

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Martin Marton

Autoreferát dizertačnej práce:

Príspevok k systémovej identifikácii stavu mostných konštrukcií

na získanie akademického titulu: philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 31.5.2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladatel':	Ing. Martin Marton
	Katedra stavebnej mechaniky
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Školiteľ:	prof. Ing. Milan Sokol, PhD.
	Katedra stavebnej mechaniky
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Oponenti:	prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
	Ústav stavební mechaniky
	Fakulta stavební, VUT v Brne
	Veveří 331/95, 602 00 Brno
	doc. Ing. Daniel Papán, PhD.
	Katedra stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky
	Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline
	Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
	Doc. Ing. Vladimír Chmelko, PhD.
	ÚAMM, oddelenie pružnosti a pevnosti
	Strojnícka fakulta, STU v Bratislave
	Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:2023

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 23.8.2023 o h na Katedre stavebnej mechaniky (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD. Dekan fakulty

Abstrakt

Dizertačná práca sa zaoberá systémovou identifikáciou stavu mostných konštrukcií s využitím metódy optimalizácie roja častíc (PSO). Cieľom práce je využitie PSO metódy na lokalizáciu a identifikáciu poškodenia mostných konštrukcií. Metóda je implementovaná na základe nameraných dát a optimalizuje model konečných prvkov (MKP model), aby sa identifikovalo poškodenie. V práci sa diskutuje vplyv rôznych parametrov PSO metódy na presnosť identifikácie a lokalizácie poškodenia. Výsledky práce ukazujú, že PSO metóda môže byť účinným nástrojom na identifikáciu poškodenia mostných konštrukcií na základe nameraných dát a MKP modelov. Práca poskytuje nový prístup k identifikácii stavu mostných konštrukcií, ktorý môže mať vysoký potenciál na vylepšenie údržby a bezpečnosti mostných konštrukcií.

Obsah

1	Úvod	3
2	Súčasný stav problematiky	4
3	Numerické aplikácie PSO na identifikáciu poškodenia	5
4	Experimentálne overenie metodiky identifikácie poškodenia	10
5	Experimentálne merania na mostoch, kalibrácia digitálnych dvojčiat	16
6	Záver	22
7	Použitá literatúra	23
8	Zoznam vybraných publikovaných prác autora	24

1 Úvod

Mosty sú kritickou infraštruktúrou v dopravnom systéme, ale ich stav môže byť ovplyvnený rôznymi faktormi, ako sú zmeny teploty, vietor, sneh, vlhkosť a seizmické aktivity. Tieto faktory môžu viesť k poškodeniu konštrukcie mosta a ohroziť jeho nosnosť. Preto je dôležité mať účinné metódy na identifikáciu a kvantifikáciu poškodenia mostov. Tradičné metódy, ako je vizuálna kontrola, sú často subjektívne a časovo náročné. Nedávny pokrok v senzorových technológiách a strojovom učení otvoril nové možnosti v tejto oblasti. V tejto práci sa skúma využitie PSO metódy na identifikáciu poškodenia mostných konštrukcií. Práca sa zaoberá existujúcimi metódami identifikácie poškodenia mostov a kalibráciou a verifikáciou numerických modelov. Cieľom práce je vyvinúť nenáročnú a efektívnu metódu identifikácie poškodenia mostov pomocou údajov zo senzorov a algoritmov strojového učenia. Navrhovaná metóda sa testuje na reálnych mostných konštrukciách s cieľom preukázať jej účinnosť. Táto metóda by mohla byť užitočným nástrojom pre mostných inžinierov pri údržbe a správe mostov. V práci sú tiež popísané numerické

aplikácie PSO metódy a experimentálne overenie jej použitia pri identifikácii poškodenia mostov. Ďalšia kapitola sa zaoberá aj kalibráciou a verifikáciou modelov na základe nameraných dát. Záverom práce sa zhodnocujú výsledky a prínosy PSO metódy pre identifikáciu poškodenia mostov. Výskum potvrdzuje, že PSO metóda je vhodným nástrojom v tejto oblasti.

2 Súčasný stav problematiky

V súčasnosti je monitorovanie stavu mostných konštrukcií kľúčové pre ich bezpečnosť a spoľahlivosť. Súčasný trend je zameraný na výskum a zlepšovanie technológií v oblasti monitorovania stavu mostov. Structural Health Monitoring (SHM) [1]-[3] predstavuje dôležitú oblasť, ktorá sa zaoberá sledovaním stavu konštrukcií v reálnom čase s cieľom zistiť ich zmeny v dôsledku rôznych faktorov, ako sú zaťaženia, starnutie a poškodenie. SHM umožňuje včasné zistenie a identifikáciu poškodenia, čo umožňuje účinné plánovanie údržby a opráv. Identifikácia poškodenia mostov sa často vykonáva pomocou tradičných metód, ktoré zahŕňajú vizuálne a manuálne kontroly. Tieto metódy sú však časovo náročné a obmedzené tým, že nemôžu zistiť skryté poškodenie a nie sú schopné poskytnúť kvantitatívne údaje o rozsahu poškodenia. Moderné metódy založené na senzoroch a digitálnych technológiách, ako je napríklad PSO metóda, sa stávajú čoraz populárnejšími pre identifikáciu poškodenia mostov. Kalibrácia a verifikácia MKP modelov sú nevyhnutné pre úspešné využitie metódy PSO pri identifikácii poškodenia. Tvorba digitálneho dvojčaťa (Digital Twin - DT) je proces, ktorý zabezpečuje presnosť numerických modelov v porovnaní s reálnymi dátami. Vývoj nových metód kalibrácie a verifikácie MKP modelov je aktuálnou témou v oblasti mostového inžinierstva. Tieto pokročilé metódy prispievajú k lokalizácii a monitorovaniu poškodenia mostov efektívnejšie a spoľahlivejšie.

Metóda PSO

V práci sme sa zamerali na použitie metódy Particle Swarm Optimization (PSO). PSO metóda patrí medzi optimalizačné metódy a bola prvýkrát predstavená v roku 1995 od K. Eberharta a J. Kennedyho [4]. Metóda PSO je algoritmus optimalizácie, ktorý simuluje správanie sa roja častíc, ktoré sa pohybujú vo vyhľadávacom priestore. Tento algoritmus je inšpirovaný prírodou, konkrétne správaním zvierat alebo hmyzu, ktoré sa organizujú do skupín a spolupracujú na riešení úloh. V PSO algoritme sa riešenie problému reprezentuje ako skupina častíc (particles), pričom každá častica predstavuje jeden potenciálny optimálny bod v priestore riešení.[5]. Základným prvkom algoritmu vytvoreného Kennedym a Eberhartom [6] je častica. Častica je abstraktné vyjadrenie možného riešenia daného optimalizačného problému. Konfigurácia všetkých premenných riešeného problému predstavuje polohu častice v priestore hľadania.



Obr. 2.1 Schéma polohy častice

To znamená, že pri riešení úlohy s počtom premenných n musí byť poloha častice popísaná v n-rozmernom priestore. Každá os tohto priestoru predstavuje doménu hodnôt konkrétnej premennej, pričom pohybom častice v tomto priestore sa hodnoty premenných menia. Pohyb častice v priestore všetkých premenných najlepšie vyjadruje obrázok 2.2. Výsledný pohyb častice je výslednica troch vektorov zložiek. Prvá zložka vektora je takzvaná momentová alebo zotrvačná zložka, druhá je autobiografická alebo aj kognitívna zložka a treťou zložkou je sociálna interakcia.



Obr. 2.2 Schéma pohybu častice Slovne Výrazovo - matematicky

3 Numerické aplikácie PSO na identifikáciu poškodenia

V dnešnej dobe sa stále viac uplatňujú rôzne numerické metódy, ktoré pomáhajú šetriť čas a eliminovať chyby spojené s ľudským faktorom. To platí aj pri riešení optimalizačných problémov. V tejto kapitole sa zameriavame na využitie

metódy PSO ako nástroja na lokalizáciu poškodenia. Na tento účel sme využili model známeho železničného mosta nad riekou Váh, blízko Strečna (Obr.3.1).



Obr. 3.1 Oblúkový železničný most ponad rieku Váh pri Strečne

Implementácia kódu PSO na identifikáciu poškodenia

Zdrojový kód implementujúci PSO metódu bol naprogramovaný v jazyku MATLAB. Na začiatku programu sa vykoná inicializácia, ktorá zahŕňa generovanie náhodných pozícií pre každú časticu v priestore prehľadávania, pričom sa dodržujú zadané obmedzenia a podmienky. V tejto kapitole sme použili 50 častíc. Následne sa vyhodnotí kvalita každej pozície pomocou cieľovej funkcie. V praxi to znamená, že pre každú iteráciu je potrebné spustiť výpočet v ANSYSE pre každú časticu v populácii. Po vyhodnotení kvality častice sa aktualizujú pozície a rýchlosti pre každú časticu na základe vzťahu (2.2), ktorý zahŕňa tri zložky: zotrvačnosť častice, smerovanie k jej doteraz najlepšej pozícii (autobiografická zložka partBestX) a smerovanie k doteraz najlepšej pozícii v celej populácii (sociálna zložka swarmBestX). Potom sa celý proces opakuje. Po každej iterácii sa aktualizujú dve zložky: najlepšia pozícia (partBestX) pre každú časticu, ktorá zodpovedá jej doteraz najlepšiemu riešeniu, a najlepšia pozícia pre celú populáciu (swarmBestX), ktorá zodpovedá najlepšiemu riešeniu, ktoré bolo doteraz nájdené v celej populácii. Ak častica nájde lepšie riešenie, ako bolo zapísané v partBestX, táto pozícia sa aktualizuje. Podobne, ak v celom roji bolo nájdené lepšie riešenie, ako bolo zapísané v swarmBestX, táto pozícia sa aktualizuje. Celý proces pokračuje, kým nie je splnená podmienka zastavenia. Použitie PSO metódy umožňuje efektívne hľadať optimálnu konfiguráciu premenných v priestore prehľadávania pomocou súboru častíc, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú a prispievajú k celkovému zlepšeniu výsledkov.

Lokalizácia poškodenia na MKP modeli pozdĺžnika

Na obrázku 3.2 je znázornený model pozdĺžnika, pričom stena pozdĺžnika je modelovaná pomocou plošných prvkov typu SHEEL63 a horná a spodná pásnica sú reprezentované prútovými prvkami typu BEAM4. Pre simuláciu jedného z

najčastejších typov poškodenia tohto typu mosta sme zvolili zmenu materiálovej konštanty modulu pružnosti v určitom mieste.



Obr. 3.2 MKP model železničného mosta ponad rieku Váh pri Strečne a.) Hlavný nosník b.) Predmetný pozdĺžnik



Obr. 3.3 Determinácia (určenie) premenných



Obr. 3.4 Inicializácia častíc (náhodné rozmiestnenie)





Obr. 3.5 Znázornenie 1.-9. Iterácie

Na Obr. 3.3 - Obr. 3.5 sú zobrazené kroky iterácie pre dva parametre súradnice častice X (dĺžková súradnica) a Z (výšková poloha na stene pozdĺžnika). Vidíme, ako sa častice pohybujú smerom k najlepšiemu riešeniu. V tomto prípade sú

najlepšie riešenie hodnoty Xpso = 0,2051 a Zpso = 0,0950. Hodnota indexu poškodenia je nastavená na 0,001 a nie je parametrom hľadania v tomto príklade pomocou programu.

Tab. 3.1 Tabuľka výsledkov pre dva parametre pozdĺžnika

Parametre	Zadané	Nájdené	Rozdiel
Súradnica X	0,2	0,2051	2,550%
Súradnica Z	0,1	0,0950	5,000%

V Tabuľke 3.1 je uvedené porovnanie parametrov pre pozdĺžnik pri hľadaní dvoch parametrov. V druhom stĺpci zľava (zadané) sú uvedené hodnoty parametrov, ktoré sme stanovili ako substitúciu za skutočné poškodenie. V druhom stĺpci sprava (nájdené) sú hodnoty parametrov poškodenia, ktoré program našiel. Vidíme, že hodnoty parametrov, ktoré program našiel, sú veľmi blízko zadaným hodnotám. V pravom stĺpci je uvedená odchýlka od presného riešenia vyjadrená v percentách. Tabuľka 3.2 predstavuje porovnanie frekvencií pre dva parametre pozdĺžnika. Frekvencie v druhom stĺpci, ktoré boli získané na poškodenom pozdĺžniku s určenými hodnotami poškodenia, sú porovnané z frekvenciami získanými z nepoškodeného pozdĺžnika a zároveň sú porovnané s frekvenciami vypočítanými na základe parametrov poškodenia, ktoré našiel program. Z tabuľky vidíme, že vypočítané frekvencie programu sa zhodujú s frekvenciami získanými po zadaní poškodenia pozdĺžnika. Toto porovnanie naznačuje, že program úspešne určil parametre poškodenia a vypočítal frekvencie s veľmi malou odchýlkou od skutočných hodnôt.

Pozdĺžnik FreqQuazi Fr 2 Measured		Frekvencie UNDMG	Rozdiel [%]	FreqResults DMG [Hz]	Rozdiel [%]
parametre		[H2]			
1. Tvar	12,2753	12,2728	0,0205%	12,2753	0,0000%
2. Tvar	22,5105	22,5102	0,0012%	22,5105	0,0000%
3. Tvar	42,6084	42,5859	0,0528%	42,6084	0,0000%
4. Tvar	50,4080	50,4159	0,0156%	50,4080	0,0000%
5. Tvar	76,5546	76,5591	0,0059%	76,5546	0,0000%
6. Tvar	82,5142	82,4783	0,0434%	82,5142	0,0000%
7. Tvar	84,9207	84,9441	0,0276%	84,9207	0,0000%
8. Tvar	93,6231	93,6283	0,0056%	93,6231	0,0000%
9. Tvar	108,5957	108,6029	0,0066%	108,5957	0,0000%
10. Tvar	113,5428	113,5376	0,0045%	113,5428	0,0000%
11. Tvar	126,4807	126,4838	0,0025%	126,4807	0,0000%
12. Tvar	127,5512	127,5679	0,0131%	127,5512	0,0000%
13. Tvar	132,8682	132,9246	0,0425%	132,8682	0,0000%
14. Tvar	140,4269	140,4406	0,0097%	140,4269	0,0000%
15. Tvar	140,4980	140,5294	0,0224%	140,4980	0,0000%
	Priemern	ý rozdiel	0,0183%		0,0000%

Tab. 3.2 Tabuľka porovnania frekvencií pre dva parametre pozdĺžnika

4 Experimentálne overenie metodiky identifikácie poškodenia

V ďalšom kroku nášho výskumu sme experimentálne overili použitie metódy PSO na identifikáciu poškodenia mostných konštrukcií. V tejto kapitole opisujeme namerané dáta z experimentálneho modelu mosta v mierke a ich spracovanie pomocou digitálneho dvojčaťa. Taktiež sa zameriame na aplikáciu PSO metódy na tieto namerané dáta a vyhodnotíme výsledky identifikácie poškodenia. Naším cieľom je overiť spoľahlivosť a presnosť navrhovanej metódy a porovnať ju s existujúcimi metódami identifikácie poškodenia mostov.

Na oceľovú priehradovú konštrukciu (Obr. 4.1 a) sme dorobili prvkovú mostovku. Mostovka pozostáva z pozdĺžnikov (Obr. 4.1 b), stužidiel, drevených mostníc a koľajníc. Pozdĺžniky sú vytvorené z hliníkového plechu rozmeru 80x840x0.8mm, ktorý tvorí stenu pozdĺžnika, k nej sú prinitované dva hliníkové L profily na spodnej časti ako spodná pásnica a rovnako dva rovnaké L profily na hornej časti ako horná pásnica (Obr. 4.1 c) a (Obr. 4.2). Tieto profily sú rozmeru 10x10x1mm a sú tiež použité ako stužidlá horného pásu mostovky (Obr. 4.1 d). Stužidlá sú k hornému pasu prichytené cez roznášacie pliešky hrúbky 0.8mm (Obr. 4.1 d). Na koľajnice sme použili hliníkové profily JAKL 15x15x1.4, ktoré sú k dreveným mostniciam prichytené cez hliníkové uholníky. (Obr. 4.1)



Obr. 4.1 Výroba experimentálneho modelu

Konečno prvkový model oceľovej priehradovej konštrukcie bol vytvorený v programe ANSYS Mechanical APDL. [7], [8] Vychádzali sme z modelu hlavného

nosníka a priečnikov. Mostovka bola následne pre účely tejto práce namodelovaná presne podľa rozmerov vyrobeného experimentu. Pozdĺžniky tvaru I profilu sú tvorené zo steny, ktorú tvorí hliníkový plech hrúbky 0.8 mm, ku ktorej sú prinitované hore aj dole dva hliníkové L profily 10/10mm s hrúbkou plechu 1mm (Obr. 4.2). Steny a pásnice pozdĺžnikov sú modelované pomocou plošného prvku SHELL63. L-profily pásnice sú od steny vzdialené 0,2 mm + hrúbka príslušného materiálu. Tento parameter je možne upravovať pri nasledujúcom ladení modelu. Stena a L-profil pásnice sú spojené prostredníctvom nitov. Nity sú modelované prútovými prvkami typu PIPE16. V pozdĺžnom smere sú nity rozmiestnené po 2 cm na hornej aj spodnej pásnici. Mostnice (podvaly) sú tvorené plošným prvkom SHELL63 s hrúbkou, ktorá sa rovná šírke podvalu, teda 2cm. Mostnice sú od seba v pozdĺžnom smere vzdialené cca 0,14m. Sú pripojené na priečnik priamo a pevne v dvoch bodoch na oboch uholníkoch pozdĺžnika. Koľajnice sú vytvorené ako líniový prvok BEAM. Majú prierezové charakteristiky podľa hliníkového JAKLa z ktorého sú reálne vyrobené. Pripojené sú na mostnice v jednom bode. Pozdĺžniky sú v mieste napojenia na priečniky pripojené v 2 bodoch na hornú časť priečnika a v dvoch bodoch na spodnú časť. Z druhej strany to isté. Pripojenie je realizované tiež cez líniové prvky od priečnika k pozdĺžniku.



Obr. 4.2 Priečny rez pozdĺžníkom

Nasledovala kalibrácia, validácia a verifikácia numerického modelu na základe meraných veličín. Meranými veličinami boli pomerné pretvorenia na pozdĺžniku v stredom poli rozpätia a na koľajnici nad ním. Tieto hodnoty sa následne porovnávajú s hodnotami z výpočtov. Na základe rozdielov v týchto hodnotách sa menia rôzne nastavenia, napojenia a detaily v modeli.. Je zrejmé, že reálny experimentálny model obsahuje imperfekcie alebo chyby či nepresnosti. Tieto nedokonalosti je potrebné zohľadniť vo fiktívnom, teda numerickom modeli.

Z dôvodu potreby detailného zachytenia zmien v správaní konštrukcie po poškodení sme sa snažili získať čo najviac dát, na ktoré má poškodenie vplyv. Zvolili sme dva rôzne varianty poškodenia (Obr. 4.3), aby sme mohli zhodnotiť ich vplyv na správanie sa mosta. Prvým variantom poškodenia bolo odstránenie troch nitov na spodnej pásnici v strede rozpätia ľavého pozdĺžnika v strednom poli, označené ako DMG1. Druhým variantom bolo tiež odstránenie troch nitov, tentokrát na kraji toho istého pozdĺžnika na spodnom páse pri prichytení na priečnik, označené ako DMG2 (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 2. variant poškodenia - DMG2

Meranie odozvy kmitania konštrukcie sme vykonali v deviatich bodoch na konštrukcii pri harmonickom zaťažení. Akcelerometre sme pripevnili na spodnú pásnicu pozdĺžnikov. Týchto deväť charakteristických bodov bolo rovnomerne rozmiestnené pozdĺž celej konštrukcie, aby sme čo najlepšie opísali vlastný tvar kmitania spodného pásu pozdĺžnika. Tieto body boli vybrané s ohľadom na obmedzený počet meracích zariadení a s cieľom čo najpresnejšie identifikovať zmenu odozvy v dôsledku poškodenia.

Vykonali sme niekoľko meraní dynamickej odozvy pri harmonickom zaťažení pomocou elektrodynamického budiča pri rôznych frekvenciách. Vybrali sme také frekvencie, ktorých vlastné tvary môžu zachytiť významný rozdiel medzi nepoškodenou a poškodenou konštrukciou. Keďže prvá vlastná frekvencia steny pozdĺžnika vychádzajúca z merania je medzi 72.31 Hz a 76.4 Hz rozhodli sme sa začať pri týchto frekvenciách.

Na základe modálneho výpočtu sme potvrdili, že pri frekvenciách medzi 72,31 Hz a 76,4 Hz sa skutočne jedná o výkmit spodného pasu pozdĺžnika, ako sme ho vybudili pri meraní. Ďalšie frekvencie, ktorým venujeme pozornosť sú 88.25 Hz, 93.83 Hz, 99.08 Hz a 103.29Hz. Pri týchto frekvenciách, keďže sa jedná o vykmity spodného pásu pozdĺžnika, očakávame aj zmenu v amplitúdach vlastných tvarov vplyvom poškodenia.

Vzhľadom na to, že sme zistili, že vlastné tvary z merania sa dokonale nezhodujú s vlastnými tvarmi vypočítanými z modelu, rozhodli sme sa zvoliť alternatívny prístup pri stanovení vektora meraných veličín v cieľovej funkcii. Je dôležité zdôrazniť, že sme upravili vektor meraných veličín na základe rozdielu medzi meranými hodnotami v poškodenom a nepoškodenom stave. Tieto upravené hodnoty odrážajú rozdiely v meraných veličinách medzi poškodeným a nepoškodeným stavom. Napríklad, pre tvar kmitania s frekvenciou 103.29 Hz sme získali rozdiely medzi nameranými hodnotami poradníc tvaru kmitania v nepoškodenom a v poškodenom stave. Tento rozdie sme následne pripočítali k hodnotám poradníc tvaru získaných z výpočtu. Výsledkom je odhadnutý modálny tvar kmitania určený z rozdielov z merania. (Obr. 4.5) Vektory meraných vlastných tvarov, vstupujúce do cieľovej funkcie teda neobsahujú priamo skutočne namerané vlastné tvary, ale vlastné tvary získané z modálneho výpočtu s odčítaným rozdielom medzi meraným tvarom v nepoškodenom a poškodenom stave.



Obr. 4.5 Vlastný tvar kmitania spodného pásu pozdĺžnika

Cieľom našej práce bolo vyvinúť metodiku systémovej identifikácie poškodenia, ktorá by využívala metódu PSO na optimalizáciu konečno-prvkového modelu na základe zozbieraných dát. Vzhľadom na citlivosť metódy PSO na malé zmeny výstupov pri takýchto drobných poškodeniach a vzhľadom na obťažnosť vytvorenia modelu, ktorý by presne kopíroval realitu, sme sa rozhodli použiť zmenu vo vypočítaných dátach na základe zmien v meraných hodnotách. Tento prístup nám umožňuje efektívne sledovať a identifikovať odchýlky v správaní konštrukcie a optimalizovať model na ich základe. S pomocou tejto metodiky môžeme dosiahnuť presnejšie a spoľahlivejšie výsledky pri identifikácii poškodenia konštrukcie.

Na obrázku 4. 6 je znázornený MKP model priehradovej konštrukcie a z nej zobrazené pozdĺžniky a nakoniec nity. Pre interpretáciu výsledkov sme zvolili obrázky nitovania pozdĺžnikov. Na ďalších obrázkoch je znázornené nitovanie s chýbajúcimi časťami, ktoré predstavujú jednotlivé častice, teda potenciálne riešenie. V experimente sme poškodenie vytvorili odstránením 3 nitov na spodnom páse pozdĺžnika v strednom poli, ako je vyššie (Obr. 4.3). Vzhľadom k tomu sme zvolili jeden hľadaný parameter metódou PSO, a to číslo elementu, ktorý reprezentuje odstránený nit a susedné dva na konečno-prvkovom modeli konštrukcie. Riešené sú dva stavy poškodenie označené ako DMG1 (odstránenie 3 nitov v strede) a DMG2 (odstránenie 3 nitov na kraji stredného pozdĺžnika).



b) Zobrazenie pozdĺžnikov

c) Zobrazenie nitov na pozdĺžnikoch

Pre tento prípad sme použili 16 častíc a 16 iterácií, avšak pre každú časticu, kandidáta na hľadané riešenie, bol výpočet urobený samostatne. Jeden výpočet zahŕňa modálny výpočet vlastných tvarov, zápis frekvencií a daných poradníc tvarov v deviatich charakteristických bodoch pre každý modálny tvar, ďalej cyklický výpočet a zápis pomerných pretvorení a priehybov pri prejazde vozíka. V jednej iterácii je 16 týchto výpočtov v Ansyse. Pri 16 iteráciách je dokopy 256 výpočtov. Pri jednom výpočte trvajúcom cca 30s bol celkový čas 128minut. Identifikáciu poškodenia pomocou PSO podľa navrhovanej metodiky sme spustili niekoľkokrát. Po vyhodnotení výsledkov sme dospeli k záveru, že navrhovaná metodika pre identifikáciu poškodenia bola úspešná. Hoci metóda PSO nenašla poškodenie na presne definovanom mieste, vždy lokalizovala poškodenie v tesnej blízkosti daného miesta na pozdĺžniku.



Obr. 4.7 Identifikácia poškodenia stav DMG1- poškodenie v strede a) Reálne poškodenie v strede pozdĺžnika

b) Inicializácia častíc - náhodne rozmiestnenie

c) Nájdenie riešenia - Zhluk 16 častíc pri 16 iterácii

Rovnako sme postupovali aj pri druhom stave poškodenia s označeným DMG2 – poškodenie na kraji pozdĺžníka. Častice sa výrazne priblížili miestu poškodenia už pri 16. iterácii. Pri väčšom počte iterácií by sa všetky častice zhlukli na konkrétom mieste poškodenia. Vzhľadom k úspore výpočtového času, koncentráciu častíc v okolí miesta poškodenie pri 16. iterácii, považujeme za dostačujúci výsledok.

Na záver hodnotíme, že sme úspešne vyvinuli metodiku identifikácie poškodenia na prvkovej mostovke oceľovej priehradovej konštrukcii. Nasledujúce kroky stručne opisujú vyvinutú metodiku:

 Príprava digitálneho dvojčaťa – Vytvorenie presného kalibrovaného MKP modelu konštrukcie v nepoškodenom stave.

- Meriame lokálne tvary pozdĺžnikov v globálnej analýze sú tieto tvary na 70-80 pozícii s frekvenciou rádovo v 100Hz, preto je potrebné sa zamerať na lokálne tvary kmitania pozdĺžnikov.
- Vybudenie vlastných tvarov pozdĺžnikov vybudiť vlastnú frekvenciu odporúčame úderom v strede rozpätia pozdĺžnika do spodnej pásnice v horizontálnom smere.
- Oprava meraných tvarov vzhľadom na nedokonalú zhodu medzi MKP modelom a experimentálnym modelom je potrebné namerané poradnice vlastných tvarov opraviť o chybu medzi týmito modelmi. (Pozri Kap. 4.4.2)
- Identifikácia poškodenia metódou PSO Import opravených tvarov spolu s ostatnými dátami do cieľovej funkcie ako referenčné hodnoty pre identifikáciu poškodenia pomocou metódy PSO.

5 Experimentálne merania na mostoch, kalibrácia digitálnych dvojčiat

Pre úspešnosť PSO metódy na hľadanie poškodenia je kľúčové mať kalibrovaný a verifikovaný model, tzv. digitálne dvojča, ktorého výstupné dáta s minimálnou chybou zodpovedajú referenčnému modelu nepoškodeného mosta. Zameriame sa na kalibráciu a verifikáciu MKP modelov mostov na základe nameraných dát z reálnych konštrukcií. Cieľom je vytvoriť takzvané digitálne dvojča (DT), ktoré slúži ako referenčný model pri identifikácii poškodenia. V úvode kapitoly stručne popíšeme použité experimentálne metódy na získanie dát a následne ich spracovanie.

Cestný oceľový most SNP

Na testovanie ladenia modelu nám poslúžil výpočtový model mosta SNP v Bratislave. Tento model bol zostrojený v MKP softvéri ANSYS na katedre stavebnej mechaniky. Ide o známy nesymetricky zavesený most ponad rieku Dunaj s rozponom najdlhšieho poľa 303m a celkovou dĺžkou cca 432m (viď Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Model mosta SNP v Bratislave

Na moste SNP bolo v rokoch 2016 a 2017 vykonané meranie. [9]–[11] Pri týchto meraniach boli identifikované frekvencie uvedené v Tabuľke 5.2 Vypočítané frekvencie z pôvodného modelu sú uvedené v štvrtom stĺpci. V predposlednom stĺpci je porovnanie vypočítaných frekvencií pôvodného modelu s priemernými nameranými frekvenciami. Vidíme, že zhoda je pomerne dobrá, pretože tento pôvodný model prešiel ručnou niekoľkohodinovou kalibráciou a ladením na katedre stavebnej mechaniky.

Avšak pre ešte presnejšie výsledky boli kalibrované 3 parametre. Sú to hmotnosti vozovky, chodníkov a vodovodného potrubia. Pôvodná hmotnosť vozovky je stanovená z pôvodnej hrúbky vozovky (70mm). Vonkajší priemer potrubia je 85 cm. Z toho vychádza celková hmotnosť potrubia 949.6 ton. Rozmery chodníka sú 3,6/431,8m a hrúbka pôvodného asfaltu na chodníku je podľa [12] 20mm, ktorú nahradil 10mm špeciálny odolný povlak. V Tabuľke 5.1 je zhrnutie a zaokrúhlenie všetkých troch parametrov výpočtu. Vzhľadom na univerzálnosť viacnásobného budúceho použitia programu tejto metódy boli zvolené násobitele pôvodnej hmotnosti. To znamená, že do výpočtu nevstupuje priamo číslo hmotnosti ale jeho násobiteľ v hraniciach ktoré sú uvedené v Tabuľke 5.1.



Obr. 5.2 Poloha častíc a) Náhodné rozmiestnenie - inicializácia b.) Druhá iterácia c) Siedma iterácia d) Deviata iterácia

Vidíme, ako sa častice počas procesu optimalizácie pohli smerom k polohe najlepšie umiestnenej častice. Na obrázkoch 5.2c) a 5.2d) je siedma a deviata iterácia. Častice sa koncentrujú v mieste najlepšieho riešenia. Najlepšie umiestnená častica má

súradnice 0.1, 1.49, 0.96, viď tabuľka 5.1. Z tohto vieme, že ak týmito nájdenými násobiteľmi prenásobíme základné parametre dostaneme hodnotu hmotnosti parametrov pri ktorých bola najlepšia zhoda vo frekvenciách. Zhody vo frekvenciách sú uvedené v Tabuľke 5.2.

Č.	Parameter	Základná hodnota parametra (kg)	Spodná hranica násobiteľa	Horná hranica násobiteľa	Nájdený násobiteľ parametra metódou PSO	Hodnota parametra pri najlepšom riešení (kg)
1	Hmotnosť vozovky	1 773 000	1	1,5	1,492	2 644 756
2	Hmotnosť potrubia	950 000	0,1	1	0,102	97 100
3	Hmotnosť chodníkov	70 000	0,5	1	0,957	66 993

Tab. 5.1 Ladené parametre výpočtu

	(Kg)			metodou PSO	rieseni (kg)			
Hmotnosť vozovky	1 773 000	1	1,5	1,492	2 644 756			
Hmotnosť potrubia	950 000	0,1	1	0,102	97 100			
Hmotnosť chodníkov	70 000	0,5	1	0,957	66 993			
Tab. 5.2 Nájdené najlepšie parametre riešenia								

	Onistanu	VI	astná frekvenc	Chyba v %	Chyba v %	
Č.	opis tvaru kmitania (smer)	er) Priemer Pôvodný meraných MKP Ladený MKP (A) model (B) model (C)		(A-B)/ Max(A,B)	(A-C)/ Max(A,C)	
1	V smere Z	0,459	0,434	0,447	3,77%	0,81%
2	V smere Y	0,576	0,597	0,607	-3,02%	-4,59%
3	V smere Z	ere Z 0,845 0,814 0,843		3,44%	-0,01%	
4	Pylón v smere Y 1,205		1,121	1,121	6,58%	6,57%
5	V smere Z	1,385	1,332	1,345	3,76%	2,83%
6	Okolo osi X	1,432	1,539	1,530	-6,82%	-6,26%
7	V smere Y a okolo osi X	1,509	1,593	1,576	-5,59%	-4,59%
8	V smere Z	2,033 2,005 2,02		2,010	0,55%	0,31%
9	V smere Z	2,506	2,589	2,539	-2,94%	-1,01%
10	V smere Y a okolo osi X	2,784	3,011	2,807	-7,61%	-0,91%
					4 440/	2 700/

ABS Priemer 4,41% 2,79%

Z porovnania frekvencií ladeného a pôvodného modelu je jasne vidieť zlepšenie. Na záver teda konštatujeme, že pri náročnom ladení MKP modelov nám môže výborne pomôcť aj metóda PSO. Pri kalibrovaní modelu je častokrát veľa parametrov, ktoré treba meniť. Je časovo náročné kombinovať všetky menené parametre, sledovať a porovnávať zmeny vo výsledkoch. Na základe porovnávania cieľovej funkcie čo môže byť v našom prípade porovnávanie meraných a vypočítaných vlastných frekvencií nám PSO metóda vie nájsť optimálne riešenie.

Železničný oceľový most Šaľa

Ďalším dôležitým zistením je možnosť využitia metódy PSO na kalibráciu a overenie základových okrajových podmienok modelu mosta. Pri vytváraní modelu sme zaznamenali rozdiely medzi nameranými a vypočítanými vlastnými frekvenciami. Ukázalo sa, že jedným z najdôležitejších parametrov ktorý tieto rozdiely spôsobuje je koeficient reakcie podložia. Preto sme pomocou metódy PSO optimalizovali dve hodnoty: Kx pre horizontálny smer a Kz pre vertikálny smer.



Obr. 5.4 Ladený c) Numerický model C

Po vykonaní optimalizácie metódou PSO boli identifikované parametre K_z =69 MNm⁻³ a K_x =16 MNm⁻³. Vlastné frekvencie sa nakoniec dobre zhodujú s nameranými (pozri posledný stĺpec - model C v tab. 5.3).

Vlastný tvar	Smer kmitania	Počítané v	Merané		
	vlastného tvaru	Model A	Model B	Model C	Vlastné frekvencie [Hz]
1	Smer Y	6.899	6.327	3.698	3.70
2	Smer Z	7.435	8.083	7.127	7.10
3	Smer Y	19.225	17.363	10.247	11.30

	Tab. :	5.3	Porovnania	vlastných	frekvencií
--	--------	-----	------------	-----------	------------

Na určenie vhodných parametrov tuhosti podložia bola použitá metóda PSO. Získané koeficienty reakcie podložia boli Kz=69MNm⁻³ a Kx=15MNm⁻³. Oba tieto parametre sa odchýlili od odhadovaných hodnôt získaných geologickým prieskumom. Správne použitie metódy PSO môže zlepšiť riešenie a ušetriť veľa času. Metóda PSO môže byť veľmi užitočná najmä pri riešení rozsiahlejších úloh. V ďalšej časti používame metódu PSO pri riešení väčšicho počtu parametrov. To prinesenie komplexnejší obraz o spôsobe použitia metódy PSO na kalibráciu MKP modelu.

Cestný ŽB most Bojnická

Kalibrácia mosta na bojnickej ulici v Bratislave je ďalším zaujímavým príkladom použitia metódy PSO. V mesiacoch marec – september v roku 2021 sme s výskumným tímom z KSME vykonali niekoľko meraní na tomto moste kde sme určovali nielen vlastné frekvencie ale merali sme aj napätia od prejazdu dopravy. Podrobný konečno-prvkový model mosta bol vytvorený v softvéri ANSYS Mechanical APDL na základe dostupných dokumentov, informácií a podkladov.



Obr. 5.5 Konečno prvkový model mosta vytvorený v softvéri ANSYS

Keďže ručne nastavené parametre výpočtu nedávali dobrú zhodu vo vlastných frekvenciách rozhodli sme sa na kalibráciu týchto parametrov použiť optimalizačnú metódu PSO. V tomto prípade optimalizačného problému modelu mosta na Bojnickej ulici bolo 25 parametrov, ktoré sme nemali možnosť presne určiť pomocou experimentálnych laboratórnych skúšok alebo skúšok v teréne. Napríklad ložnosti podložia pre základy a krajné opory sme mohli určiť len približne podľa dostupnej literatúry [13]. Keďže neboli dostupné informácie o základovej pôde ani o základových pomeroch museli sme vybrať koeficienty podložia odhadom. Ďalšie parametre sme volili na základe dostupných zdrojov a informácií, ktoré sme mali o danom objekte. Patrili sem predovšetkým Youngové moduly pružnosti a objemové hmotnosti konkrétnych častí mosta, ako sú nosníky, priečle, stĺpy, asfaltová vozovka, betónové chodníky, a v neposlednom rade zálievky nosníkov, ktoré zohrávajú významnú úlohu pri spolupôsobení mosta.

Najskôr sme model kalibrovali len na vlastné frekvencie. To znamená, že v cieľovej funkcii sme porovnávali len vypočítané a merané frekvencie. Neskôr sme však zistili, že pri takomto zložitom modeli nie je dobré porovnávať len frekvencie. Z tohto dôvodu sme do cieľovej funkcie pridali aj porovnávanie vlastných tvarov na základe kritéria MAC.

Tue: 5: + erebbinn te + ybreuke + pin per oan yen parametroen								
				Me	eranie			Rozdiel
			1. Tvar	2. Tvar	3. Tvar	4. Tvar	5. Tvar	vo
		Fr.(Hz)	2,425	4,808	7,208	7,422	7,828	frekv.
	1. Tvar	2,289	0,96857	0,04371	0,00029	0,01091	0,01384	5,62%
	2. Tvar	5,664	0,04093	0,95993	0,00264	0,00677	0,01238	15,12%
	3. Tvar	8,207	0,01295	0,09582	0,58545	0,08227	0,51351	
÷	4. Tvar	9,186	0,01526	0,04921	0,00172	0,25424	0,09430	
oče	5. Tvar	9,317	0,01035	0,09377	0,93764	0,24363	0,39125	22,63%
/ý	6. Tvar	10,077	0,02925	0,07929	0,00098	0,15506	0,03623	
-	7. Tvar	10,362	0,04065	0,12054	0,09845	0,96877	0,17750	28,37%
	8. Tvar	10,459	0,04532	0,02435	0,06081	0,19005	0,91945	25,16%
	9. Tvar	11,036	0,03653	0,08040	0,10271	0,16738	0,00362	
	10. Tvar	11,556	0,00368	0,09128	0,18668	0,07149	0,01193	
Priemer:								19,38%
	Tab. 5.5 CrossMAC výsledkov pri naladených parametroch							
				Me	ranie			Rozdiel
			1. Tvar	2. Tvar	3. Tvar	4. Tvar	5. Tvar	vo

Tab. 5.4 CrossMAC výsledkov pri pôvodných parametroch

frekv. Fr.(Hz) 2,425 4,808 7,208 7,422 7,828 1. Tvar 2,414 0,96999 0,04082 0,00024 0,01149 0,01394 0,46% 2. Tvar 4,676 0,04323 0,95494 0,00093 0,00607 0,01504 2,75% 0,09662 0,08781 3. Tvar 5,826 0,01433 0,57883 0,53232 4. Tvar 6,578 0,01480 0,05573 0,05504 0,25479 0,12316 /ýpočet 5. Tvar 7,272 0,00529 0,08403 0,93587 0,18050 0,40793 0,88% 6. Tvar 7,474 0,03344 0,12590 0,15245 0,96005 0,22472 7. Tvar 7,777 0,01684 0,03773 0,04287 0,16682 0,01352 0,65% 8. Tvar 8,284 0,04930 0,14088 0,90371 10.41% 0,01542 0,00590 9. Tvar 9,346 0,03578 0,09878 0,12467 0,33381 0,08256 10. Tvar 9.591 0.00610 0.08467 0.19024 0.01447 0.00369

Priemer: 3,03%

Pre lepšiu presnosť výsledkov sme sa rozhodli populáciu v metóde PSO nastaviť na 50 častíc. Pri riešení optimalizačného problému metódou PSO je potrebné nastaviť horné a dolné hranice pre každý parameter zvlášť, v rozumnej tolerancii, v ktorej sa daný parameter môže pohybovať. V tabuľke 5.4 sú uvedené výsledky porovnania CrossMAC kritéria pre pôvodné nastavenie parametrov. V pravom stĺpci sú uvedené absolútne hodnoty percentuálnych chýb vypočítaných vo frekvenciách. Na konci stĺpca je zaznamenaná priemerná hodnota týchto chýb, ktorá dosahuje hodnotu 19,38%. V tabuľke 5.5 sú uvedené výsledky porovnania vypočítaných frekvencií pre model s použitím parametrov, ktoré boli nájdené pomocou PSO algoritmu.

Záverom možno konštatovať, že metóda PSO je vhodný nástroj aj pre kalibráciu modelu mosta na základe meraných dát. Cieľová funkcia v našom prípade bola založená na porovnávaní vlastných tvarov a vlastných frekvencií, no ďalšie

merané údaje ako napríklad pomerné pretvorenia z tenzometrov alebo priehyby od statického zaťaženia by mohli byť v budúcnosti zapracované do cieľovej funkcie pre lepšiu kontrolu kvality riešenia a pre bližšie priblíženie numerického modelu k reálnemu správaniu mosta. Takýto prístup by umožnil získať dôležité informácie o skutočnom správaní mosta a vytvoriť presnejší a spoľahlivejší numerický model, ktorý by mohol byť použitý pri plánovaní budúcich rekonštrukcií

6 Záver

Metóda PSO je efektívnym nástrojom na identifikáciu poškodenia mostov aj s obmedzeným množstvom meraných dát. V tretej kapitole tejto prace sme overili jej funkčnosť pri identifikácii poškodenia steny pozdĺžnika mosta ponad rieku Váh. Keďže sme nemali možnosť merania ani prístup k predošlým meraným dátam, nahradili sme ich dátami z MKP modelu tohto mosta. Takýto prístup však nie je použiteľný pre prax pretože fyzické konštrukcie neposkytujú totožné merané dáta v porovnaní s vypočítanými z MKP modelu.

V štvrtej kapitole sme aplikovali metódu lokalizácie poškodenia na reálnom experimentálnom modeli mosta. MKP model mosta bol kalibrovaný a overovaný pomocou meraní napätí, deformácií a vlastného kmitania. Poškodenie bolo úspešne odhalené pomocou metódy PSO v oboch prípadoch simulácie poškodenia. Hoci namerané tvary kmitania nie sú presne zhodné s počítanými, experiment nám umožnil lokalizovať poškodenie. Dôležité je mať kalibrovaný a verifikovaný MKP model mosta pre úspešné použitie metódy PSO. Experimentálne merania sú kľúčové pre kalibráciu a verifikáciu MKP modelov mostov a pre aplikáciu metódy PSO pri identifikácii poškodenia mostov. Výsledky tejto práce sú dôležitým krokom vpred v systémovej identifikácii stavu mostných konštrukcií a slúžia ako základ pre ďalší výskum a vývoj nových metód na identifikáciu poškodenia mostov.

Kritickým faktorom pre úspešné použitie metódy PSO je kalibrovaný a overený MKP model mosta s presnými výstupnými dátami. Experimentálne merania a ich spracovanie sú kľúčové pre kalibráciu a verifikáciu MKP modelov mostov a pre aplikáciu metódy PSO pri identifikácii poškodenia. Výsledky tejto práce sú dôležitým krokom vpred v oblasti systémovej identifikácie stavu mostných konštrukcií a poskytujú základ pre ďalší vývoj nových metód na identifikáciu poškodenia mostov.

Výsledky tejto práce majú prínos pre systémovú identifikáciu stavu mostných konštrukcií. V budúcnosti je dôležité mať referenčné namerané dáta z nepoškodeného mostu a digitálne dvojča, aby sa metódika na lokalizáciu poškodenia mohla aplikovať efektívne. Takýto prístup by ušetril množstvo času pri vizuálnych prehliadkach celého mosta a upriamil by pozornosť na kritickú časť. Taktiež by sa predišlo predlženej odstávke mosta, ktorá môže mať výrazný vplyv na ekonomiku a plynulosť cestnej alebo železničnej dopravy.

7 Použitá literatúra

- H. Sohn, C. R. Farrar, F. Hemez, and J. Czarnecki, "A Review of structural health," *Library.Lanl.Gov*, pp. 1–7, 2001, [Online]. Available: https://library.lanl.gov/cgibin/getfile?00796820.pdf
- [2] J. P. Lynch, C. R. Farrar, and J. E. Michaels, "Structural health monitoring: Technological advances to practical implementations," *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 8, pp. 1508–1512, 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2588818.
- [3] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [4] J. Kenedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Ind. Electron. Handb. -Five Vol. Set, pp. 1942–1948, 1995, doi: 10.1007/978-3-319-46173-1_2.
- [5] Y. Shi and R. Eberhart, "Modified particle swarm optimizer," *Proc. IEEE Conf. Evol. Comput. ICEC*, no. June, pp. 69–73, 1998, doi: 10.1109/icec.1998.699146.
- [6] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Purdue Sch. Eng. Technol. Indianapolis, 46202-5160, vol. 23, no. 2, pp. 145–156, 1995.
- [7] Ansys®, "Academic Teaching Mechanical and CFD." Release 17.0, Help System, ANSYS Inc, p. 600, 2017.
- [8] P. C. Kohnke, "ANSYS BT Finite Element Systems: A Handbook," C. A. Brebbia, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982, pp. 19–25. doi: 10.1007/978-3-662-07229-5_2.
- [9] R. Ároch, M. Sokol, and M. Venglár, "Structural Health Monitoring of Major Danube Bridges in Bratislava," *Procedia Eng.*, vol. 156, pp. 24–31, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.263.
- [10] M. Venglár, "Dynamic Tests and System Identification of Bridges.," Diss. thesis, p. 129, 2018, doi: 10.1061/jsdeag.0006057.
- [11] M. Sokol *et al.*, "Traffic response pattern of cable-stayed bridge as a comparison tool for SHM," *IABSE Conf. Vancouver 2017 Eng. Futur. - Rep.*, pp. 191–197, 2017, doi: 10.2749/vancouver.2017.0191.
- SIKA AT WORK, "Rekonštrukcia chodníkov pre peších a cyklistov Most SNP Bratislava," 2019.
- [13] N. Jendželovský, "Modelovanie základových konštrukcií v MKP," Bratislava, 2013.

8 Zoznam vybraných publikovaných prác autora

Vedecké práce v domácich časopisoch

MARTON, Martin - SOKOL, Milan - BEKÖ, Adrián - MAOSEN, Cao. Identification of Damage on Stringers by the PSO Method. In Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 29, no. 3 (2021), s. 9-14. ISSN 1210-3896 (2021). V databáze: WOS: 000707129600002 ; DOI: 10.2478/sjce-2021-0016.

Vedecké práce v zahraničných časopisoch

SOKOL, Milan - ÁROCH, Rudolf - LAMPEROVÁ, Katarína - MARTON, Martin - GARCÍA-SANZ-CALCEDO, Justo. Parametric Analysis of Rotational Effects in Seismic Design of Tall Structures. In Applied Sciences. Vol. 11, no. 2 (2021), online, [13] s., art. no. 597. ISSN 2076-3417 (2021: 2.838 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.507 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000610935300001 ; SCOPUS: 2s2.0-85099222789 ; DOI: 10.3390/app11020597.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- MARTON, Martin SOKOL, Milan LAMPEROVÁ, Katarína. Coefficient of subsoil reaction calibrated by PSO method. In Engineering Mechanics 2022 [book of full texts. 27/28th international conference. May 9-12, 2022, Milovy, Czech Republic]. 1. vyd. Prague: Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2022, S. 257-260. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-86246-48-2.
- MARTON, Martin SOKOL, Milan. Damage identification on stringers by modal analysis. In Engineering Mechanics 2020 [book of full texts. 26th international conference. November 24-25, 2020, Brno, Czech Republic]. 1. vyd. Brno : Brno University of Technology Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics, 2020, online, s. 346-349. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-5896-3. V databáze: DOI: 10.21495/5896-3-346; WOS: 000667956100079.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- MARTON, Martin. Kalibrácia, validácia a verifikácia numerického modelu na základe experimentálnych testov. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 32nd Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 26th, 2022, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 2022, CD-ROM, s. 474-481. ISBN 978-80-227-5251-0.
- MARTON, Martin. Identifikácia poškodenia pozdĺžnika pomocou metódy PSO. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]: 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th2020, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 52-57. ISBN 978-80-227-5052-3.