brvi po izvršenih vseh dolgotrajnih reoloških spremembah (faza št. 4099 – Lezenje in krčenje do $t = \infty$).

Pri analizi tokov pešcev smo upoštevali vse prometne razrede (TC1-TC5) skladno z JRC-smernico [Heinemeyer, 2009] in ustrezní obtežni model glede na gostoto tokov. Pri analizi skupine tekačev smo upoštevali tri različne frekvence teka, in sicer 2,2 Hz, 2,3 Hz in 2,4 Hz s pripadajočimi hitrostmi teka, ki so znašale 2,2 m/s, 2,4 m/s in 2,5 m/s.

5.1 Parametrična študija vpliva temperature na vibracije brvi

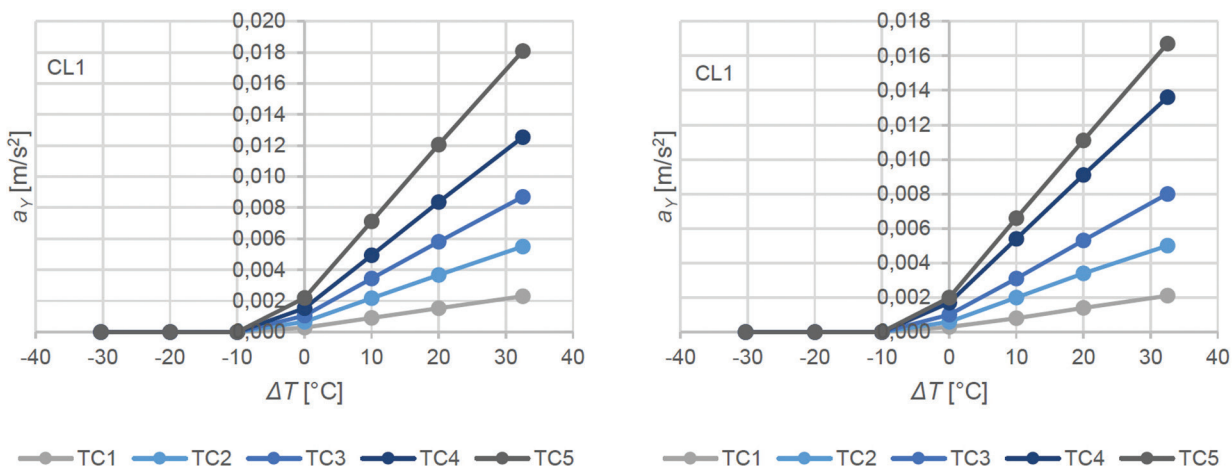
Vrednosti parametra enakomerne temperaturne spremembe ΔT smo določili na podlagi najvišje in najnižje temperature, ki jo lahko konkretno obravnavana konstrukcija doživi v svoji uporabni dobi [SIST EN 1991-1-5:2004, 2004], [SIST EN 1991-1-5:2004/A101:2009, 2009], ter za vse vmesne vrednosti temperatur konstrukcije z intervalom 10 °C. Enakomerne temperaturne spremembe so določene glede na izhodiščno temperaturo zraka v času betoniranja monolitnih delov prekladne konstrukcije v Irči vasi, ki je znašala 10 °C [ARSO, 2024].

Temperatura konstrukcije T [°C]	Temperaturna sprememba ΔT [°C]
-20,3	-30,3
-10,0	-20,0
0,0	-10,0
10,0	0,0
20,0	10,0
30,0	20,0
42,5	32,5

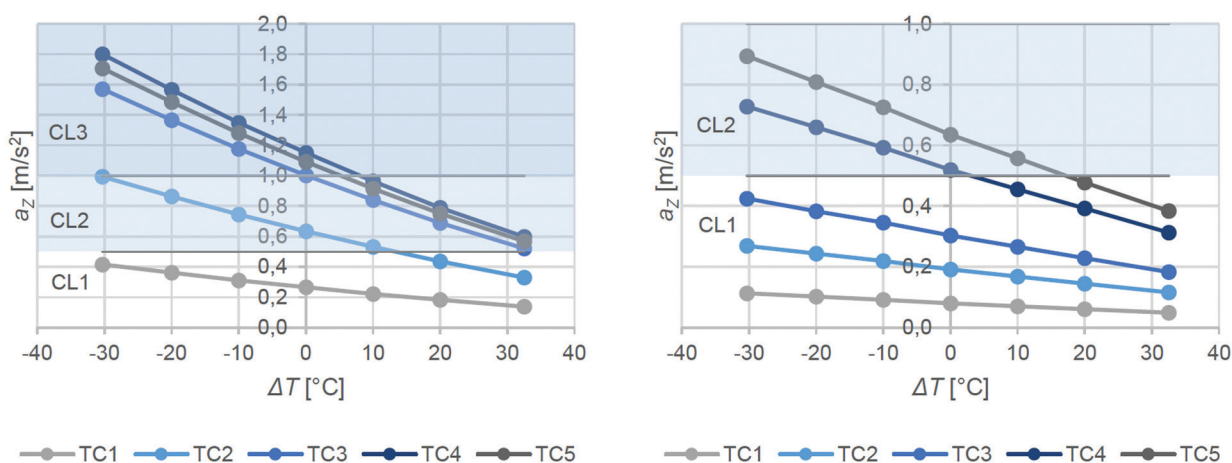
Preglednica 7. Obravnavane temperature konstrukcije s pripadajočimi enakomernimi temperaturnimi spremembami ΔT

Rezultati analiz, predstavljeni na slikah 11, 12 in 13, kažejo, da temperaturne spremembe pomembno vplivajo na spreminjanje togosti konstrukcije, kar se odraža tudi v spremembah lastnih frekvenc in pospeškov brvi. V odvisnosti od vrednosti temperaturnih sprememb ΔT lahko brv uvrstimo v različne razrede udobja (CL1-CL3). Mogoče je celo, da pri določenih temperaturnih spremembah ΔT lastne frekvence niso več v kritičnih območjih in tako za konstrukcijo nateznega traku v takšnih temperaturnih pogojih kontrola vibracij ni več potrebna. V nadaljevanju podajamo rezultate vpliva temperaturnih sprememb ΔT na pospeške brvi zaradi tokov pešcev.

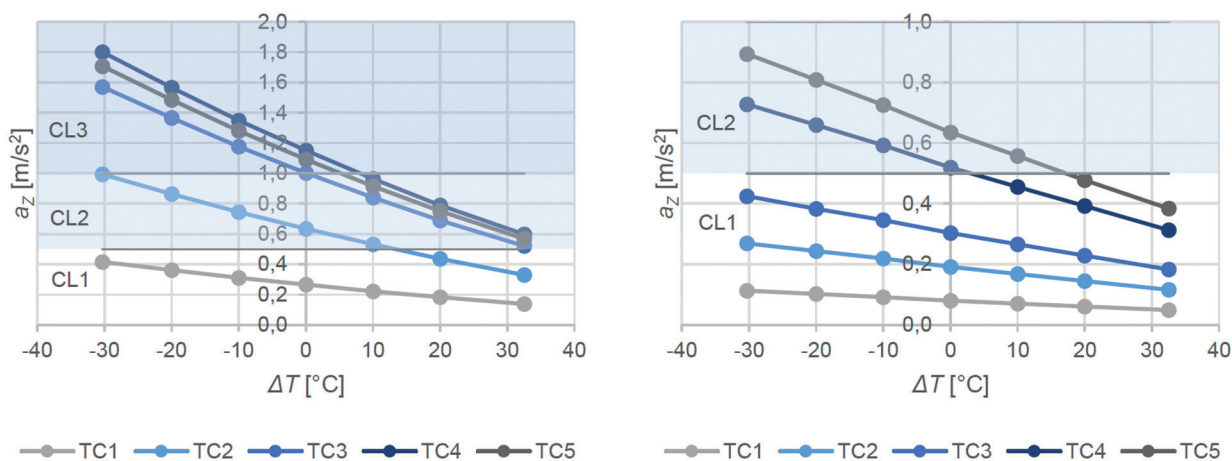
Kot je prikazano na sliki 11, se pri 3. nihajni obliki prečni pospeški zaradi toka pešcev ob segrevanju nateznega traku približno linearno povečujejo, pri ohlajanju pa privzamemo njihovo vrednost enako nič, saj izračunane lastne frekvence padejo izven kritičnega območja lastnih frekvenc. Ker so lastne frekvence 3. prečne nihajne oblike na samem robu kritičnega območja (0,5-1,2 Hz), so posledično izračunane vrednosti prečnih pospeškov zelo nizke. Višje vrednosti dosegajo vertikalni pospeški brvi. Ugotavljamo, da se pri 4. nihajni obliki z ohlajanjem vertikalni pospeški povečujejo (glej sliko 12), pri 6. nihajni obliki pa velja ravno obratna zakonitost, saj se vertikalni pospeški z ohlajanjem zmanjšujejo (glej sliko 13). Pri 6. nihajni obliki pozitivne temperaturne spremembe nimajo bistvenega vpliva na pospeške, saj so lastne frekvence segrete brvi v najbolj kritičnem območju, kjer je vrednost redukcijskega koeficienta ψ enaka 1.



Slika 11. Prečni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 3. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



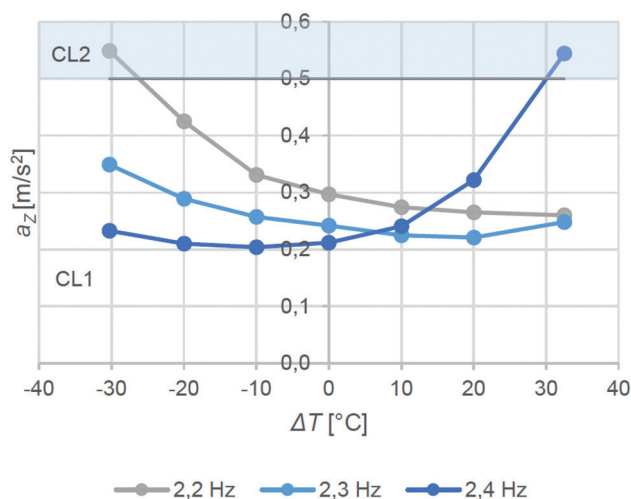
Slika 12. Vertikalni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 4. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



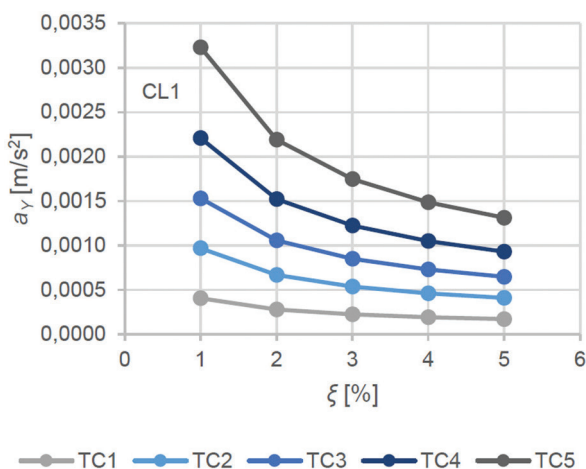
Slika 13. Vertikalni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 6. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)

Iz rezultatov analiz lahko opazimo tudi druge pomembne ugotovitve, kot sta spreminjanje pospeškov v odvisnosti od gostote toka pešcev oz. prometnega razreda ter razlika med uporabljenima metodama. Pri časovno odvisni analizi se pospeški povečujejo z naraščanjem prometnega razreda, medtem ko pri spektralni metodi opazimo, da so vertikalni pospeški zaradi TC4 večji od pospeškov zaradi TC5 (glej sliki 12.a in 13.a). Čeprav smernica [Heinemeyer, 2009] tega jasno ne izpostavlja, spektralna metoda očitno upošteva, da se ob večji gostoti pešcev dinamična obtežba zaradi ovirane hoje zmanjša, kar povzroči manjše vibracije. Uporabljeni metodi izkazujejo tudi razlike v velikosti vertikalnih pospeškov, kjer spektralna metoda daje bistveno višje vrednosti. Pri slednji ima sprememba temperature tudi večji vpliv na udobje uporabnikov (glej sliki 12.a in 13.a), saj se lahko z uporabo spektralne metode razred udobja brvi spremeni tudi za dva razreda, s časovno odvisno analizo pa za največ enega (glej sliki 12.b in 13.b).

Slika 14 prikazuje rezultate analize vpliva temperaturnih sprememb na vertikalne vibracije brvi, ki jih povzročata skupina



Slika 14. Vertikalni pospeški konstrukcije zaradi skupine tekačev v odvisnosti od temperaturnih sprememb

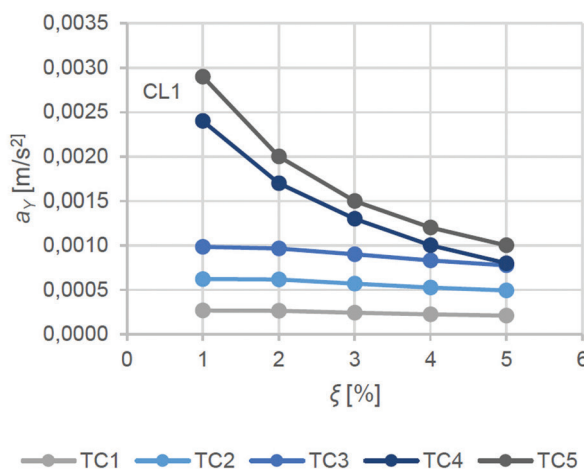


tekačev, kjer se je izkazalo, da je spreminjanje pospeškov odvisno od frekvence teka, ki se s spreminjanjem temperature približuje ali oddaljuje 6. in 7. lastni frekvenci brvi. Vpliv enakomerne temperaturne spremembe na udobje tekačev je precej majhen, saj smo izven prvega razreda udobja pri zgolj dveh ekstremnih vrednostih temperaturnih sprememb.

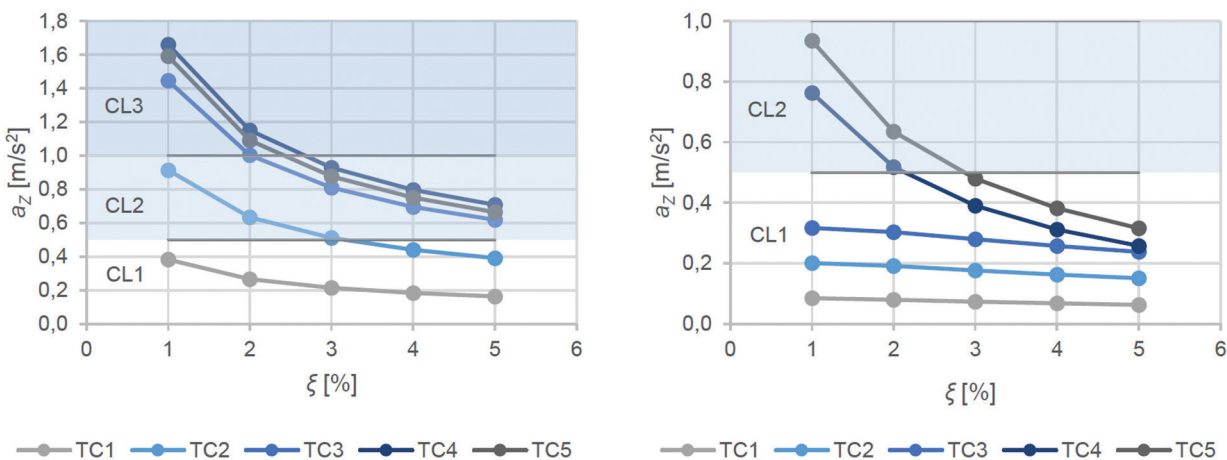
5.2 Parametrična študija vpliva dušenja na vibracije brvi

JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] podaja povprečne vrednosti deleža kritičnega dušenja za stanja uporabe (»for serviceability conditions«), ki znaša za konstrukcije nateznega traku 1 %. Po [SIST EN 1998-1:2004, 2004] se za gradbene konstrukcije običajno privzame vrednost deleža kritičnega dušenja 5 %. Dinamične analize smo zato izvedli z upoštevanjem deleža kritičnega dušenja 1 % in 5 % ter z vsemi vmesnimi vrednostmi z intervalom 1 %. Pri tem konstrukcija ni bila izpostavljena prej obravnavanim temperaturnim spremembam. Na slikah 15, 16 in 17 predstavljamo rezultate vpliva dušenja na pospeške brvi zaradi tokov pešcev.

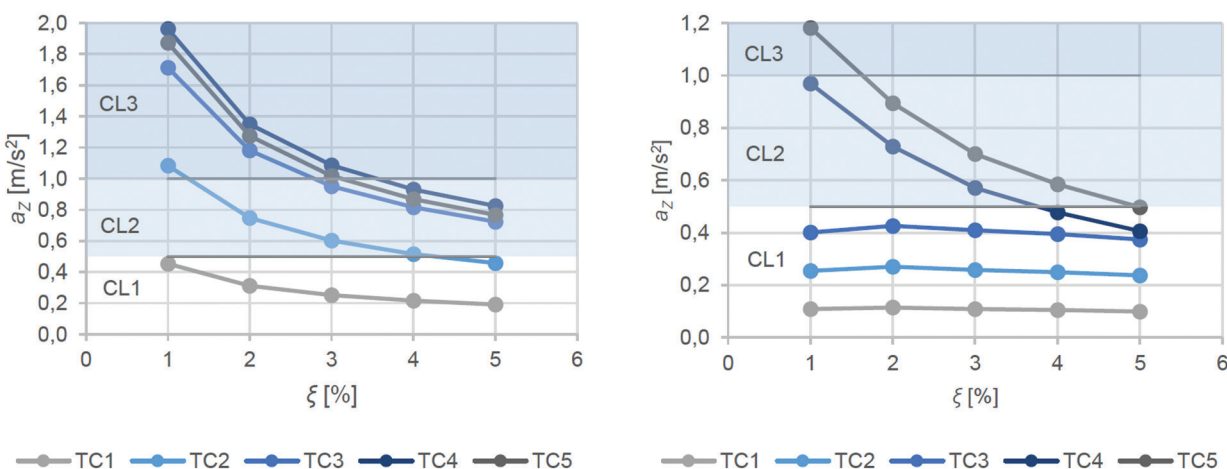
V večini primerov se z naraščanjem deleža kritičnega dušenja tako prečni kot vertikalni pospeški nateznega traku zmanjšujejo. Izstopajo krivulje pospeškov, povzročenih s harmoničnim obtežnim modelom za tokove pešcev nižjih gostot (TC1-TC3), ki izkazujejo zelo majhne spremembe zaradi upoštevanja različnih deležev kritičnega dušenja (glej slike 15.b, 16.b, 17.b). Razlog je v določitvi velikosti amplitude harmonične obtežbe pešcev nižjih gostot, saj je ta odvisna tudi od deleža kritičnega dušenja, zato se z zmanjševanjem dušenja zmanjšuje tudi obtežba, ki povzroči zmanjšan odziv. Ta fenomen v smernici [Heinemeyer, 2009] ni neposredno pojasnjen, razen tega, da so bile enačbe ugotovljene na podlagi simulacij. Z uporabo spektralne metode se lahko udobje pešcev, zaradi upoštevanja različnega deleža kritičnega dušenja, spremeni tudi za do dva razreda, s harmoničnim obtežnim modelom za gostejše tokove pešcev pa za največ enega. Pri harmoničnem obtežnem modelu za tokove pešcev z nižjo gostoto sprememba dušenja na udobje pešcev ne vpliva.



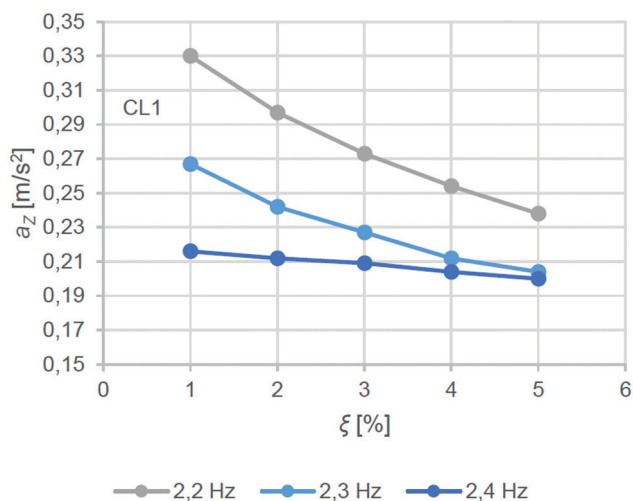
Slika 15. Prečni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 3. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 16. Vertikalni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 4. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 17. Vertikalni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 6. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 18. Vertikalni pospeški zaradi skupine tekačev v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja

Slika 18 prikazuje rezultate vzbujanja brvi z obtežbo tekačev, kjer se z višanjem deleža kritičnega dušenja vertikalni pospeški zmanjšujejo, pri čemer je to najizrazitejše pri frekvenci teka, ki je najbližja lastni frekvenci brvi. Iz navedenega lahko povzamemo, da se občutljivost vibracij brvi na spremembo deleža kritičnega dušenja povečuje s približevanjem frekvence vzbujanja lastnim frekvencam brvi. Razred udobja tekačev se kljub spremembi dušenja ne spreminja.

6 SKLEP

V prispevku smo predstavili analize vpliva temperaturnih sprememb in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku. Pri tem smo obravnavali konkretno mostno konstrukcijo, ki je zgrajena preko reke Krke v Irči vasi.

Raziskave so pokazale, da lahko temperaturne spremembe in dušenje pomembno vplivajo na vibracije in udobje uporabnikov brvi v Irči vasi. Ugotavljamo tudi, da na računski dinamični odziv nateznega traku v veliki meri vplivajo tudi uporabljeni

obtežni modeli ter metode dinamičnih izračunov. Spektralna metoda, ki bi jo sicer lahko uvrstili med enostavnejše metode za dinamične analize mostov za pešce, se je zaradi svoje konservativnosti izkazala kot manj primerna v primerjavi z zahtevnejšo, časovno odvisno analizo.

Temperaturne spremembe pomembno vplivajo na togost konstrukcije in posledično na lastne frekvence brvi, kar se neposredno odraža v spremembah prečnih in vertikalnih pospeškov nateznega traku. Spremembe lastnih frekvenc so lahko tudi tolikšne, da se uvrstijo v kritična območja lastnih frekvenc, zaradi česar je treba izvesti dodatne računske dokaze udobja uporabnikov brvi. Pri ugotavljanju vpliva temperature na udobje uporabnikov velja tudi poudariti, da je največje spremembe razredov udobja uporabnikov mogoče zaznati pri ekstremnih temperaturnih spremembah, pri katerih pa ni realno pričakovati, da bi bila brv dejansko v uporabi. Zaradi navedenega je mogoče oceniti vpliv ekstremnih temperaturnih sprememb na udobje uporabnikov kot precej zanemarljiv.

Vpliv dušenja na vibracije brvi je v splošnem tak, da z njegovim naraščanjem pospeški padajo, pri čemer je ta vpliv izrazitejši pri gostejših tokovih pešcev in pri obtežbi s tekači, ki konstrukcijo vzbujajo s frekvenco, podobno lastnim frekvencam brvi. Prav tako ima dušenje večji vpliv na udobje uporabnikov pri gostejših tokovih, medtem ko na udobje tekačev ne vpliva bistveno.

Na podlagi rezultatov izvedenih analiz lahko zaključimo, da sta temperatura in dušenje ključna parametra pri oceni vibracij in udobja uporabnikov brvi z nosilnim sistemom nateznega traku. Pri načrtovanju tovrstnih konstrukcij je zato smiselno kontrolno vibracij in razredov udobja izvesti za različne pričakovane temperaturne pogoje. Ker je velikost dušenja konstrukcije težko zanesljivo določiti vnaprej, je priporočljivo kontrole izvesti tudi ob upoštevanju različnih deležev kritičnega dušenja, ki jih je smiselno kasneje preveriti z meritvami na izvedeni konstrukciji.

7 LITERATURA

Agencija Republike Slovenije za okolje, Arhiv – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji, <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 2024.

Bachmann, H., J. Ammann, W., Delschl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., H. Hirsch, G., K. Klein, G., J. Lande, G., Mahrenholtz, O., G. Natke, H., Nussbaumer, H., J. Prftlove, A., H. Rainer, J., Saemann, E. U., Stfinbelsser, L., *Vibration Problems in Structures. Practical guidelines*, Birkhäuser Verlag, 1995. DOI: 10.1007/978-3-0348-9231-5

Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 5th ed., Pearson, 2020.

Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., Lukić, M., Chabrolin, B., Lemaire, A., Martin, P. O., Cunha, Á., Caetano, E., *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2009. DOI: 10.2788/33846

Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., & Taylor, R. L., Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 5(3), 283-292, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290050306>, 1977.

Inženirski biro Ponting, Most za pešce in kolesarje Irča vas, <https://www.ponting.si/si/projekti/most-za-pesce-in-kolesarje-irca-vas-92.html>, 2025.

Kogovšek, E., *Analiza toplotnih vplivov okolja na mostove grajene po tehnologiji nateznih trakov*. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2024.

Likar, I., Malnar, D., Maraž, M., *Izvedba brvi za kolesarje in pešce čez Krko v Irči vasi*. Zbornik 44. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, Bled, 26.-27. oktober 2023, str. 61-72, 2023.

SIST EN 1991-1-5:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi, Evropski komite za standardizacijo, 2004.

SIST EN 1991-1-5:2004/A101:2009. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi – Nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, Evropski komite za standardizacijo, 2005.

SOFISTIK AG. (2024). SOFISTIK – Analysis and design software for structural engineering (Version 2024).

Stopar, M., *Vpliv temperature in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku zaradi dinamične obtežbe pešcev*. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2025.

Strasky, J., *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. Second edition, ICE Publishing, 2011.

Štrukelj, A., Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Poročilo o obremenilni preizkušnji brvi za pešce in kolesarje – Irča vas, Poročilo, CGP d. d., N-NN 22.00744, 2023.

Weingerl, T., Pipenbaher, M., Gotovčević, T., Filipič, A., *Prvi most, grajen po tehnologiji nateznega traku v Sloveniji*, *Gradbeni vestnik*, 72, september 2023, str. 206-216, 2023.