

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Materiālu un konstrukciju institūts

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY

Faculty of Civil Engineering

Institute of Materials and Structures

Rims Janeliukštis

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

Doctoral Student of the Study Programme “Civil Engineering”

**UZ PAŠSVĀRSTĪBU FORMU PĀRVEIDOJUMIEM UN
UZRAUDZĪTO MAŠĪNAPMĀCĪBU BALSTĪTĀ
KONSTRUKCIJU BOJĀJUMU IDENTIFIKĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

**STRUCTURAL DAMAGE IDENTIFICATION BASED ON
MODE SHAPE TRANSFORMATIONS AND SUPERVISED
LEARNING**

Summary of the Doctoral thesis

Zinātniskie vadītāji

vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.*

SANDRIS RUČEVSKIS

profesors *Dr. sc. ing.*

ANDRIS ČATE

Scientific supervisors

Lead Researcher *Dr. sc. ing.*

SANDRIS RUČEVSKIS

Professor *Dr. sc. ing.*

ANDRIS CHATE

RTU Izdevniecība / RTU Press

Rīga 2019 / Riga 2019

Janeliukštis, R. Uz pašsvārstību formu pārveidojumiem un uzraudzīto mašīnāpmācību balstītā konstrukciju bojājumu identifikācija. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 83 lpp.

Janeliukštis, R. Structural Damage Identification Based on Mode Shape Transformations and Supervised Learning. Summary of the Doctoral Thesis. Riga: RTU Press, 2019. 83 p.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “P-03” sēdes 2019. gada 30. Janvāra lēmumu, protokols Nr. 2019-1.

Published in accordance with the decision of the Promotion Council “P-03” of 30th January 2019, Minutes No. 2019-1.

ISBN 978-9934-22-280-1 (print)
978-9934-22-281-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 17. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Laboratoriju mājā, Paula Valdena ielā 1, 101. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. habil. sc. ing. Andrzej Katunin*,
Silēzijas Tehnoloģiju universitāte, Mašīnu pamatu dizaina institūts, Polija

Docents *Ph. D. Manuel Chiachio Ruano*,
Granadas Universitāte, Konstrukciju mehānikas un hidraulikas inženierzinātņu nodaļa,
Spānija

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing. Jānis Andersons*,
Latvijas Universitāte, Materiālu mehānikas institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Rims Janeliukštis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 102 attēli, 57 vienādojumi, 26 tabulas. Kopā 171 lappuse. Literatūras sarakstā ir 216 nosaukumu.

DOCTORAL THESIS PROPOSED TO RIGA TECHNICAL UNIVERSITY FOR THE PROMOTION TO THE SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCES

To be granted the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences, the present Doctoral Thesis has been submitted for the defence at the open meeting of RTU Promotion Council on 17 May 2019 at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 1 Paula Valdena Street, Room 101.

OFFICIAL REVIEWERS

Associate Professor Dr. habil. sc. ing. Andrzej Katunin
Silesian University of Technology, Poland

Docent Ph. D. Manuel Chiachio Ruano
University of Granada, Spain

Lead researcher Dr. sc. ing. Janis Andersons
University of Latvia

DECLARATION OF ACADEMIC INTEGRITY

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for the review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences is my own I confirm that this Doctoral Thesis has not been submitted to any other university for the promotion to a scientific degree.

Rims Janeliukštis (signature)

Date:

The doctoral thesis has been written in English. It comprises of Introduction; 6 chapters; Conclusions; 102 figures; 57 equations; 26 tables. The total number of pages is 171. The Bibliography contains 216 titles.

SATURS/CONTENT

IEVADS	7
Motivācija un kompetence.....	7
Promocijas darba mērķi	7
Promocijas darba uzdevumi.....	8
Zinātniskā novitāte	8
Promocijas darba praktiskā nozīmība.....	9
Pētījumu metodoloģija.....	9
Izstrādāto metožu lietojamības robežas	10
Promocijas darba aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	10
Promocijas darba struktūra	11
1. KONSTRUKCIJU BOJĀJUMU NOVĒRTĒJUMA TENDENCES	12
1.1. Uz svārstībām balstīta bojājumu identifikācija	12
1.2. Uz bojājumjutīgām iezīmēm balstīta uzraudzītā mašīnapmācība	12
2. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJAS ALGORITMI.....	13
2.1. Nepārtrauktā telpiskā veivletu transformācija	13
2.2. Normalizētās veivletu mērogrammas dispersija ar sliekšni	14
2.3. Pašsvārstību formu liekumu kvadrāts.....	15
2.4. Datu klasifikācija	16
3. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJA 1D KONSTRUKCIJĀS	17
3.1. Pirmais gadījums: alumīnija sijas ar frēzētiem iegriezumiem.....	17
3.2. Otrais gadījums: kompozīta lamināta sija ar trieciena bojājumu	21
4. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJA 2D KONSTRUKCIJĀS	23
4.1. Pirmais gadījums: alumīnija plātne ar frēzētu iegriezumu	23
4.2. Otrais gadījums: kompozīta lamināta sija ar trieciena bojājumu	25
5. UZ DEFORMĀCIJU IEZĪMJU UZRAUDZĪTO DAUDZKLAŠU KLASIFIKĀCIJU BALSTĪTS BOJĀJUMU MONITORINGS AR DEFektu LOKALIZĀCIJU DIVDIMENSIJU KONSTRUKCIJĀS	27
6. METODE AKUSTISKĀS EMISIJAS AVOTU ATDALĪŠANAI UN PĪĶA FREKVENČU NOBĪDES NOVĒRTĒŠANAI LIECES SLODZEI PAKĻAUTOS IEPRIEKŠ SASPRIEGTOS DZELZCEĻA DZELZSBETONA GULŠŅOS.....	32
SECINĀJUMI	39
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	42
INTRODUCTION	45
Motivation and Scope.....	45
Aims of the Thesis	45
Tasks of the Thesis	45
Scientific Novelty.....	46
Practical Significance of the Thesis.....	46
Methodology of the Research.....	47
Applicability Limitations of the Developed Methods	47

The Arguments for Defence of the Thesis.....	48
Structure of the Thesis	48
1. TRENDS IN STRUCTURAL DAMAGE ASSESSMENT.....	49
1.1. Vibration-Based Damage Identification.....	49
1.2. Supervised Learning Using Extraction of Damage-Sensitive Features.....	49
2. DAMAGE LOCALIZATION ALGORITHMS.....	50
2.1. Continuous Spatial Wavelet Transform	50
2.2. Thresholded Variance of Normalized Wavelet Scalogram	51
2.3. Mode Shape Curvature Square	52
2.4. Data Classification.....	53
3. DAMAGE LOCALIZATION IN 1D STRUCTURES	54
3.1. Case Study 1: Aluminium Beams With a Mill-Cut Damage.....	54
3.2. Case Study 2: Composite Laminate Beam With an Impact Damage	58
4. DAMAGE LOCALIZATION IN 2D STRUCTURES	60
4.1. Case Study 1: Aluminium Plate With a Mill-Cut Damage	60
4.2. Case Study 2: CFRP Beam With an Impact Damage.....	62
5. CONDITION MONITORING WITH DEFECT LOCALIZATION IN A TWO-DIMENSIONAL STRUCTURE BASED ON SUPERVISED MULTICLASS CLASSIFICATION OF STRAIN FEATURES.....	64
6. A NOVEL SEPARATION TECHNIQUE AND PEAK FREQUENCY SHIFT OF FLEXURAL LOADING-INDUCED ACOUSTIC EMISSION SOURCES IN RAILWAY PRE-STRESSED CONCRETE SLEEPERS	69
CONCLUSIONS	76
APPROBATION OF THE THESIS	79
LITERATŪRA/REFERENCES.....	82

IEVADS

Motivācija un kompetence

Gadu gaitā ir pieaugušas dažādu civilo un inženiertehnisko būvju drošības prasības. To galvenokārt var izskaidrot ar tādu konstrukciju, kā civilo būvju, debesskrāpju, tiltu, dambju, stadionu, tuneļu un rūpniecisko iekārtu, jūras un gaisa transporta pieaugošo sarežģītību un izmēriem. Šīm konstrukcijām ir arī jāsaglabā tehniskais stāvoklis un funkcionalitāte visā ekspluatācijas laikā pastāvīgi mainīgos vides apstākļos un, atsevišķos gadījumos, arī agresīvā vidē. Konstrukciju sabrukuma sekas bieži ir traģiskas un saistītas ar nopietniem finansiāliem ieguldījumiem.

Šo katastrofu novēršanai drošības pārbaudēm ir jābūt regulārām. Tomēr šīs pārbaudes bieži vien ir laikietilpīgas un dārgas, un tas paver iespēju jaunas un progresīvas pieejas – nesagraujošā konstrukciju tehniskā stāvokļa monitoringa (KTSM) attīstībai. KTSM lietojums ir aktuāls sarežģītu un masīvu konstrukciju, transportlīdzekļu un kosmisko kuģu ekspluatācijā. Viegļajās konstrukcijās, piemēram, lidmašīnās, arvien vairāk tiek izmantotas KTSM sniegtās priekšrocības, salīdzinot ar tradicionālo vizuālo apskati vai pat nesagraujošo kontroli. KTSM tehnoloģijas ir balstītas uz sensoriem (parasti pjezoelektriskas dabas vai optiskām šķiedrām), kas ir piestiprināti tieši pie konstrukcijas vai – slāņainu kompozītmateriālu konstrukciju gadījumā – iestrādātas pašā konstrukcijā. Sensoru nepārtraukto mērījumu dati tiek izmantoti, lai signalizētu par izmaiņām konstrukcijas tehniskajā stāvoklī, reaģējot uz vides slodzēm (temperatūru, spiedienu) vai tiešiem bojājumiem. Sistēmām, kas aprīkotas ar šādām tehnoloģijām, salīdzinot ar parastajām konstrukcijām, ir acīmredzamas priekšrocības sabrukuma novēršanā, infrastruktūras kalpošanas laika pagarināšanā, uzturēšanas izmaksu samazināšanā un kompozītmateriālu projektēšanā [1].

Promocijas darba mērķi

Lai gan jau pastāv daudzi KTSM risinājumi, kas speciāli pielāgoti kompozītmateriālu konstrukcijām, daži faktori kavē to iespējamo īstenošanu praksē. Tā iemesls ir kompozītmateriālu sarežģītība un fizikālo īpašību anizotropija. Turklāt dažādiem iespējamiem bojājumu veidiem kompozītmateriālu konstrukcijās var būt nepieciešama sarežģīta KTSM metožu pielāgošana. Arī augstās prasības attiecībā uz konstrukciju drošību nosaka augstus KTSM standartus attiecībā uz to paļāvību un noturību. Tāpēc šī promocijas darba mērķis ir izstrādāt bojājumu identifikācijas metodes viendimensiju un divdimensiju konstrukcijām, izmantojot pašsvārstību formu pārveidojumu metodes, kā arī uzraudzīto mašīnapmācību bojājumu raksturošanai dzelzceļa gulšņos un divdimensiju konstruktīvo elementu tehniskā stāvokļa monitoringam.

Promocijas darba uzdevumi

Mērķa sasniegšanai ir izvirzīti vairāki uzdevumi.

1. Zinātniskās literatūras par dažādām uz svārstībām un mašīnāpmācību balstītām KTSM metodēm izpēte.
2. Izstrādāt metodes konstrukciju bojājumu lokalizēšanai viendimensiju un divdimensiju konstrukcijās, izmantojot pašsvārstību formu pārveidojumus, balstītus uz jaunām nepārtrauktās veivletu transformāciju metodes modifikācijām un pašsvārstību formu liekumu kvadrātu.
3. Izstrādāt metodes bojājumu raksturošanai pilna izmēra iepriekš nospriegotos dzelzceļa dzelzsbetona gulšņos, izmantojot progresīvus signālapstrādes paņēmienus, kas balstīti uz akustiskās emisijas signālu uzraudzīto mašīnāpmācību.
4. Izstrādāt metodi masveidā ražotu divdimensiju konstruktīvo elementu tehniskā stāvokļa monitoringam ar iespējamu defekta lokalizāciju, izmantojot uzraudzītās mašīnāpmācības algoritmus.
5. Validēt izstrādātās metodes eksperimentālajos pētījumos.

Zinātniskā novitāte

Ir izstrādāts jauns konstruktīvo bojājumu lokalizācijas algoritms siju konstrukcijām, pamatojoties uz telpiskās nepārtrauktās veivletu transformācijas normalizētās mēroggrammas dispersiju. Šī algoritma priekšrocības ietver visu veivleta funkciju izmantošanu, tādējādi nav nepieciešams izvēlēties vispiemērotāko veivleta funkciju. Otrā šīs metodes priekšrocība ir tā, ka nav jāizvēlas konkrēts veivleta funkcijas mēroga parametrs. Šī jaunā metode tiek salīdzināta ar telpisko veivletu transformāciju un pašsvārstību formu liekuma kvadrāta metodēm, un ir izceltas tās priekšrocības.

Tika ierosināti pašsvārstību formu datu nogludināšanas paņēmieni nebojātas konstrukcijas pašsvārstību formu modelēšanai, izmantojot tikai bojātās konstrukcijas pašsvārstību formu datus. Tādējādi nav nepieciešama modālā informācija par nebojātu konstrukciju, ko bieži vien nav iespējams iegūt.

Izstrādāta akustisko emisiju avotu atdalīšanas metode iepriekš nospriegotiem dzelzsbetona dzelzceļa gulšņiem, pamatojoties uz uzraudzītās mašīnāpmācības algoritmiem. Atdalot šos avotus, iespējama katra avota izstaroto akustisko viļņu frekvenču satura tālāka pētīšana. Tiek pētīta korelācija pīķa frekvenču vērtību nobīdes lielumam līdz ar attālumu no lielākās plaisu koncentrācijas, kas savukārt ir akustiskās emisijas avoti.

Promocijas darba praktiskā nozīmība

Izstrādātās bojājumu lokalizācijas metodes siju un plātņu konstrukcijās ir piemērotas bojājumu pozīcijas atrašanai, izmantojot tikai bojātās konstrukcijas pašsvārstību formu datus. Tādējādi nav nepieciešamība pēc nebojātas konstrukcijas modālās informācijas (pašsvārstību formas un frekvences). Izstrādātās metodes var sekmīgi lietot bojājumu lokalizācijai, izmantojot pašsvārstību formas ar dažādas pakāpes trokšņu līmeņiem (vismaz 4 %) un dažādas pakāpes izšķirtspēju, tā simulējot sensoru blīvuma izmaiņas pašsvārstību formu mērījumos.

Izstrādāta metode akustisko emisiju avotu atdalīšanai pilna izmēra dzelzceļa dzelzsbetona gulšņos. Metodes lietojama izstaroto akustisko viļņu frekvenču satura pētīšanai dažādu bojājumu (plaisāšanas) pakāpju gadījumā. Konstatēts, ka plaisu koncentrācijas izmaiņas izraisa arī pīķa frekvenču izmaiņas jeb nobīdi. Šī informācija ir svarīga gulšņu tehniskā stāvokļa novērtēšanai, it īpaši kritiskākajās dzelzceļa līnijas pozīcijās, piemēram, pārmiju pārvedās un pārbrauktuves.

Uzraudzītās mašīnapmācības shēmas ir efektīvas konstrukciju īpašību izmaiņu, piemēram, masas un stinguma izmaiņu reģistrēšanai. Šī pieeja, kas izstrādāta masveidā ražotiem divdimensiju konstruktīvajiem elementiem (vēja turbīnu lāpstiņām, lidmašīnu spārniem u. c.), var tikt efektīvi izmantota aviācijā un kosmosa rūpniecībā, lai bojājumus atklātu, lokalizētu un potenciāli noteiktu arī bojājumu nopietnības pakāpi gaisa kuģu elementos, kas aprīkoti ar ierobežota blīvuma sensoru tīklu.

Pētījumu metodoloģija

- Pašsvārstību formu mērījumi tika veikti, izmantojot bezkontakta lāzera skenēšanas vibrometru *PolytecTM PSV-400-B*.
- Pašsvārstību formu signālu apstrāde un visi aprēķini tika veikti, izmantojot matemātisko paketi *MatlabTM*.
- Konstrukciju skaitliskie modeļi, kā arī skaitliskā modālā analīze tika veikta, izmantojot komerciālo galīgo elementu paketi *AnsysTM*.
- Trieciena bojājumi tika īstenoti, izmantojot trieciena torni *InstronTM Dynatup 9250 HV*.
- Dzelzceļa dzelzsbetona gulšņiem tika veikti trīspunktu lieces testi saskaņā ar Eiropas standartu BS EN 13230.
- Akustiskās emisijas signāli dzelzceļa dzelzsbetona gulšņos tika reģistrēti, izmantojot četru kanālu Fizikālās akustikas korporācijas (*PAC*, tagad – *Mistras*) *DAQ AE* sistēmu. Dati tika reģistrēti, izmantojot *AE-Win* programmatūru.
- Oglekļa šķiedras kompozītmateriāla plātnes mehāniskās deformācijas tika izmērītas, izmantojot divus 350 Ω deformāciju sensorus, un plātnes dinamiskā ierosme veikta, izmantojot *MFCTM* (*Macro Fiber Composites*) pjezoelektrisko ierosinātāju. *Agilent 3322A* 20 MHz signālu ģenerators tika izmantots plātnes harmoniskai ierosmei.

Spider 8 vadības bloks tika izmantots deformācijas signālu ierakstam, vizualizācijai tika izmantota *Catman* programmatūra.

- Datu pēcapstrādei tika izmantota statistikas teorija.

Izstrādāto metožu lietojamības robežas

- Izstrādātās konstruktīvo bojājumu lokalizācijas metodes ir piemērojamas tikai siju tipa (viendimensiju) un plātnes tipa (divdimensiju) konstrukcijas elementiem.
- Bojātas konstrukcijas pašsvārstību formu signāliem jābūt viegli pieejamiem bojājumu lokalizācijas algoritmu īstenošanai. Bojājumu lokalizācijas rezultāti uzlabojas, pieaugot metodēs izmantojamo pašsvārstību formu signālu skaitam, jo mazāka signālu skaita gadījumā ir lielāka varbūtība signāla nulles amplitūdai sakrist ar bojājuma vietu.
- Sakarā ar to, ka “vislabākā funkcija” iepriekš nav zināma, katrā atsevišķā gadījumā ir jāveic pārbaudes attiecībā uz visām pieejamām veivleta funkcijām pie dažādiem mēroga parametriem un visām Furjē aproksimācijas rindas kārtām, lai izvēlētos funkciju ar vislabāko veikspēju (bojājumu noteikšanas paļāvību).
- Ar izstrādātajām metodēm nav iespējams lokalizēt bojājumus konstrukciju pašās malās sakarā ar to, ka pašsvārstību formas šajās vietās nav nepārtrauktas (malu efekts).
- Praksē uz dzelzceļa gulšņiem var tikt uzstādīti tikai ierobežota skaita akustiskās emisijas sensori sakarā ar izmaksām un elektrisko kabeļu problēmām. Efektivitātes uzlabošanai sensorus uz gulšņiem ieteicams uzstādīt tikai visnozīmīgākajās dzelzceļa sliežu ceļa vietās, piemēram, pārmiju pārvedās un pārbrauktuves.
- Akustiskās emisijas pieejas augstā jutība pret troksni liecina par to, ka, lai izstrādātā metode nodrošinātu savlaicīgu brīdinājumu par bojājumiem, dzelzceļa gulšņiem darbības laikā ir jāsasniedz kāds “kritisks” plaisāšanas apmērs.

Promocijas darba aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Izstrādātas metodes konstruktīvo bojājumu lokalizācijai viendimensiju un divdimensiju konstrukcijās, izmantojot pašsvārstību formu pārveidojumus, kas balstīti uz uzlabotām telpisko veivletu transformācijas un pašsvārstību formu liekuma kvadrāta metodēm.
2. Izstrādāta metode bojājumu raksturošanai pilna izmēra iepriekš nospriegotos dzelzceļa dzelzsbetona gulšņos, izmantojot modernas signālu apstrādes metodes, kas balstītas uz akustisko emisiju signālu uzraudzīto mašīnapmācību.
3. Izstrādāta metode masveidā ražotu divdimensiju konstruktīvo elementu tehniskā stāvokļa monitoringam ar defektu lokalizācijas priekšrocību, izmantojot uzraudzītās mašīnapmācības algoritmus.
4. Izstrādātās metodes ir eksperimentāli validētas, un rezultāti liecina, ka konstrukciju bojājumi ir efektīvi lokalizēti.

Promocijas darba struktūra

1. nodaļa. Pārskats par konstrukciju tehniskā stāvokļa monitoringa tendencēm.

2. nodaļa. Izstrādāto bojājumu lokalizācijas algoritmu apraksts.

I DAĻA. Pašsvārstību formu pārveidojumi

3. nodaļa. Bojājumu lokalizācija siju konstrukcijās.

4. nodaļa. Bojājumu lokalizācija plātņu konstrukcijās.

II DAĻA. Bojājumjutīgo iezīmju klasifikācija

5. nodaļa. Tehniskā stāvokļa monitorings ar defektu lokalizāciju divdimensiju konstrukcijās, balstoties uz uzraudzīto daudzklasu klasifikāciju, izmantojot deformāciju iezīmes.

6. nodaļa. Akustiskās emisijas avotu raksturojums iepriekš nospriegotos dzelzceļa dzelzsbetona gulšņos, izmantojot klasifikācijas algoritmus.

Secinājumi.

1. KONSTRUKCIJU BOJĀJUMU NOVĒRTĒJUMA TENDENCES

Pašlaik 27 % no lidmašīnu ekspluatācijas cikla vidējām izmaksām tiek izlietas pārbaudēm un remontam. Aviācijas un kosmosa rūpniecībās arvien plašāk tiek izmantoti kompozītmateriāli to izcilo īpašību dēļ (īpatnējā stiprība, stingums, pretestība nogurumam, kā arī zināma aizsardzība pret noteikšanu ar radara palīdzību [2]). Diemžēl arī kompozīti ir pakļauti noārdīšanai laika gaitā, un bojājumi parādīsies to ekspluatācijas laikā novecošanās, ķīmiskās iedarbības, mehānisko svārstību, triecienu utt. dēļ [3]. Maza ātruma triecienu ietekmes izpēte ir svarīga kompozītmateriālu gadījumā, jo trieciens ir viens no galvenajiem kompozītmateriālu bojājumu veidiem virzienā perpendikulāri konstrukcijas plaknei [4].

Dzelzceļa betona gulšņi ir dzelzceļa sistēmas drošības sastāvdaļa. Neskatoties uz to, ka visā pasaulē ir vairāk nekā 1 miljards betona gulšņu, to tehniskā stāvokļa monitoringa sistēmas nav pilnībā izstrādātas. Dzelzceļa gulšņi ir konstruēti tā, lai pārnestu slodzi no sliedēm uz balastu un apakšstruktūru un nodrošinātu sliežu ceļa platumu vilcienu kustības laikā, lai novērstu sliežu kustību garenvirzienā un sānos. Divi galvenie bojājumu mehānismi ir betona plaisāšana stiepē un spiedē [5]. Avotā [6] minēts, ka gan cietām, gan salīdzinoši mīkstām dzelzceļa sliedēm sākotnēji rodas plaisas liecē. Līdz ar to efektīvas konstrukciju tehniskā stāvokļa monitoringa (KTSM) metodes ir svarīgas drošai konstrukciju darbībai.

1.1. Uz svārstībām balstīta bojājumu identifikācija

Viena no populārākajām KTSM metožu klasēm balstās uz konstrukciju svārstībām. Šo metožu izmantošana pamatota ar to, ka dinamiskās īpašības, proti, rezonanses frekvences, pašsvārstību formas un svārstību slāpēšanu ietekmē konstrukcijas stingums. Vairāki pētījumi [7]–[9] ir parādījuši, ka pašsvārstību formu pārveidojumi ir ļoti jutīgi pret bojājumiem un tos var izmantot bojājumu konstatēšanai un kvantitatīvai raksturošanai. Tomēr visnopietnākais šo metožu trūkums ir nepieciešamība pēc nebojātas konstrukcijas dinamisko parametru pamatdatiem, ko vairumā gadījumu ir grūti vai pat neiespējami iegūt.

1.2. Uz bojājumjutīgām iezīmēm balstīta uzraudzītā mašīnāpmācība

Attīstoties mašīnāpmācības koncepcijai, regresijas un klasifikācijas metodoloģiju izmantošana strauji izplatījās arī KTSM jomā, kur tās tiek veiksmīgi lietotas konstrukciju bojājumu konstatēšanā, lokalizācijā, bojājumu apmēru noteikšanā un, iespējams, konstrukcijas atlikušā lietošanas mūža novērtēšanā. Datu klasifikācijas algoritmiem ir potenciāls bojājumu noteikšanas metodoloģijās, kas balstītas uz bojājumjutīgo iezīmju iegūšanu no konstrukciju svārstību signāliem.

2. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJAS ALGORITMI

2.1. Nepārtrauktā telpiskā veivletu transformācija

Bojājumu indekss katrai pašsvārstību formai (2D) ir aprakstīts ar šādu izteiksmi:

$$DI_{i,j,s}^n = \iint_S w_{i,j}^n \psi_{s,a,b}^*(x,y) dx dy, \quad (2.1.)$$

kur w^n – izmērītais konstrukcijas pārvietojums šķērsvirzienā;
 ψ – veivleta funkcija;
 s – mēroga parametrs (paplašina vai sašaurina veivleta funkciju);
 a, b – pārvietojuma parametri (pārvieto veivleta funkciju atbilstoši pa x un y asi);
 n – pašsvārstību formas numurs;
 i – režģa punktu numurs pa x asi;
 j – režģa punktu numurs pa y asi;
 S – plātnes laukums, m^2 .

Zvaigznīte apzīmē kompleksi saistītu lielumu. Šie veivleta transformācijas koeficienti ir ļoti jutīgi pret jebkādam signāla nepārtrauktībām un singularitātēm, tāpēc bojājumus, ko izraisa pēkšņs stinguma zudums, var noteikt no tām pašsvārstību formām, kurām veivleta transformācijas koeficientu amplitūdas kādā konkrētā vietā sasniedz lielas vērtības.

Pašsvārstību formu signāli, ko mēra eksperimentālos apstākļos, vienmēr satur mērījumu troksni, kā rezultātā savukārt var rasties lielas bojājumu indeksa amplitūdas vietās, kur bojājuma nav, tādējādi maldinot datu interpretētāju. Šīs problēmas risinājumam tiek piedāvāts apkopotais bojājumu indekss, kas tiek definēts kā bojājumu indeksu summas pa visām pašsvārstību formām vidējās vērtības normalizēšana pret formas lielākās amplitūdas vērtību

$$DI_{i,j,s} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{DI_{i,j,s}^n}{\max(DI_{i,j,s}^n)}, \quad (2.2.)$$

kur N – kopējais pašsvārstību formu skaits.

Saskaņā ar [10], [11] šie bojājumu indeksi tiek standartizēti, un statistiskās hipotēzes pārbaude tiek izmantota, lai klasificētu bojātos un nebojātos elementus un lokalizētu bojājumus atkarībā no iepriekš noteiktās bojājumu sliekšņa vērtības, iegūstot standartizēto bojājumu indeksu (SBI)

$$SDI_{i,j,s} = \frac{DI_{i,j,s} - \mu_s}{\sigma_s}, \quad (2.3.)$$

kur μ_s – no mēroga parametra atkarīga bojājumu indeksu $DI_{i,j,s}$ vidējā vērtība;

σ_s – no mēroga parametra atkarīga bojājumu indeksu $DI_{i,j,s}$ standartnovirze.

Promocijas darbā tiek ieviests jauns bojājumu lokalizācijas metožu snieguma novērtējums – bojājumu novērtējuma paļāvība (BNP). BNP ir attiecība (izteikta procentos) starp standartizētā bojājumu indeksa vērtību summu bojājumu zonā un šo vērtību summu pa visu konstrukciju.

2.2. Normalizētās veivletu mēroggrammas dispersija ar sliekšni

Trīsdimensiju diagrammas, kas parāda NVT koeficientu lielumu atkarībā no dažādiem mēroga parametriem un laiku vai telpu, ir veivletu mēroggrammas [12], [13]. Tomēr bojājumu noteikšanā plašāk izplatīta ir normalizētā veivletu mēroggramma (NVM)

$$NWS_{s,a(i)} = \left| \frac{W_{s,a(i)}}{s} \right|^2. \quad (2.4.)$$

NVM lielas amplitūdas apgabali atbilst signāla iezīmēm ar vislielāko enerģiju un norāda bojājuma vietu telpiskās NVT gadījumā.

Šīs metodes bojājumjutīgais parametrs tiek definēts kā normalizētās veivletu mēroggrammas dispersija attiecībā pret mēroga parametru un izteikts šādi:

$$S_{a(i)} = \sigma^2(NWS_{s,a(i)}, s). \quad (2.5.)$$

Universālais sliekšnis tiek definēts kā:

$$T = \sigma \sqrt{2\ln(A)} = \frac{MAD}{0,6745} \sqrt{2\ln(A)} = \frac{\text{Median}|S_{a(i)} - \text{Median}(S_{a(i)})|}{0,6745} \sqrt{2\ln(A)}, \quad (2.6.)$$

kur σ – lieluma $S_{a(i)}$ trokšņa standartnovirze;

A – pašsvārstību formas signāla brīvības pakāpju skaits;

MAD – mediānas absolūtā novirze.

Universālais sliekšnis tiek lietots dispersijas sadalījumam statistiski nenoīmīgu pīķu filtrēšanai. $S_{a(i)}$ vērtībām, kas nepārsniedz sliekšņa T vērtību, tiek piešķirta vērtība 0, pretējā gadījumā – vērtība 1, iegūstot *normalizētās veivletu mēroggrammas dispersiju ar sliekšni*

$$\begin{aligned} \text{ja } (S_{a(i)} \geq T) &\rightarrow TS_{a(i)} = 1, \\ \text{citādi } &\rightarrow TS_{a(i)} = 0, \end{aligned} \quad (2.7.)$$

$TS_{a(i)}$ vērtības tiek saskaitītas visām veivleta funkcijām katrai brīvības pakāpei i , iegūstot *apkopoto normalizētās veivletu mēroggrammas dispersiju ar sliekšni*

$$\Lambda_{a(i)} = \sum_{j=1}^{78} TS_{a(i),j} \quad (2.8.)$$

Lieluma $\Lambda_{a(i)}$ visas i vērtības tiek saskaitītas, iegūstot *kopējo normalizētās veivletu mēroggrammas dispersiju ar sliekšni*

$$\Theta = \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^{78} TS_{a(i),j} = \sum_{i=1}^A \Lambda_{a(i)}. \quad (2.9.)$$

Izsakot $\Lambda_{a(i)}$ procentuāli kā daļu no Θ katram i , tiek iegūta *daļveida normalizētās veivletu mēroggrammas dispersija ar sliekšni*

$$Z_{a(i)} = 100 \cdot \Lambda_{a(i)} / \Theta. \quad (2.10.)$$

Universālais sliekšnis (apzīmēts ar T_2 atšķiršanai no sliekšņa, kas piemērots $S_{a(i)}$) tiek izmantots vērtībām $Z_{a(i)}$, un tiek lietota loģiskā funkcija tāpat kā 2.7. izteiksmē

$$\begin{aligned} \text{a } (Z_{a(i)} \geq T_2) &\rightarrow TZ_{a(i)} = 1, \\ \text{citādi } &\rightarrow TZ_{a(i)} = 0. \end{aligned} \quad (2.11.)$$

Galīgais lēmums attiecībā uz bojājuma atrašanās vietu tiek balstīts uz tām koordinātēm x (saistītas ar i), kas atbilst tām $Z_{a(i)}$ vērtībām, kas pārsniedz universālo sliekšni T_2 .

2.3. Pašsvārstību formu liekumu kvadrāts

Realitātē nebojātas konstrukcijas dinamiskie raksturlielumi ir reti pieejami, īpaši konstrukcijām, kas jau ir ekspluatācijā. Šajā promocijas darbā tiek demonstrēts paņēmieni nebojātas konstrukcijas tehniskā stāvokļa novērtēšanai, izmantojot bojātas konstrukcijas pašsvārstību liekuma datu aproksimāciju ar Furjē rindu vienā dimensijā, iegūstot gludu pašsvārstību formu liekuma līknes. Furjē rindas trigonometriskā forma ir

$$\kappa(x) = a_0 + \sum_{i=1}^u a_i \cos(u\omega x) + b_i \sin(u\omega x), \quad (2.12.)$$

kur a_0 – konstante;

ω – signāla fundamentālā frekvence;

u – summas kārtā jeb harmoniku skaits.

Šajā promocijas darbā lietotais Furjē rindas harmoniku skaits ir 1–8. Piedāvātais bojājumu lokalizācijas algoritms tiek vispārināts arī uz divu dimensiju konstrukcijām (plātnēm). Veselas konstrukcijas pašsvārstību formas liekumam ir gluda virsma, ko divās dimensijās iegūst ar polinomiālo aproksimāciju. Šī procedūra tiek veikta, izmantojot bojātas konstrukcijas pašsvārstību formu liekumu aproksimāciju ar mazāko kvadrātu metodi. Bojājumu indekss $DI_{i,j}^n$ tiek definēts kā absolūtā starpība starp bojātās konstrukcijas izmērītā liekuma kvadrātu un bojātās konstrukcijas pašsvārstību formas liekuma aproksimācijas ar Furjē rindas (vai polinomu 2D) rekonstrukciju, kas raksturo nebojātu konstrukciju.

$$DI_{i,j}^n = \left| \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial x^2} \right)_{(i,j)} - \kappa_x^{n^2}(i,j) \right| + \left| \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial y^2} \right)_{(i,j)} - \kappa_y^{n^2}(i,j) \right|, \quad (2.13.)$$

kur κ_x^n un κ_y^n – rekonstruētie pašsvārstību formu liekumi atbilstoši pa x un y asi, m^{-2} .

Pašsvārstību formu liekumi tiek aprēķināti no pašsvārstību formām, izmantojot centrālās differences aproksimāciju režģa punktā (i, j) :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial x^2} \right)_{(i,j)} &= \frac{w_{i+1,j}^n - 2w_{i,j}^n + w_{i-1,j}^n}{h^2}; \\ \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial y^2} \right)_{(i,j)} &= \frac{w_{i,j+1}^n - 2w_{i,j}^n + w_{i,j-1}^n}{h^2}; \end{aligned} \quad (2.14.)$$

kur h – attālums starp diviem mērījumu punktiem vai režģa mezgliem, m .

Apkopotais bojājumu indekss tiek aprēķināts pēc 2.2. izteiksmes un standartizēts pēc 2.3. izteiksmes. Tiek aprēķinātas arī BNT vērtības katrai Furjē aproksimācijas funkcijai.

2.4. Datu klasifikācija

Šajā promocijas darbā izstrādātas metodes divdimensionālo konstruktīvo elementu bojājumu monitoringam, izmantojot sensoru datus. Algoritma realizācijā izmantoti šādi soļi:

- 1) tiek veikta konstruktīvā elementa harmoniskā analīze rezonanses frekvenču noteikšanai;
- 2) elements, kam piestiprināts ierosinātājs, tiek sadalīts patvaļīga skaita zonās (zonas tiek izmantotas kā klašu apzīmējumi), un punktveida masa tiek pielikta katrā zonā ar patvaļīgu reižu skaitu;
- 3) katrā masas pielikšanas momentā tiek ierakstītas harmoniskā ierosmes spēka izraisītās mehāniskās deformācijas ε ar deformāciju sensoriem. Ir zināms, ka papildu masa izraisa konstrukcijas rezonanses frekvenču pīķu nobīdi attiecībā pret gadījumu bez papildu masas. Deformāciju amplitūdas samazināsies proporcionāli frekvenču nobīdes apmēram, tā brīdinot par konstruktīvām izmaiņām apskatāmajā elementā;
- 4) ierakstītie deformāciju dati tiek grupēti atsevišķās matricās katrai identificētai rezonanses frekvencei

$$\begin{array}{cc} \text{pirmā frekvence} & \text{pēdējā frekvence} \end{array} \quad (2.15.)$$

$$\left(\begin{array}{ccc} \{1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_2\}_{m \times 1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \{n\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_2\}_{m \times 1} \end{array} \right)_{n \times k+1} \quad \left(\begin{array}{ccc} \{1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_2\}_{m \times 1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \{n\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_1\}_{m \times 1} & \{\varepsilon_2\}_{m \times 1} \end{array} \right)_{n \times k+1}$$

kur m – deformāciju punktu skaits katrā klasē;

n – konstrukcijas zonu skaits;

k – deformāciju sensoru skaits uz konstrukcijas.

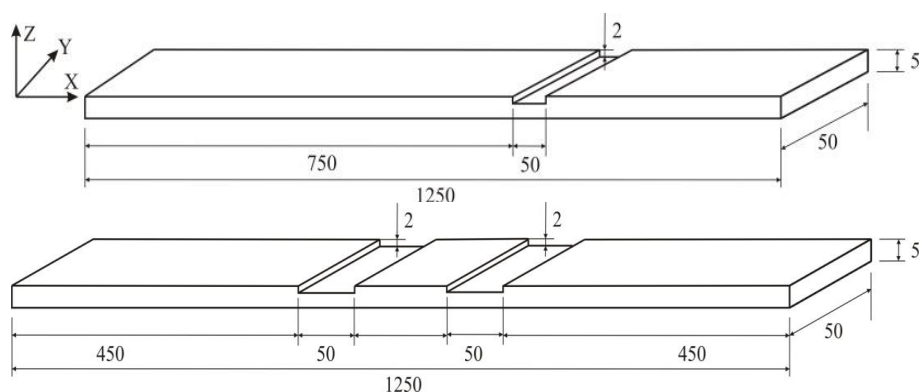
Figūriekavas norāda vektoriālos lielumus;

- 5) tiek izmantoti divi dažādi uzraudzītās mašīnāpmācības algoritmi – lineārais un nelineārais diskriminants k tuvākie kaimiņi klasifikācijas modeļu izveidei, izmantojot ierakstītos deformāciju datus atsevišķi katrai rezonanses frekvencei. Vispārīgā gadījumā var tikt izmantoti arī citi uzraudzītās mašīnāpmācības algoritmi;
- 6) klasifikācijas modeļu parametru optimizēšanai izmantota K reižu šķērsvalidācijas shēma;
- 7) algoritma validācijai izmantoti jauni deformāciju datu punkti nezināmās vietās. Algoritma rezultāti ir demonstrēti defektu lokalizācijas prognožu varbūtību veidā katrai konstrukcijas zonai, norādot varbūtību nezināmajam datu punktam, atrastam kādā no konstrukcijas zonām.

3. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJA 1D KONSTRUKCIJĀS

3.1. Pirmais gadījums: alumīnija sijas ar frēzētiem iegriezumiem

Visi skaitliskie modeļi šajā promocijas darbā izveidoti, izmantojot komerciālo galīgo elementu (GE) programmu *AnsysTM*. Alumīnija siju ģeometriskā konfigurācija parādīta 3.1. attēlā. Aplūkotas divas sijas ar atbilstoši vienu un diviem frēzētiem iegriezumiem. Alumīnija siju GE modelis sastāv no 2D siju elementiem. Bojājums tiek modelēts, samazinot izvēlēto elementu lieces stingumu EI , kas tiek panākts, samazinot elementu biezumu.



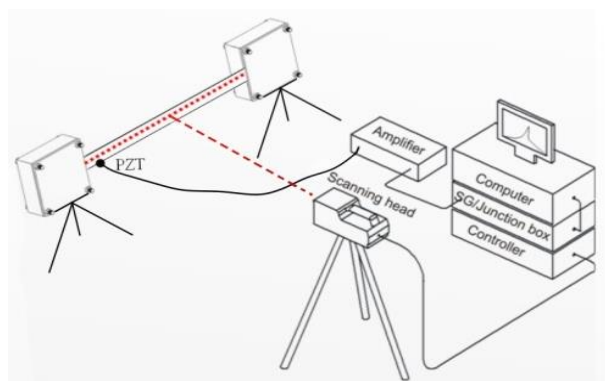
3.1. att. Alumīnija siju ģeometrija (mm).

Bojājumu identifikācijas algoritma jutības salīdzināšanai ar troksni saturošajiem eksperimentāliem datiem, skaitliski simulētajām pašsvārstību formām tika pielikts vienmērīgi sadalīts gadījuma troksnis. Bieži konstrukciju nav iespējams aprīkot ar blīvu sensoru tīklu, tādējādi tika veikts parametriskais pētījums par pašsvārstību formu izšķirtspējas ietekmi uz bojājumu noteikšanas rezultātiem, pašsvārstību formu signālu izdalot ar veseliem skaitļiem $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Bojājumu lokalizēšanas procedūra, izmantojot visus trīs algoritmus (NVT, PFLK un NVMDs), tiek veikta, simulētajām pašsvārstību formām pieliekot troksni ar līmeņiem $\delta = 0,5 \%, 1 \%, 2 \%$ un 4% .

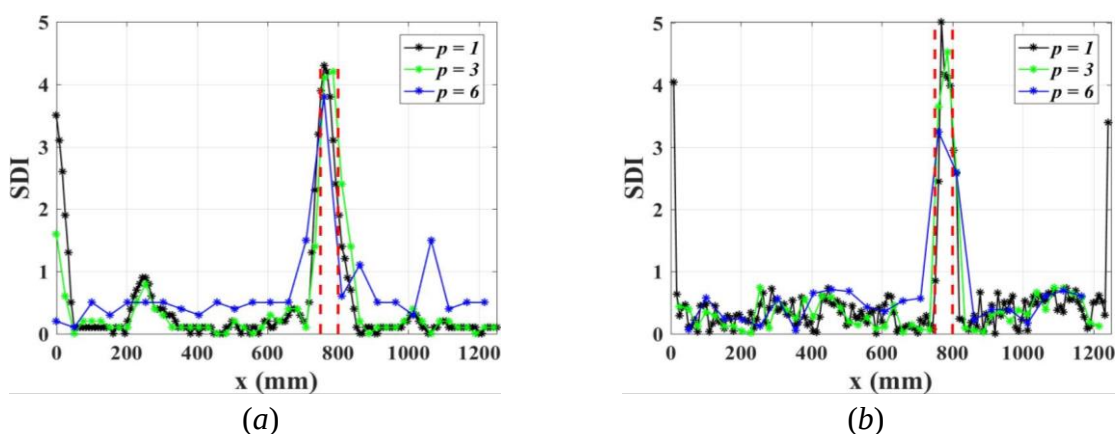
Bojātām un nebojātām sijām tiek veikts dinamiskais svārstību tests pašsvārstību formu mērījumiem. Šīs izmērītās formas tiek lietotas saskaņā ar iepriekš aprakstītajām metodēm. Eksperimentālā modālā analīze tiek veikta, izmantojot bezkontakta skenējošo vibrometru *PolytecTM* PSV-400-B (3.2. att.).

Bojājumu noteikšanas paļāvības (BNP) vērtības tika aprēķinātas visām 78 veivletu funkcijām, katrai pie 128 mēroga parametriem. Analizējot BNP atkarību no mēroga parametra, tika atlasītas tās mēroga parametru vērtības, pie kurām tika sasniegts BNP maksimums, kā arī atbilstošā veivletu funkcija. Līdzīgā veidā analizētas arī dažādu kārtu Furjē aproksimācijas funkcijas. Tika izvēlēta kompleksā *morlet* veivletu funkcija ar kārtu 1-1 (*cmor1-1*) gan eksperimentā, gan simulācijas gadījumā abām alumīnija sijām. PFLK metodē tika izvēlēta aproksimācijas funkcija F5 sijai ar vienu bojājumu un F3 sijai ar diviem bojājumiem.



3.2. att. Eksperimentālās modālās analīzes uzstādījumi, izmantojot bezkontakta skenējošo lāzera vibrometru.

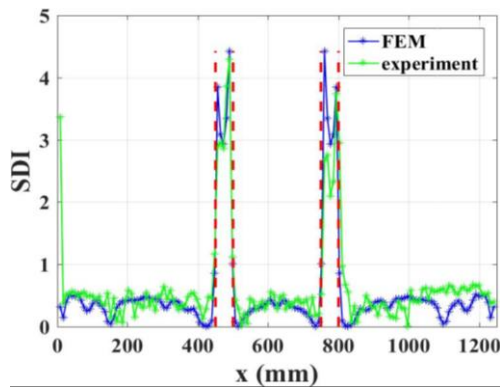
Standartizētā bojājumu indeksa (SBI) sadalījumi pa siju ar vienu bojājumu pie mēroga parametriem, kas atbilst BNP maksimumam, NVT un PFLK metodēm attēloti 3.3. attēlā. Augstākais pīķis atrodas tieši bojājuma vietā, tādējādi bojājums ir lokalizēts, tomēr liela indeksa amplitūda novērojama arī sijas malās.



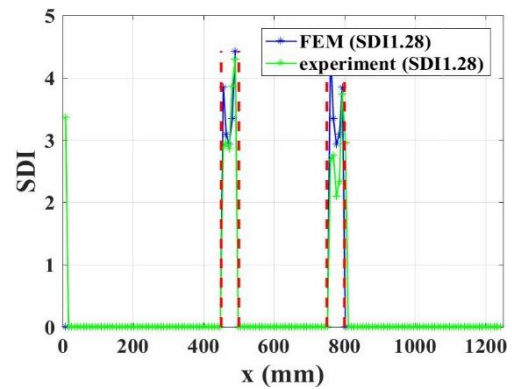
3.3. att. SBI sadalījums alumīnija sijai ar vienu bojājumu pie $p = 1, 3, 6$ (eksperiments):
(a) NVT; (b) PFLK.

SBI sadalījums alumīnija sijai ar diviem bojājumiem PFLK metodei parādīts 3.4. attēlā, NVT metodei – 3.5. attēlā. NVT metodes gadījumā visi SBI sadalījumi parādīti pie references mēroga parametra 6, jo tieši pie šādas vērtības iegūts BNP maksimums pie sākotnējās pašsvārstību formu izšķirtspējas $p = 1$. Pie $p = 1$ augstākie SBI pīķi pārliecinoši atrodas bojājumu zonā, savukārt pie $p = 3$ SBI ir “izsmērēti” gar sijas koordināti, kā rezultātā bojājums nav lokalizēts. Pie šīs pašsvārstību formu izšķirtspējas vislabākie lokalizācijas rezultāti sasniegti, izmantojot mēroga parametru 3, kas noteikts no BNP atkarības no mēroga parametra.

Izmantojot statistiskās hipotēzes pieeju ar bojājumu lokalizācijas ticamību 99 % (atbilst SBI sliekšņa vērtībai 3), SBI vērtības, kas mazākas par 3, tiek atfiltrētas kā statistiski nenozīmīgas un ar bojājumu nesaistītas.

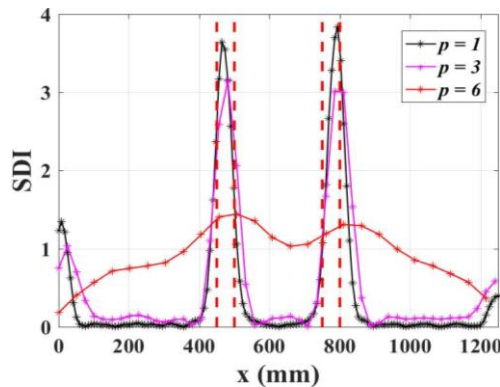


(a)

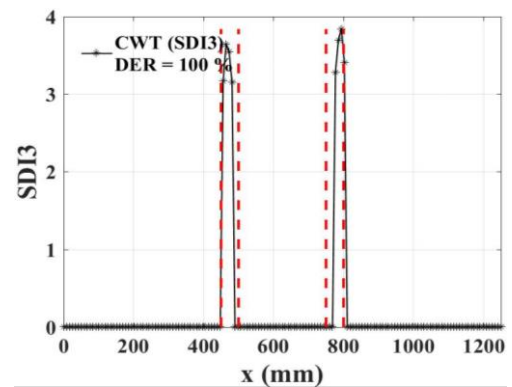


(b)

3.4. att. SBI sadalījums PFLK metodei alumīnija sijai ar diviem bojājumiem: (a) bez sliekšņa; (b) sliekšnis ar 90 % bojājuma noteikšanas ticamību.



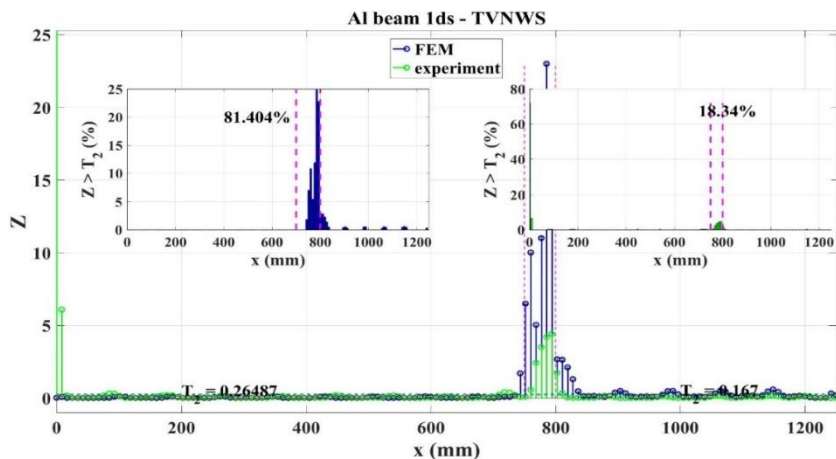
(a)



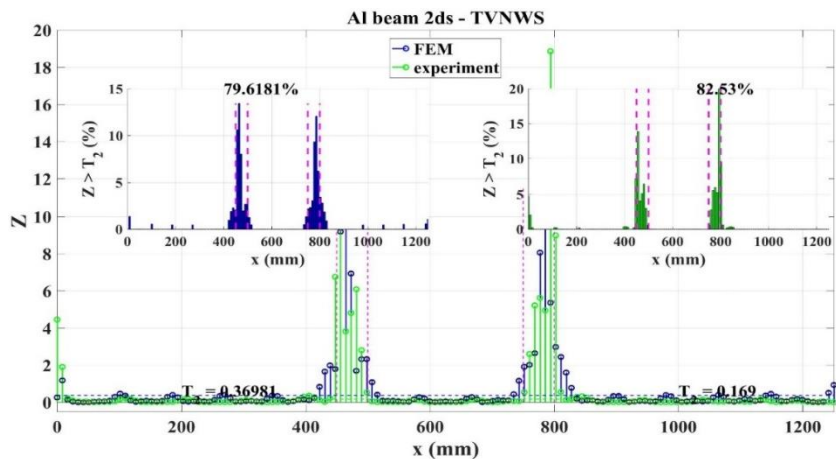
(b)

3.5. att. SBI sadalījums alumīnija sijai ar diviem bojājumiem NVT metodei pie mēroga parametra 6 (eksperiments): (a) bez sliekšņa; (b) sliekšnis ar 99 % bojājuma noteikšanas ticamību.

Bojājumu lokalizācijas rezultāti ar NVMDs metodi alumīnija sijai ar vienu bojājumu parādīti 3.6. attēlā, sijai ar diviem bojājumiem – 3.7. attēlā. Daļveida veivletu mēroggrammas parāda vislielāko normalizētās veivletu mēroggrammas dispersijas amplitūdu starp raustītām vertikālām līnijām – bojājumu zonā. Universālo sliekšni izmantojot atkārtoti (T_2), šīs vērtības tiek atfiltrētas, un tās vērtības, kas sliekšni pārsniedz, attēlotas iekšējos grafikos. Šiem iekšējiem grafikiem ir aprēķinātas un parādītas atsevišķas BNT vērtības.



3.6. att. Bojājumu indekss NVMDs metodei alumīnija sijai ar vienu bojājumu.

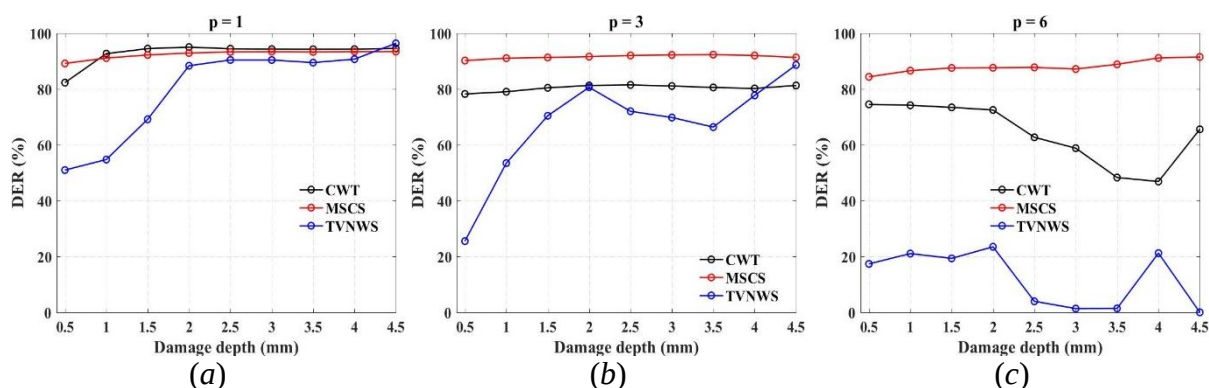


3.7. att. Bojājumu indekss NVMDs metodei alumīnija sijai ar diviem bojājumiem.

Izstrādāto bojājumu lokalizācijas metožu jutība ir pārbaudīta attiecībā uz bojājuma dziļumu. Šim parametriskajam pētījumam izmantotas skaitliski simulētas pašsvārstību formas alumīnija sijai ar vienu bojājumu. Aplūkoti bojājumi ar dziļumu, sākot no 0,5 mm līdz 4,5 mm ar 0,5 mm soli sijai ar biezumu 5 mm.

Vienlaikus tika novērtēta arī sensoru blīvuma (p) ietekme uz bojājumu lokalizācijas rezultātiem. BNP vērtības gadījumiem ar $p = 1, 3, 6$ ir parādītas 3.8. attēlā. Visstabilākie rezultāti iegūti, izmantojot PFLK metodi ar BNP vērtībām, kas visos gadījumos ir salīdzinoši šaurā intervālā – no 83 % līdz 93 %. Ar NVMDs metodi iegūtie rezultāti nav stabili – novērotas ievērojamas BNP vērtību izmaiņas. No vienas puses, augstas BNP vērtības (pielīdzināmas ar NVT un PFLK metodēm iegūtajām) iegūtas gadījumos ar dziļiem bojājumiem un blīvu sensoru tīklu. No otras puses, šī metode ir ārkārtīgi jutīga attiecībā uz sensoru blīvuma un bojājuma dziļuma izmaiņām ar būtisku veikspējas pasliktināšanos atsevišķos gadījumos. Veikspējas ziņā NVT un PFLK metodes ir līdzīgas, tomēr NVT metode uzrāda zemāku veikspējas stabilitāti, mainoties bojājumu dziļumam pie mazākiem sensoru blīvumiem.

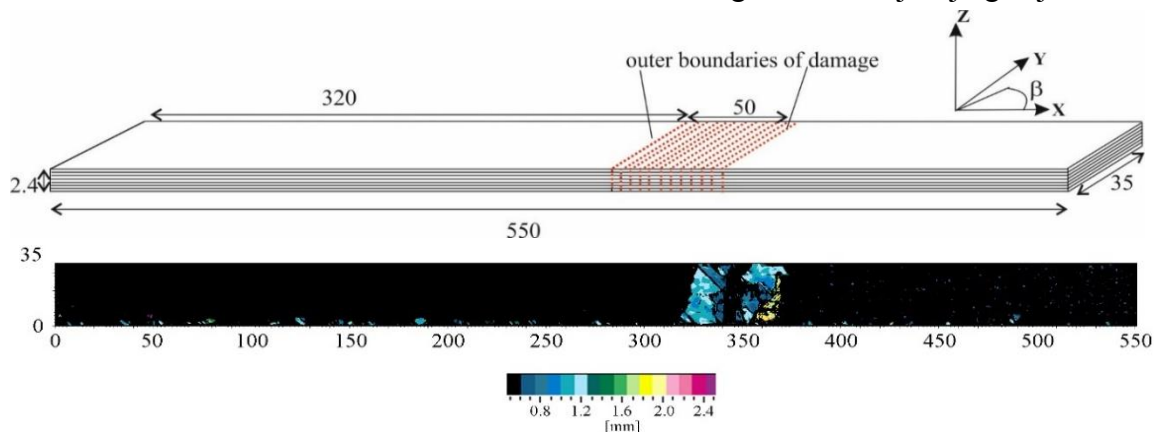
Kopumā izstrādātās bojājumu lokalizācijas metodes, izņemot NVMDs, ir adekvātas bojājumu lokalizācijai arī salīdzinoši seklu bojājumu un maza sensoru blīvuma gadījumos.



3.8. att. Bojājuma dziļuma un sensoru blīvuma ietekme uz BNP vērtībām alumīnija sijai ar vienu bojājumu visām izstrādātajām bojājumu lokalizācijas metodēm (simulācija): (a) $p = 1$; (b) $p = 3$; (c) $p = 6$.

3.2. Otrais gadījums: kompozīta lamināta sija ar trieciena bojājumu

Promocijas darbā aplūkota oglekļa šķiedras epoksīda lamināta sija, kas redzama 3.9. attēlā. Tika veikts zema ātruma trieciena tests ar trieciena enerģiju 15 J, izmantojot *INSTRON Dynatup 9250 HV* trieciena torni. Ar sarkanu krāsu iekrāsotā zona attēlo trieciena zonu, balstoties uz ultraskaņas testa rezultāta ārējām robežām – pieņemts, ka bojājums atrodas starp 320 mm un 370 mm. Lamināta klājumu shēma ir $[0/90/+45/-45]_s$ ar slāņa biezumu 0,3 mm (visas sijas biezums ir 2,4 mm). GE modelis sastāv no 2D siju elementiem. Stinguma samazinājums bojājuma zonā veikts, samazinot elastības moduli. Dinamiskais svārstību tests veikts analogiski alumīnija siju gadījumam.

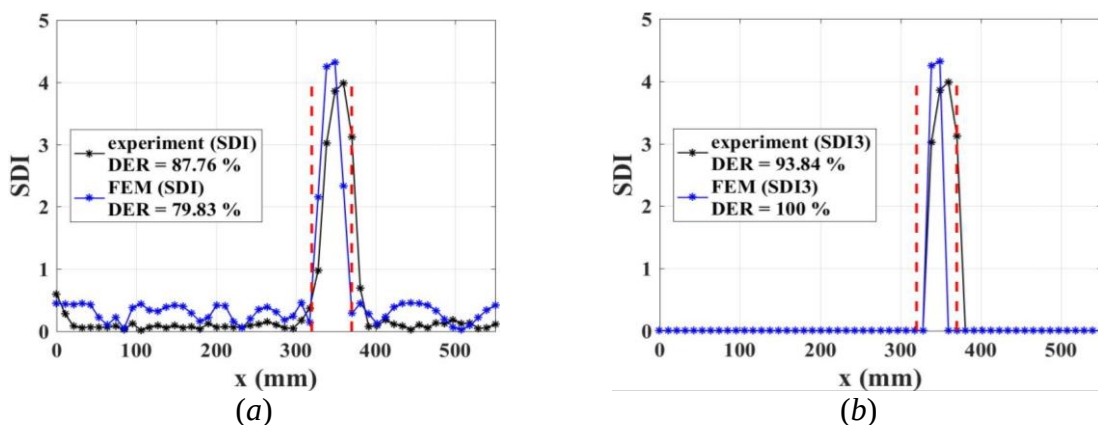


3.9. att. Bojātas oglekļa šķiedras lamināta sijas ģeometrija (mm) un ultraskaņas signāla dziļums pa sijas virsmu.

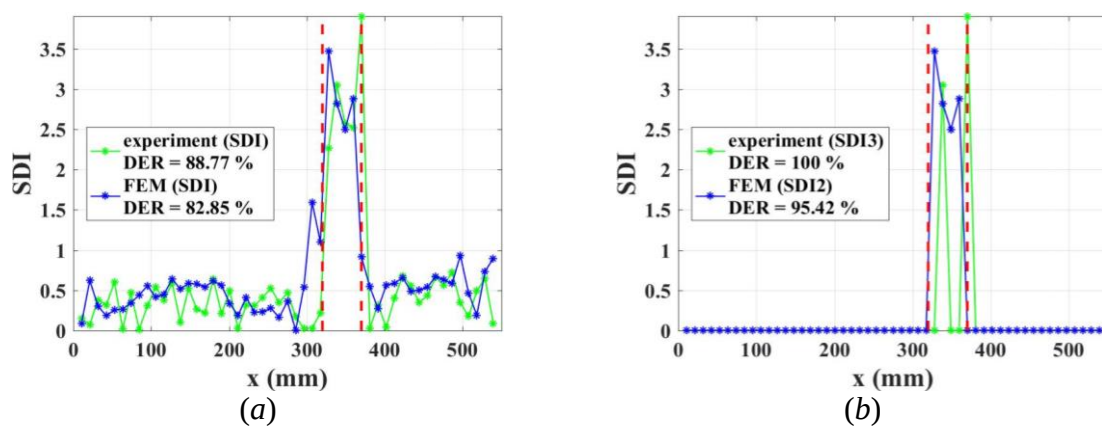
Veivleta funkcija ar vislabāko veiktspēju šajā gadījumā ir kompleksā gausa funkcija ar kārtu 5 (*cgau5*) pie mēroga parametra 2 eksperimenta gadījumā, un atgriezeniskais biortogonālais veivlets ar kārtu 3.1 (*bior3.1*) pie mēroga parametra 9 simulāciju gadījumā. PFLK metodē vislabākā aproksimācija iegūta ar 4. kārtas Furjē rindu (F4).

Bojājuma lokalizācijas rezultāti ar abām metodēm (NVT un PFLK) attēloti 3.10. un 3.11. attēlā. Bojājums ir sekmīgi lokalizēts ar abām metodēm, jo augstākais pīķis (arī pēc sliekšņa pielikšanas) atrodas bojājuma zonā starp vertikālajām līnijām. Nenožīmīgie pīķi tiek

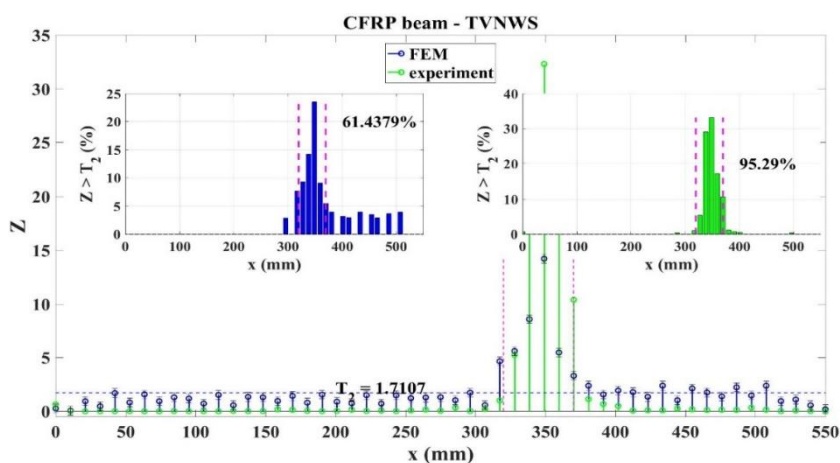
atfiltrēti, izmantojot SBI sliekšņus. Tāpat bojājums lokalizēts, izmantojot NVMDS metodi, kā parādīts 3.12. attēlā.



3.10. att. SBI oglekļa šķiedras kompozīta sijai ar trieciena bojājumu, izmantojot NVT metodi: (a) bez sliekšņa; (b) ar sliekšni 3 (99 % bojājumu lokalizācijas ticamība).



3.11. att. SBI oglekļa šķiedras kompozīta sijai ar trieciena bojājumu, izmantojot PFLK metodi: (a) bez sliekšņa; (b) ar sliekšni 3 un 2 (99 % un 95 % bojājumu lokalizācijas ticamība).

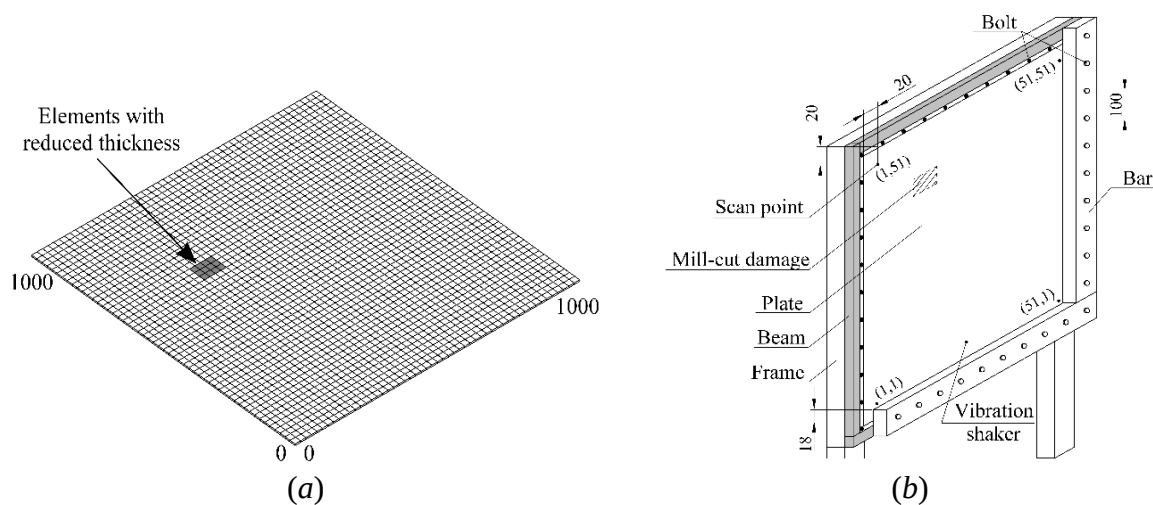


3.12. att. Bojājumu indekss NVMDS metodei oglekļa šķiedras kompozīta sijai ar trieciena bojājumu.

4. BOJĀJUMU LOKALIZĀCIJA 2D KONSTRUKCIJĀS

4.1. Pirmais gadījums: alumīnija plātne ar frēzētu iegriezumu

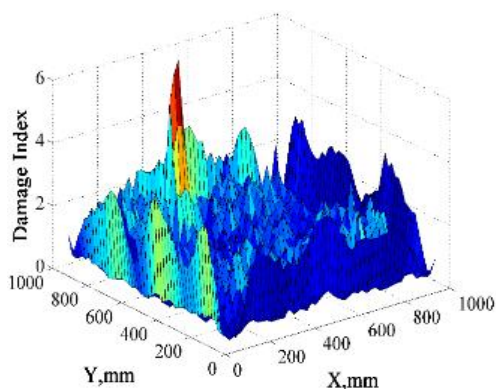
Promocijas darbā aplūkota kvadrātveida alumīnija plātne ar izmēriem 1000 mm × 1000 mm un biezumu 5 mm. Plātnes GE modelis sastāv no 8 mezglu čaulu elementiem, kas ir deformējami bīdē. Bojājums modelēts, samazinot izvēlēto elementu biezumu. Iegriezums ar dziļumu 2 mm ir ieviests apgabalā $270 \text{ mm} \leq x \leq 350 \text{ mm}$ un $640 \text{ mm} \leq y \leq 700 \text{ mm}$, kas veido 0,48 % no plātnes laukuma (4.1. att. (a)).



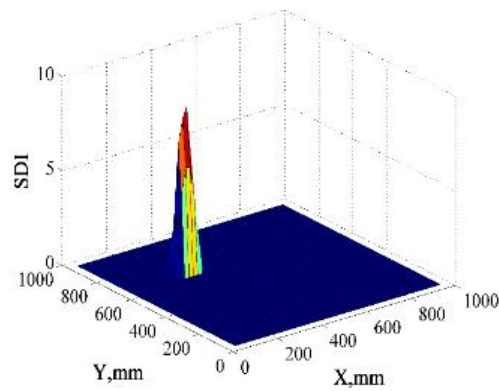
4.1. att. Alumīnija plātne ar bojājumu: (a) GE modelis ar bojājuma atrašanās vietu; (b) iespīlējuma robežnosacījumi dinamiskajam svārstību testam.

Tika simulētas pašsvārstību formas ar trokšņa līmeņiem $\delta = 1 \%, 0,5 \%, 0,1 \%, 0,05 \%$. Praksē pašsvārstību formas var tikt izmērītas tikai ar ierobežotu sensoru skaitu, tādējādi tika pārbaudīta metodes jutības attiecībā uz samazinātu pašsvārstību formu izšķirtspēju, sākotnējo pašsvārstību formu signālu ar izmēriem 51×51 datu punkti, izdalot ar veseliem skaitļiem $p = 1, 2, 3, 4, 5$. Eksperimentālā modālā analīze veikta, izmantojot iespīlējuma robežnosacījumus, iespīlējot plātni speciāli izveidotā alumīnija rāmī (4.1. att. (b)).

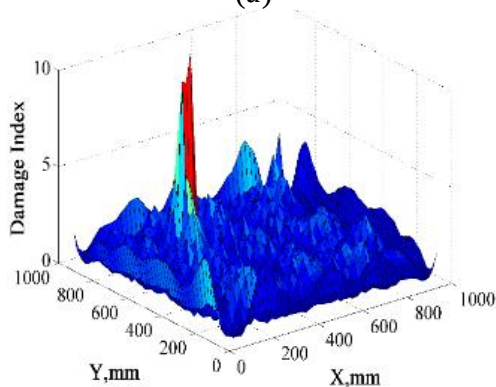
Bojājuma lokalizācijas rezultāti eksperimentam un simulācijām pie trokšņa līmeņa $\delta = 0,5 \%$, izmantojot sākotnējo pašsvārstību formu signālu, ir doti 4.2. attēlā (a), (c). Redzams, ka bez galvenā pīķa bojājumu indeksu profilos ir arī mazāki pīķi. Statistikās hipotēzes lietošanai standartizētā bojājumu indeksa vērtības, kas mazākas par 3, tiek pielīdzinātas nullei, kas atbilst 99 % bojājumu lokalizācijas ticamībai. Rezultātā iegūts pīķis tieši bojājuma atrašanās vietā, to lokalizējot. Šie rezultāti parādīti 4.2. attēlā (b), (d).



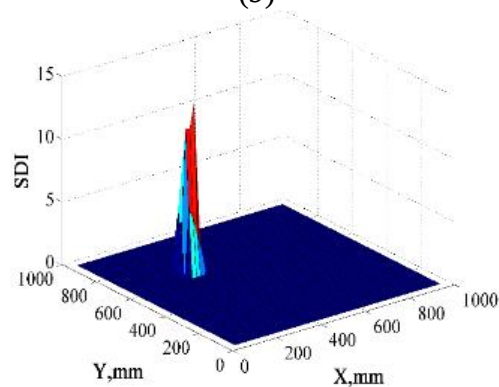
(a)



(b)



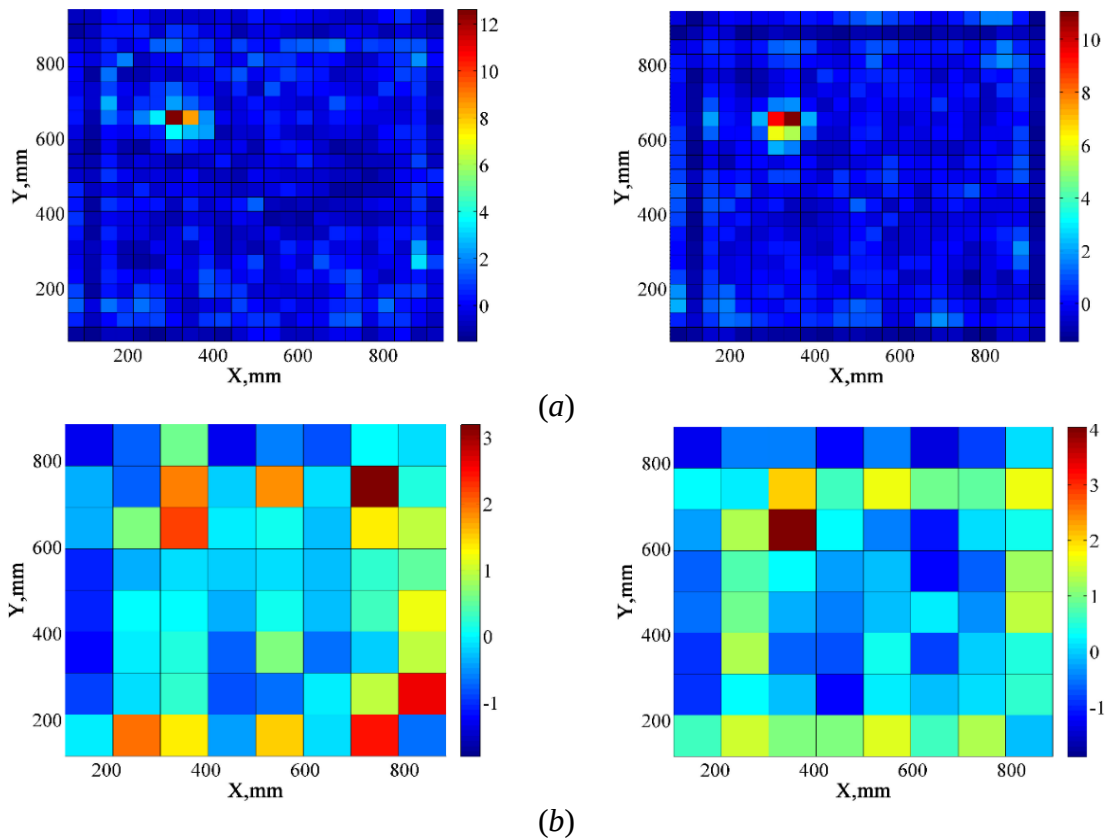
(c)



(d)

4.2. att. Bojājumu indeksi alumīnija plātnei ar bojājumu: (a) bez standartizācijas (eksperiments); (b) SBI ar 99 % ticamību (eksperiments); (c) bez standartizācijas (simulācija); (d) SBI ar 99 % ticamību (simulācija).

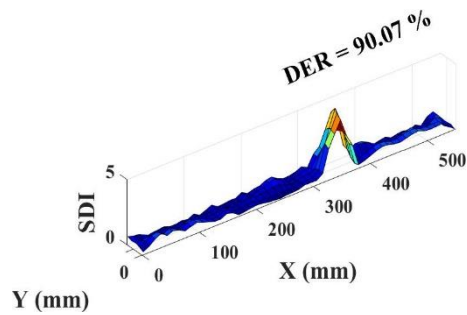
Standartizēto bojājumu indeksi 4.3. attēls ilustrē izstrādātās metodes efektivitāti dažādu pašsvārstību formu izšķirtspēju gadījumā. Bojājumu iespējams konstatēt, bet ne pareizi lokalizēt, pašsvārstību formu izšķirtspēju samazinot līdz 11×11 datu punktiem. Rezultāti parāda izstrādātās metodes robustumu attiecībā uz ierobežotu mērījumu punktu skaitu. Šī metode var tikt izmantota praktiskām konstrukciju bojājumu pārbaudēm.



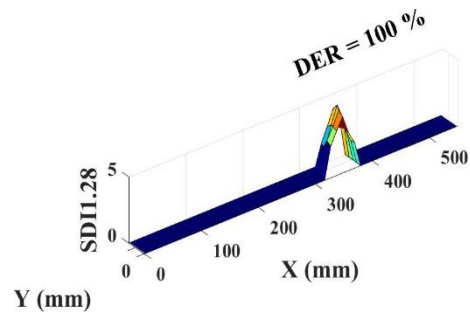
4.3. att. SBI alumīnija plātnei ar dažādām pašsvārstību formu izšķirtspējām: (a) 26×26 ; (b) 11×11 . Pa kreisi: eksperiments, pa labi: simulācija.

4.2. Otrais gadījums: kompozīta lamināta sija ar trieciena bojājumu

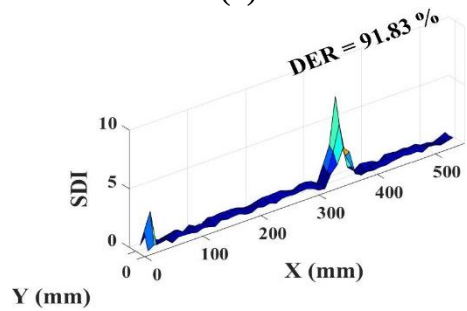
Aplūkota trešajā nodaļā apskatītā oglekļa šķiedras lamināta sija ar trieciena bojājumu, pašsvārstību formas mērot divās dimensijās. Standartizētā bojājumu indeksa (SBI) aprēķinos izmantota *Mexican Hat* veivletu funkcija ar mēroga parametru 1, sasniedzot BNP vērtību 90,07 %, kas ir vislabākais rezultāts. SBI sadalījumi NVT un PFLK metodēm pa visu sijas virsmu ir parādīti 4.4. attēlā. Trieciena bojājums ir skaidri lokalizēts. Iegūtie rezultāti parāda, ka izstrādātā metodoloģija sniedz informāciju par bojājuma atrašanās vietu un izmēriem un to var lietot ne tikai laboratoriskās pārbaudēs, bet arī praksē.



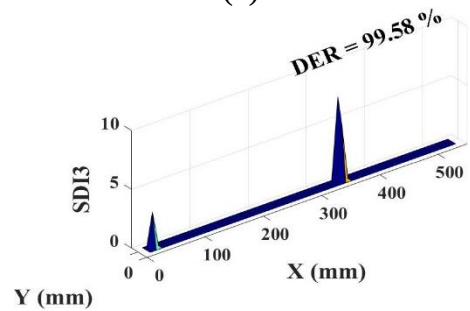
(a)



(b)



(c)



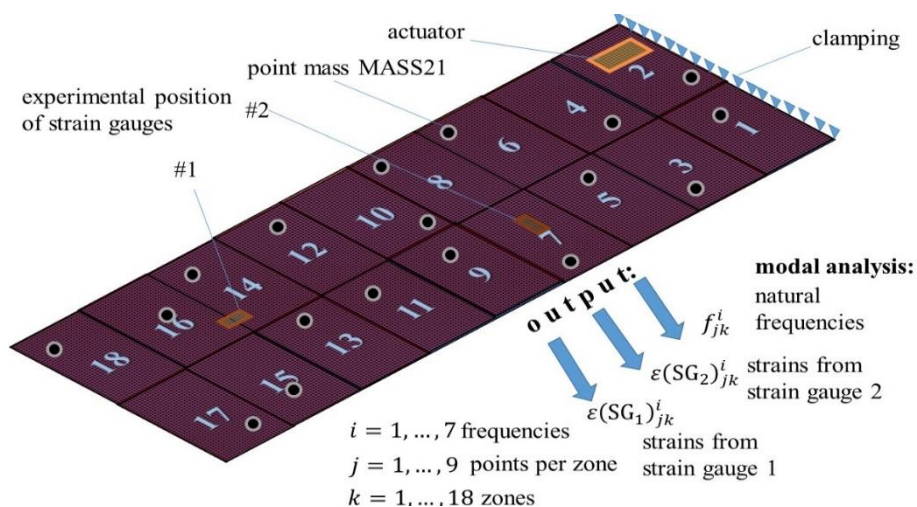
(d)

4.4. att. SBI sadalījumi pa oglekļa šķiedras lamināta siju ar trieciena bojājumu: (a) bez sliekšņa (2D NVT); (b) ar sliekšni 1,28 bojājuma lokalizācijai ticamībai 90 % (2D NVT); (c) bez sliekšņa (2D PFLK); (d) ar sliekšni 3 bojājuma lokalizācijai ticamībai 99 % (2D PFLK).

5. UZ DEFORMĀCIJU IEZĪMJU UZRAUDZĪTO DAUDZKLAŠU KLASIFIKĀCIJU BALSTĪTS BOJĀJUMU MONITORINGS AR DEFEKTU LOKALIZĀCIJU DIVDIMENSIJU KONSTRUKCIJĀS

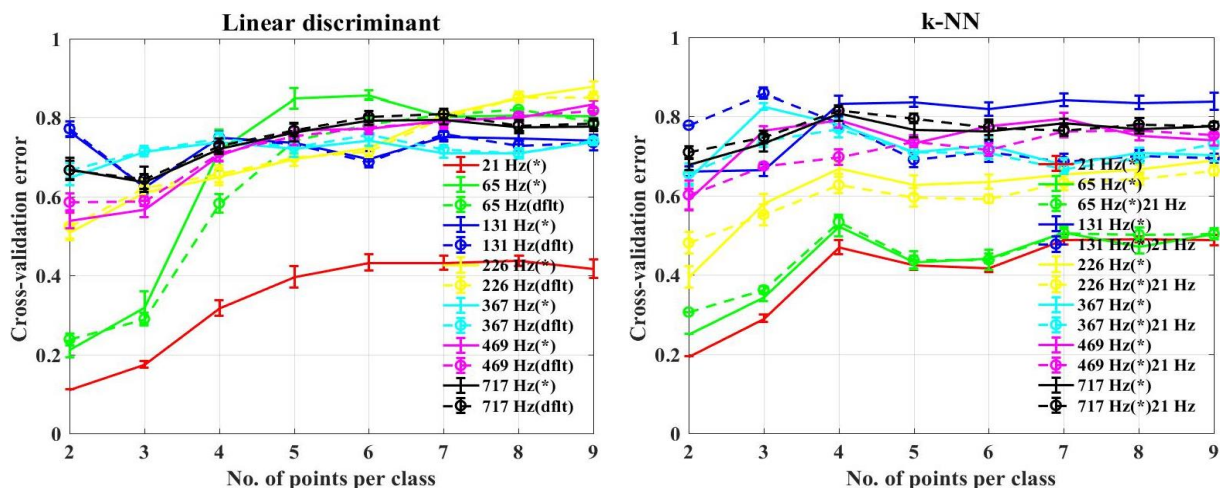
Šī nodaļa sniedz ieskatu par izstrādāto metodi bojājumu monitoringam un defektu lokalizācijai masveidā ražotiem konstrukciju elementiem, izmantojot daudzklašu klasifikācijas paņēmieni. Šie konstruktīvie elementi varētu būt vēja ģeneratoru lāpstiņas vai lidmašīnu spārni, kam tiek veiktas regulāras pārbaudes bojājumu atrašanai. Metodes ideja balstās uz bojājumu kataloga izveidi skaitliskajās simulācijās ar galīgo elementu metodi. Simulējot dažāda apmēra bojājumus dažādās konstrukcijas vietās, dažādi gadījumi no izveidotā bojājumu kataloga var tikt salīdzināti ar reālu konstrukcijas bojājumu. Salīdzinot sensoru mērījumu datus no reāla bojājuma ar kataloga datu vērtībām, var tikt raksturota gan bojājuma atrašanās vieta, gan tā apmērs. Izstrādātās metodes efektivitāte tiek demonstrēta, izmantojot oglekļa šķiedras lamināta konsolplātnei ar pseidodefektu. Pseidodefekts šajā gadījumā ir pievienotā masa, kas lokāli izmaina konstrukcijas dinamiskās īpašības, gluži kā īsts bojājums.

Konsolplātnes GE modelis izveidots, izmantojot komerciālo GE programmas *Ansys*TM versiju 16.2. Materiāls ir oglekļa šķiedras lamināts ar 32 slāņiem, kur katra slāņa biezums ir 90 μm un klājuma shēma ir $(90/0)_{85}$. Masas galīgais elements ar lielumu 0,02 kg (9,43 % plātnes masas) ir novietots uz plātnes katras zonas, un veikta harmoniskā analīze plātnes rezonanses frekvenču identifikācijai. Plātne dinamiski ierosināta ar 10 voltu elektrisko spriegumu, izmantojot pjezoelektrisko ierosinātāju *MFC*. Kā pierādīts [14], tikai divi optimāli izvietoti deformāciju sensori ir pietiekami efektīvu klasifikatoru, balstītu uz deformāciju iezīmēm, izveidei. Deformāciju 1. sensors atrodas vistālāk no *MFC* ierosinātāja perpendikulāri šķiedru orientācijai, deformāciju 2. sensors, izvietots šķiedru virzienā, atrodas tuvāk *MFC* elementam. Plātnes modelis parādīts 5.1. attēlā.



5.1. att. Plātnes skaitliskais modelis ar plātnes dalījumu zonās, punktveida masu un deformāciju ierakstu.

Tika aprēķinātas šķērsvalidācijas kļūdas atkarībā no mērījumu skaita katrā zonā visām rezonanses frekvencēm. Šie rezultāti abiem algoritmiem (lineārais diskriminants un k tuvākie kaimiņi) ir parādīti 5.2. attēlā. Vismazākās kļūdas ir raksturīgas pirmajai rezonanses frekvencei liecē abiem klasifikācijas algoritmiem, tādējādi turpmākajos aprēķinos tika izmantota tikai fundamentālā rezonanses frekvence.



5.2. att. Šķērsvalidācijas kļūdas noteiktajām rezonanses frekvencēm atkarībā no mērījumu punktu skaita zonā.

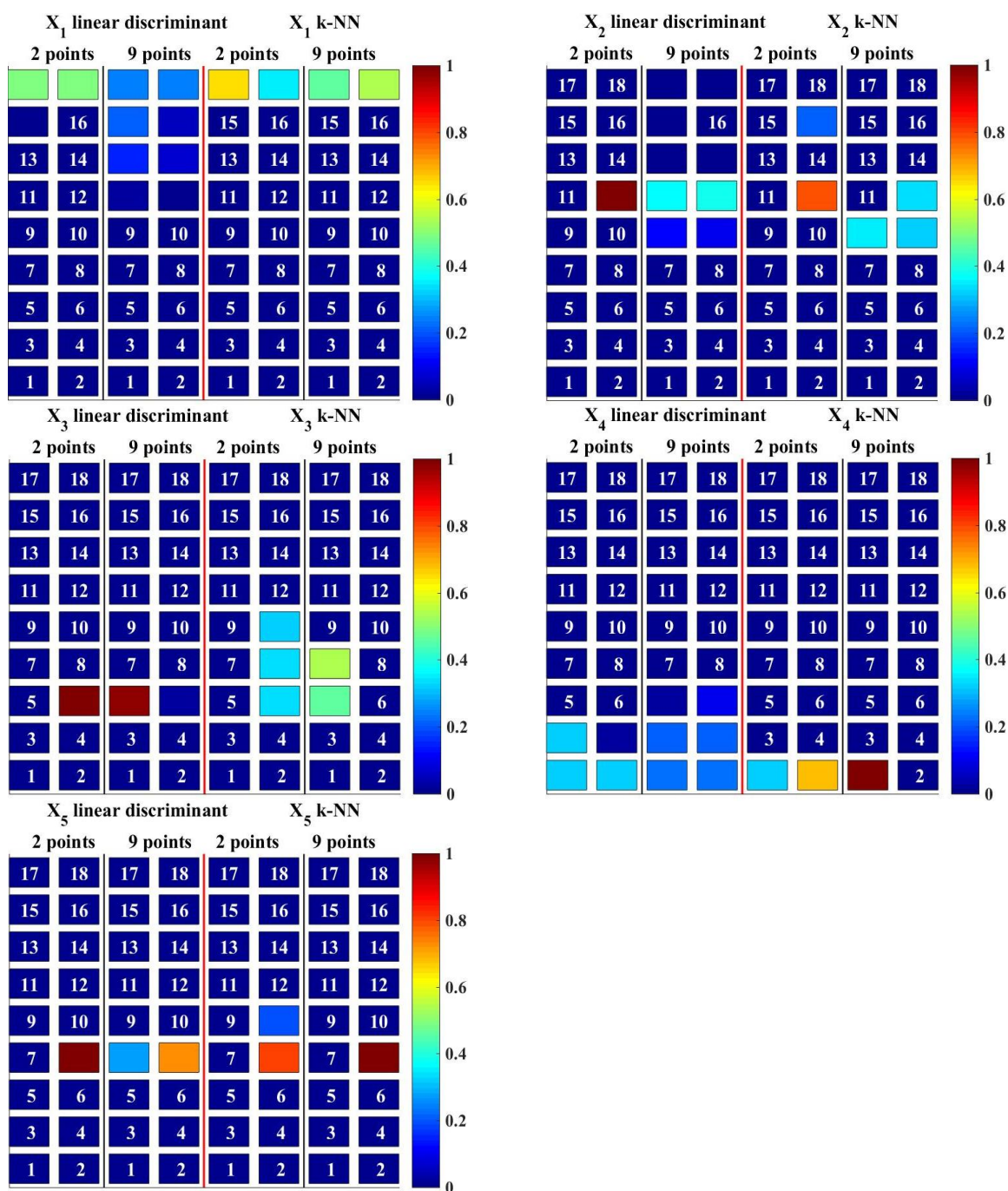
Optimizējot klasifikatoru hiperparametrus fundamentālās lieces frekvences gadījumā, atrastie optimālie parametri ir $k = 3$ (tuvāko kaimiņu skaits), distance – *Mahalanobis distance* ar apgriezto distances svaru. Hiperparametru optimizācijas rezultāti (raustītās līnijas) attēloti arī 5.3. attēlā ar zvaigznīti *. Neoptimizēts lineārā diskriminanta klasifikators apzīmēts ar “dflt”. Redzams, ka hiperparametru optimizācija (γ un δ lineārajam diskriminantam un tuvāko kaimiņu skaits k , distances veids un svars k tuvākajiem kaimiņiem) būtiski neietekmē šķērsvalidācijas kļūdu.

Pieci jauni datu punkti tika simulēti ar nejaušu atrašanās vietu uz plātnes. Punktu koordinātes parādītas 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Simulēto nezināmo jauno punktu koordinātes un piederība plātnes zonām					
Jaunais punkts	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
x (m)	0,09	0,064	0,032	0,032	0,088
y (m)	0,346	0,206	0,126	0,026	0,146
Zona	18	starp 9, 10, 11 un 12	5	1	8

Defekta lokalizācijas prognozes varbūtību sadalījumi nezināmajiem punktiem abiem klasifikatoriem ir parādīti 5.3. attēlā diviem un deviņiem datu punktiem zonā.



5.3. att. Bojājumu prognozes varbūtību sadalījumi katram nezināmajam punktam.

Vairākos klasifikācijas gadījumos konstatētas atšķirības abu klasifikatoru sniegumos. Ar abiem klasifikatoriem un diviem punktiem zonā prognozēts, ka pirmais nezināmais punkts X_1 atrodas 17. vai 18. zonā. Izmantojot deviņus datu punktus zonā, klasifikācijas precizitāte samazinājās, izņemot k tuvāko kaimiņu gadījumā. Pareiza klasifikācija nezināmajam punktam X_2 būtu jebkura no zonām – 9., 10., 11. vai 12. –, jo, šim punktam atrodoties šo zonu krustpunktā, ir vienāda varbūtība tikt klasificētam kā piederīgam jebkurai no tām. Ar abiem klasifikatoriem šis punkts klasificēts kā piederīgs 12. zonai (divi datu punkti zonā). Pareiza klasifikācija ar abiem klasifikatoriem iegūta, izmantojot arī deviņus datu punktus zonā. Punkts X_3 atrodas 5. zonā, bet tika klasificēts kā piederīgs 6. zonai (lineārais diskriminants),

kas ir tuvu, ņemot vērā, ka deformāciju vērtību izmaiņa blakus zonās ir neliela. k tuvākie kaimiņi klasificē šo punktu kā piederīgu 6., 8. vai 9. zonai, kas ir lielāka novirze no pareizās klasifikācijas. Punkts X_4 ir ticis pareizi klasificēts kā piederīgs 1. zonai tikai ar k tuvākajiem kaimiņiem un deviņiem datu punktiem zonā. Arī ar lineāro diskriminantu iegūta pareiza klasifikācija, taču prognozes varbūtības ir lielākā mērā “izsmērētas” pa zonām. Šis efekts ir mazāk izteikts gadījumā ar diviem datu punktiem zonā. Punkts X_5 ir pareizi klasificēts ar abiem klasifikatoriem kā piederīgs 8. zonai, gan izmantojot divus, gan deviņus datu punktus zonā.

Izstrādātā metode ir eksperimentāli validēta uz oglekļa šķiedras kompozītmateriāla konsolplātnes, kas parādīta 5.4. attēlā (a). Sensoru un ierosinātāja izvietojums atbilst skaitliskajam modelim. Papildu masas pielikšana (atbilstoši skaitliskajai simulācijai) uz vienas no plātnes zonām parādīta 5.4. attēlā (b).



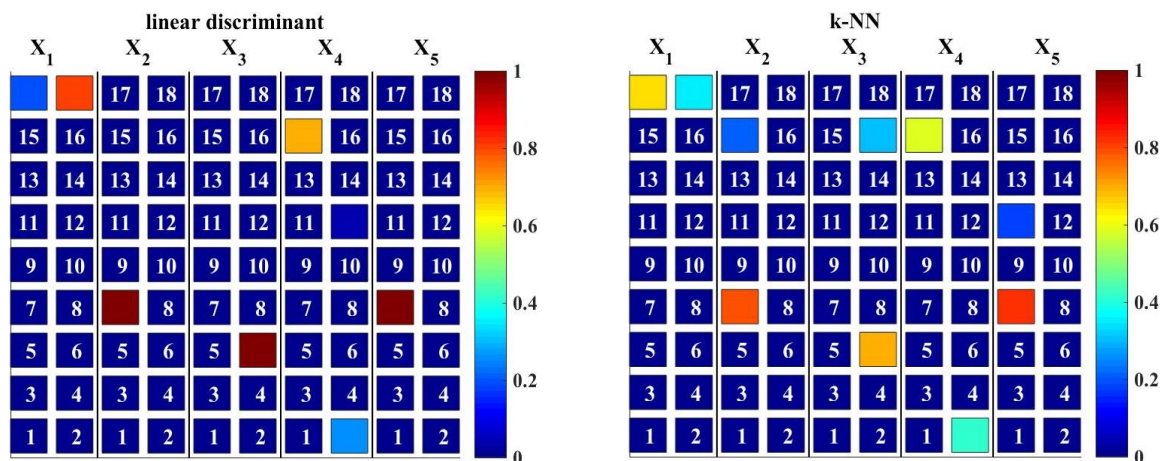
5.4. att. Oglekļa šķiedras lamināta konsolplātne: (a) fotogrāfija ar sensoriem un ierosinātāju; (b) plātnes sadalījums zonās un masas pielikšana.

Dinamisko deformāciju mērījumu sistēma sastāv no signālu ģenerators (*Agilent 3322A 20 MHz Function/Arbitrary Waveform Generator*), kas pieslēgts *MFC* ierosinātājam plātnes harmoniskai ierosmei, signālu pastiprinātāja (*LE 150/025 Piezomechanik GmbH* signālu pastiprinātājs (230 V AC, sērijas numurs: 10902/936), deformāciju mērījumu sistēmas (*Spider 8 600 Hz / DC HBM* ar *USB* adapteri *USBHBM2903*), kas ar kanāliem savienota ar abiem deformāciju mērītājiem un signālu ģeneratoru. *Spider 8* sistēma savienota ar personālo datoru, izmantojot *USB* portu. Ierakstīto deformāciju signālu vizualizācijai izmantota *Catman* programma. Katrā plātnes zonā kopā veikti trīs mērījumi.

Eksperimentālā modālā analīze veikta, ierosinot plātni ar pjezoelektrisko *MFC* (*macro-fiber composite*) elementu (modelis *M2807-P1 smart material*), kas uzlīmēts uz plātnes virsmas. Izmērītajā svārstību ātruma spektrā 800 Hz frekvenču joslā identificēti astoņi pīķi, no kuriem saskaņā ar skaitlisko simulāciju izvēlēts fundamentālajai rezonanses frekvencei liecē atbilstošais pīķis.

Defekta prognozes varbūtību sadalījumi plātnes katrai zonai atsevišķi katram jaunajam datu punktam (ar tām pašām koordinātēm, kas skaitliskajā modelī) ir parādīti 5.5. attēlā. Punkts X_1 ticis pareizi klasificēts kā piederīgs 17. zonai. Kopumā lineārais diskriminants ir bijis efektīvāks par k tuvākajiem kaimiņiem, jo lielākas varbūtības saistītas ar pareizi

klasificēto zonu. Attiecībā uz punktu X_2 nav iegūti pārlicinoši rezultāti. Punkts X_3 atrodas uz 6. un 8. zonas robežas. Iegūta pareiza klasifikācija ar abiem klasifikatoriem – 6. zona, bet lineārā diskriminanta gadījumā prognozes varbūtība ir augstāka. Punkts X_4 ir klasificēts kā atbilstošs 2. un 15. zonai, kas nav pareizi, taču 2. zona ir tuva pareizajai klasifikācijai (1. zona). Punkts X_5 ir pareizi klasificēts – kā piederošs 7. zonai.



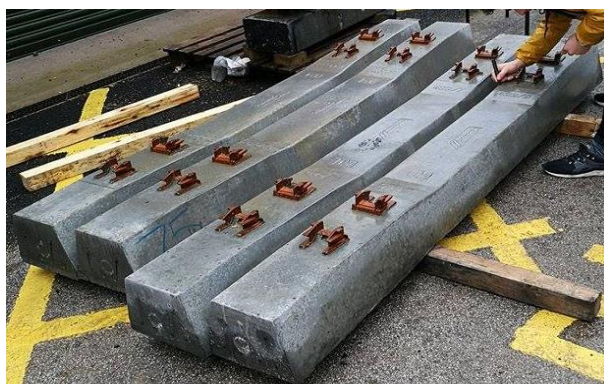
5.5. att. Defekta lokalizācijas prognozes varbūtības eksperimentālajam pētījumam ar diviem punktiem zonā.

Eksperimentālā validācija uzskatāma parāda abu klasifikatoru spēju atrast bojājuma zonu vienkāršākajos gadījumos, kad masa pielikta viena zonā. Atšķirībā no citām metodēm, izmantojot šo paņēmieni, bojājumam nav noteikti jāatrodas sensora tuvumā tā veiksmīgai lokalizācijai. Metodes ierobežojums ir defekta atrašanās uz vairāku zonu robežas, kā arī ar lielu varbūtību netiks izšķirti tuvu esoši defekti, jo abos šajos gadījumos tiks reģistrētas ļoti līdzīgas deformāciju vērtības.

6. METODE AKUSTISKĀS EMISIJAS AVOTU ATDALĪŠANAI UN PĪKA FREKVENČU NOBĪDES NOVĒRTĒŠANAI LIECES SLODZEI PAKĻAUTOS IEPRIEKŠ SASPRIEGTOS DZELZCEĻA DZELZSBETONA GULŠŅOS

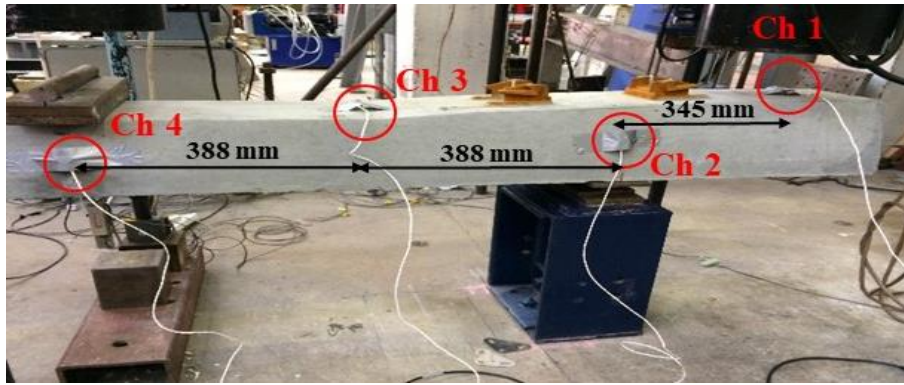
Šajā nodaļā tiek izmantota akustiskās emisijas (AE) metode plaisāšanas raksturošanai iepriekš saspiertos dzelzceļa betona gulšņos, kas pakļauti lieces slodzei. Metode paver bojājumu novērtēšanas iespējas dažādos nākotnes lietojumos, īpaši – dzelzceļa pārmiju pārvedās un pārbrauktuvēs. Šī pētījuma mērķi ir, pirmkārt, identificēt lieces izraisītās plaisas betona gulšņos, izmantojot AE paņēmieni; otrkārt, savstarpēji nekorelētie AE parametri var tikt izmantoti klasifikācijas modeļa izveidei AE avotu savstarpējai atdalīšanai ar iespējamu analizējamo AE parametru klāsta samazināšanu. Tiek piedāvāta metode nenozīmīgu trokšņu radītu pīka frekvenču atfiltrēšanai no analizējamajiem AE signāliem, atstājot tikai tās signālu iezīmes, kas tieši saistītas ar plaisu rašanos. Rezultātā ir iespējams ievērojami samazināt apstrādājamo datu apjomu.

CEMEX piegādātie četri pilna izmēra iepriekš saspiertie dzelzsbetona gulšņi ir parādīti 6.1. attēlā. Gulšņu garums ir 2500 mm, augstums vidusdaļā – 175 mm, augstums sliežu stiprinājuma daļā – 200 mm, platums – 200 mm. Gulšņa masa ir $309 \text{ kg} \pm 3 \text{ kg}$ brīvajām savilcējkomponentēm. Katrā gulsnī ir iestrādāti seši iepriekš saspierti tērauda armatūras stieņi.



6.1. att. CEMEX piegādātie pilna izmēra iepriekš nospiertie dzelzceļa dzelzsbetona gulšņi.

Gulšņu tehniskajām pārbaudēm tiek izmantots Eiropas standarts BS EN 13230 [15]. Tas nodrošina materiālu specifikācijas, balsta nosacījumus, slogošanas procedūras un citas prasības lieces testu veikšanai. Šajā promocijas darbā gulšņu vidusdaļā ir pielikta statiska slodze gulšņu pozitīvajā un negatīvajā lieces konfigurācijā. Praksē trīspunktu liece tiek izmantota plaisāšanas procesu pārbaudēm dzelzceļa gulšņos. AE sensoru izvietojums uz gulšņiem pozitīvajā konfigurācijā parādīts 6.2. attēlā. Izliece vidusdaļā tika mērīta zem gulšņa ar lineāri mainīgu diferenciālo pārveidotāju.



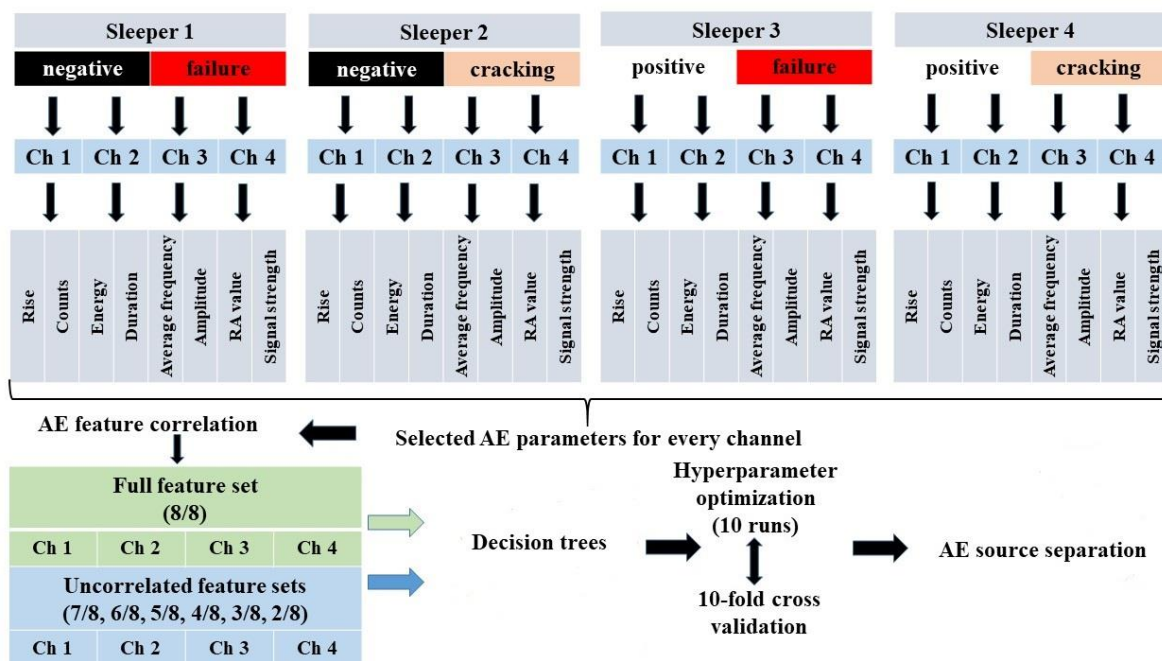
6.2. att. Statiskās slogošanas sagatave dzelzceļa dzelzsbetona gulšņiem ar četriem akustiskās emisijas sensoriem (pozitīvā lieces konfigurācija).

AE signāli tika detektēti un izmērīti, izmantojot kompānijas *Physical Acoustics Corporation* (PAC, tagad *Mistras*) četru kanālu DAQ AE sistēmu. Datu reģistrācija tika veikta, izmantojot “AE-Win” programmatūru. AE signāli tika detektēti, izmantojot platjoslas PAC-WD pjezoelektriskos akustiskās emisijas uztvērējus ar darba frekvenci 20–1000 kHz. Katrs sensors tika pieslēgts pie PAC 2/4/6 priekšpastiprinātāja ar pastiprināšanas līmeni (AE signāla uztveršanas sliekšni) 50 dB pirms testa sākuma. AE sensori tika piestiprināti pie gulšņiem ar *Vaseline* petrolejas želeju un nofiksēti ar līmlenti.

AE signālu nolasīšanas frekvences vērtība 1 000 000 ieraksti/s, akustiskās emisijas pīķa noteikšanas laiks, sitiena noteikšanas laiks un sitiena aiztures laiks tika uzstādīti uz vērtībām atbilstoši 600 μ s, 600 μ s un 1000 μ s. Pirmstrigera laiks tika uzstādīts uz 256 μ s.

Akustiskās emisijas avotu atdalīšanas metodoloģijas shēma ir parādīta 6.3. attēlā. Divi no četriem gulšņiem tika slogoti pozitīvajā lieces konfigurācijā, pārējie divi – negatīvajā. Divi gulšņi (nr. 1 un 3) tika slogoti līdz sabrukumam, savukārt gulšņi nr. 2 un 4 tika slogoti līdz pirmajai plaisai. Tad gulšņi pakāpeniski tika atslogoti un no jauna slogoti līdz 1,5 reizes lielākai slodzei nekā pirmās plaisas slodze. No kopējā reģistrētā akustiskās emisijas parametru klāsta tika izvēlēti astoņi parametri: impulsu kāpums (*Rise R*), impulsu skaits (*Counts C*), impulsu enerģija (*E*), impulsu ilgums (*Duration D*), attiecība impulsu skaits / impulsu ilgums (*C/D*) vai vidējā frekvence, impulsu amplitūda (*A*), signāla stiprums (*SS*) un attiecība impulsu kāpums / pīķu amplitūda jeb *RA* vērtība.

Atsaucoties uz [16], tika veikta korelācijas analīze lineāru sakarību noteikšanai starp šiem parametriem. Parametri ar vislielāko savstarpējo korelāciju no turpmākajiem aprēķiniem tika izslēgti, lai izvairītos no parametru savstarpējās linearitātes. Katrā nākamajā solī tika izslēgts viens parametrs, kopā veidojot septiņus gadījumu pētījumus. Vismaz diviem parametriem ir jāpaliek to savstarpējās sakarības noteikšanai. Katra atsevišķā pētījuma parametri tika izmantoti lēmumu pieņemšanas koku klasifikācijas modeļa izveidei, jo pārbaudi laikā tika noskaidrots, ka šis klasifikators ir vienīgais, ar kura palīdzību veicama apmēram 98 609 datu paraugu apstrāde samērīgā laikā. *K* reižu šķērsvalidācijas shēma tika izmantota klasifikācijas modeļa parametru optimizēšanai. Sekojot standarta praksei, validācija veikta 10 reizes, tādējādi lēmumu pieņemšanas koku klasifikatora hiperparametru optimizācija arī veikta 10 reizes. Tika aprēķināta vidējā hiperparametru vērtība, un katram pētījumam izveidots atsevišķs klasifikācijas modelis.



6.3. att. Akustiskās emisijas avotu klasifikācijas procedūras shēma.

Klasifikācijas modeļa veikspēja tiek vērtēta, apskatot resubstitūcijas un šķēršvalidācijas kļūdas. Lēmumu koku gadījumā resubstitūcijas kļūdu ietekmē maksimālais mezglu dalījumu skaits, savukārt šķēršvalidācijas kļūdu – datu sadalījumu skaits šķēršvalidācijas pārbaudē.

Par nozīmīgu savstarpējo korelāciju šajā promocijas darbā pieņemtā robeža ir 60 %. AE parametru izvēles organizācija ir parādīta 6.1. tabulā.

6.1. tabula

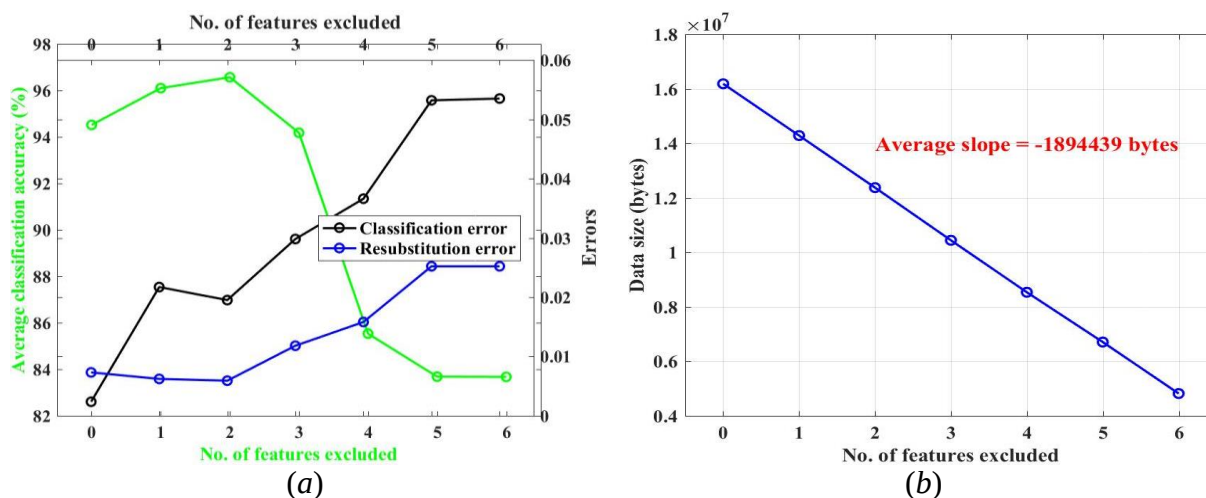
Parametru izvēles stratēģija AE avotu klasifikācijai

Pētījums nr.	Parametru skaits	Izlēgtie parametri
1.	8/8	Neviens
2.	7/8	C
3.	6/8	C, D
4.	5/8	C, D, SS
5.	4/8	C, D, SS, E
6.	3/8	C, D, SS, E, A
7.	2/8	C, D, SS, E, A, RA

Vislielākā vidējā klasifikācijas precizitāte iegūta, izslēdzot tikai divus parametrus un atstājot sešus, kā parādīts 6.4. attēlā (a).

Salīdzinoši nelielais klasifikācijas modeļa veikspējas samazinājums ir kompensēts ar samazināto apstrādājamo datu apjomu. Samazinot AE parametru skaitu par vienu katrā turpmākajā solī, apstrādājamo datu apjoms samazinās lineāri, kā redzams 6.4. attēlā (b). Aprēķinātais taisnes virziena koeficients jeb datu apjoma samazinājums uz katru no klasifikācijas modeļa izslēgto AE parametru ir apmēram 1,9 MB. Atstājot tikai minimālo parametru skaitu (divus), vidējā klasifikācijas precizitāte samazinās par apmēram 10 %, savukārt analizējamo datu apjoms samazinās par apmēram 70 %. Šis rezultāts var tikt

izmantots AE sensoru izvietošanai kritiskos dzelzceļa posmos, kur bojājumu noteikšana ir apgrūtināta.



6.4. att. Akustiskās emisijas parametru ietekme uz: (a) vidējo klasifikācijas precizitāti un kļūdām; (b) analizējamo datu apjomu.

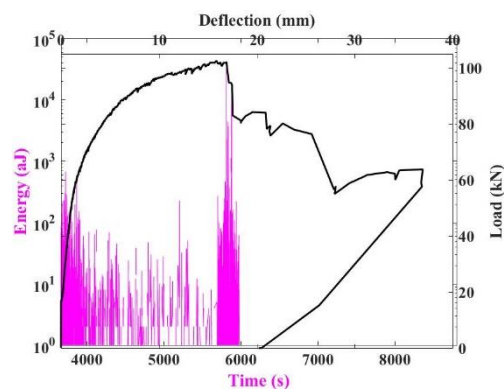
Sabrūkot saitēm starp materiāla daļiņām, tiek izstaroti akustiskie viļņi noteiktās frekvenču joslās. Pieaugot slodzei, defekti (plaisas betonā) izplatās, palielinot izstaroto viļņu frekvenču vērtības (frekvenču nobīde). Šīs nobīdes apmērs ir atkarīgs no bojājuma dziļuma un izmēra. Konstrukciju slogošanas laikā tiek ierakstītas akustiskās emisijas plašā pīķa frekvenču vērtību intervālā. Atsevišķas frekvences ir saistītas ar troksni, tomēr bojājumu rašanās laikā tiek izstarots milzīgs daudzums akustisko viļņu. Šajā promocijas darbā akustiskās emisijas viļņa pīķa frekvence tika izraudzīts kā bojājumjutīgs parametrs, jo tas ir drošs akustiskās emisijas dažādo avotu, piemēram, dzelzsbetona korozijas un slodzes izraisītas plaisāšanas indikators [17].

Gulšņa sabrukums liecē ir parādīts 6.5. attēlā (a). Sabrukuma moda ir liece + bīde. Slodzes-izlieces līkne 6.5. attēlā (b) parāda, ka elastības zona iesniedzas līdz apmēram 60 kN. Pie šīs slodzes radās pirmā plaisa. Vislielākās enerģijas impulss ar 31 600 atodžoulu enerģiju atbilst gulšņa lieces stiprībai 102 kN. Sabrukuma brīdī gulšņa vidusdaļā reģistrētā izliece ir 17 mm. Uz tērauda stieņiem tika pārnesta stiepes slodze, kā rezultātā norisinājās turpmāka deformācija, ko apstiprina AE aktivitātes turpinājums.

Pīķa frekvenču dinamika slogošanas laikā ir parādīta 6.6. attēlā. Visintensīvākās emisijas atbilst sabrukumam un pat pēc tā. Dominējošā akustisko emisiju proporcija saistīta ar vidusdaļu (kanāls nr. 4) ar pīķa frekvenču intervālu no 150 kHz līdz apmēram 600 kHz. Reģistrētas trīs pīķa frekvenču joslas – [150–300] kHz, [385–460] kHz un [498–496] kHz. Emisijām no kanāliem nr. 1 un 2 raksturīga frekvenču zemākā josla [150–300] kHz.

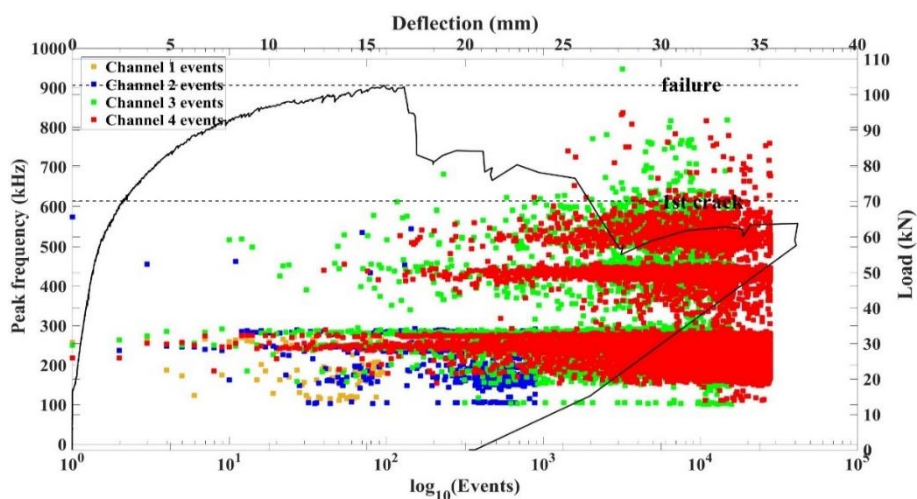


(a)



(b)

6.5. att. Gulšņa nr. 1 sabrukuma aina (a); akustiskās emisijas enerģija visos kanālos kopā ar slodzes-izlieces likni (b).

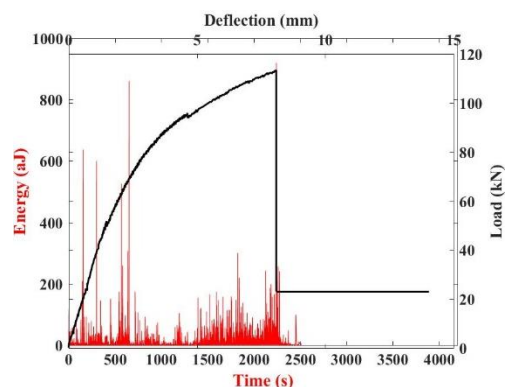


6.6. att. Pīķa frekvenču dinamika gulsnim nr. 1.

Gulšņa nr. 3 sabrukuma aina ir parādīta 6.7. attēlā (a). Sabrukuma moda ir tīrā bīde ar atsegtiem tērauda stieņiem gulšņa vidusdaļā. Slodzes-izlieces līkne ir parādīta 6.7. attēlā (b). Pirmā plaisa radusies pie 53 kN slodzes, bet sabrukuma slodze reģistrēta pie 113 kN. Lieces nestspēja pozitīvajai lieces konfigurācijai ir par 11 % lielāka nekā negatīvajai, kas ir saskaņā ar gulšņu dizainu praksē. AE dati uzrāda salīdzinoši lielu korelāciju ar slodzes-izlieces raksturu, tādējādi pirmās plaisas un lieces nestspējas raksturīgie punkti var tikt izšķirti. Salīdzinot ar negatīvo lieces konfigurāciju, lieces nestspējai atbilstošās akustiskās emisijas enerģijas vērtības ir zemas. Iespējams, ka agresīvā rakstura trauklais sabrukums traucēja AE sensoriem augstas enerģijas datu ierakstu.



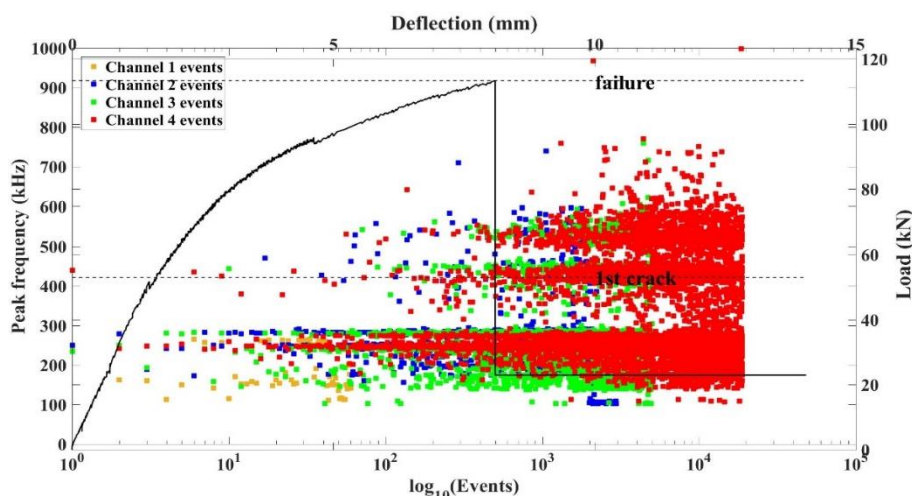
(a)



(b)

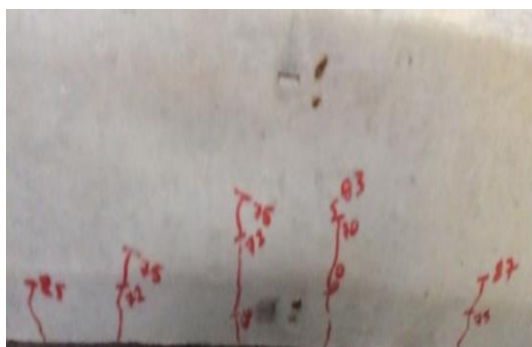
6.7. att. Gulšņa nr. 3 sabrukuma aina (a); akustiskās emisijas enerģija visos kanālos kopā ar slodzes-izlieces likni (b).

6.8. attēlā ir skaidri redzamas trīs pīķa frekvenču joslas. Visplatākā frekvenču josla ir [150–300] kHz, otrā josla ir [350–450] kHz, trešā josla ir [500–600] kHz. Akustiskās emisijas impulsu lielākā proporcija tiek ģenerēta kanāla nr. 4 apkārtņē ar lielāko plaisu koncentrāciju. Gluži tāpat kā gulšņos nr. 1 un 2, ar kanāliem nr. 1 un 2 reģistrētie akustiskās emisijas impulsi galvenokārt pieder pie pīķa frekvenču zemākās joslas [150–300] kHz. Nozīmīgi emisiju uzplaiksnījumi atbilst gulšņa sabrukumam. Ar citiem kanāliem reģistrētie emisiju impulsi nav tik izteikti.

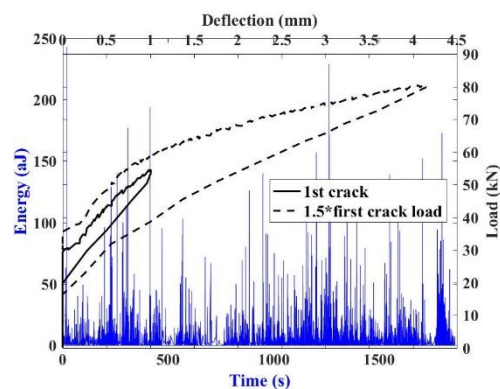


6.8. att. Pīķa frekvenču dinamika gulsnim nr. 3.

Kā redzams 6.9. attēlā (a), pirmā plaisa parādījusies pie slodzes 60 kN. AE korelācija ar slodzes-izlieces raksturu nav pilnīga, taču straujais impulsa enerģijas pieaugums, kas ir atbilstošs pirmajai plaisai, ir skaidri pamanāms. Pie lielākām slodzēm AE enerģija ir salīdzinoši zema, izņemot 79 kN slodzi, pie kuras gulšņa tehniskais stāvoklis sāk palikt kritisks. Tādējādi plaisu izplatīšanās ģenerē lielākas enerģijas akustiskās emisijas impulsus. Slodze tika palielināta līdz apmēram 83 kN.



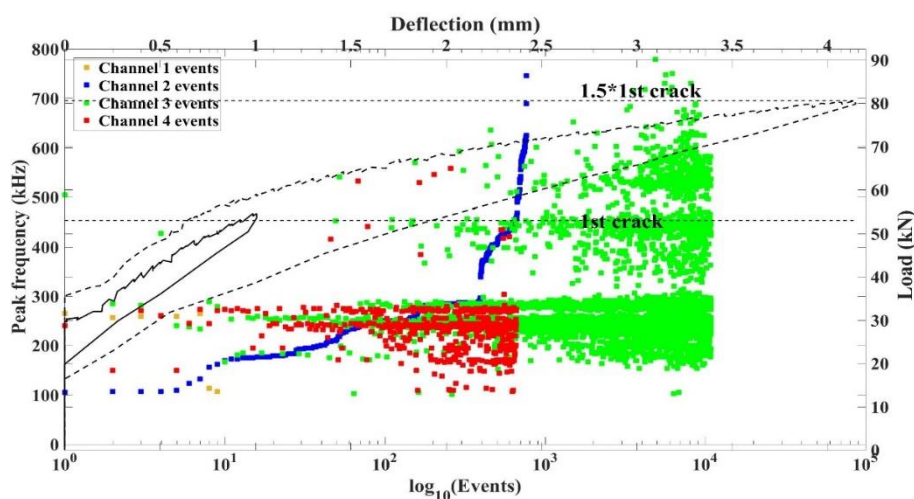
(a)



(b)

6.9. att. Plaisāšanas aina pie slodzes, kas 1,5 reizes pārsniedz pirmās plaisas slodzi gulsnim nr. 4 (a); akustiskās emisijas enerģija visos kanālos kopā ar slodzes-izlieces līkņiem (b).

Slodzes-izlieces līknes kopā ar pīķa frekvenču dinamiku slogošanas laikā ir parādītas 6.10. attēlā. Pārsteidzoši ir tas, ka vizizteiktākais pīķa frekvenču vērtību pieaugums ar pakāpienveida raksturu un salīdzinoši nelielu emisiju skaitu, pieaugot slodzei, ir kanālā nr. 2. Relatīvi mazāku pīķa frekvenču vērtību akustiskās emisijas ir izstarotas kanāla nr. 4 apkārtņē ar frekvenču joslu [100–300] kHz un salīdzinoši nelielu emisiju skaitu, kaut arī emisijas tika reģistrētas visa testa laikā. Dominējošā emisiju proporcija reģistrēta kanāla nr. 3 tuvumā ar plašu frekvenču spektru, no kura var izcelt trīs joslas [150–300] kHz, [300–460] kHz un [500–700+] kHz. No kanāla nr. 1 ir reģistrētas salīdzinoši nedaudz emisiju pārsvarā zemākajā frekvenču joslā [150–300] kHz.



6.10. att. Pīķa frekvenču dinamika gulsnim nr. 4.

Akustisko emisiju intensitāte ir pieaugusi virzienā uz gulšņu vidusdaļu. Vienīgais izņēmums ir gulsnis nr. 4.

Aplūkojot visus kanālus, nozīmīgo pīķa frekvenču proporcija veido tikai 14 % līdz 34 % no sākotnējiem reģistrētajiem datiem, tajā pašā laikā saglabājot 53 % līdz 98 % no emisiju skaita informācijas. Šī atziņa ir svarīga efektīvai modificēto universālo sliekšņu izmantošanai akustisko emisiju signālu praktiskai apstrādei.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāti konstrukciju bojājumu lokalizācijas algoritmi, kas iedalīti divās daļās. Pirmajā daļā ir aprakstīti algoritmi, balstīti uz pašsvārstību formu pārveidojumu metodēm – telpisko nepārtraukto veivletu transformāciju (NVT), pašsvārstību formu liekuma kvadrātu (PFLK) un vēl viena metode, kas izstrādāta promocijas darbā. Šī metode balstīta uz normalizēto veivletu mērogrāmas dispersijas parametra aprēķinu atkarībā no veivleta mēroga. Rezultāti ir saskaitīti, izmantojot visas promocijas darbā apskatītās veivletu funkcijas. Tādējādi, salīdzinot ar tradicionālo nepārtraukto veivletu transformāciju, metodes darbībai nav nepieciešams izvēlēties tādus svarīgus parametrus kā veivleta funkcija un mēroga parametrs. Šīs metodes ir izstrādātas siju un plātņu konstruktīvajiem elementiem. Bojāto konstrukciju (alumīnija sijas un plātne ar frēzēto iegriezumu un oglekļa šķiedras lamināta kompozīta sija ar trieciena bojājumu) pašsvārstību formas ir eksperimentāli izmērītas, izmantojot bezkontakta skenējošo lāzera vibrometru, skaitliskās simulācijas veiktas ar komerciālo galīgo elementu programmatūru *Ansys*TM. Pašsvārstību formu signālu izmantošana izstrādātajās metodēs tika realizēta programmas *Matlab*TM vidē. Tika veikta parametriskā analīze, pētot dažādu trokšņu līmeņu (no 0 % līdz 4 %) un pašsvārstību formu izšķirtspējas jeb sensoru blīvuma (pašsvārstību formu signālu garumu izdalot ar veseliem skaitļiem no 1 līdz 6) ietekmi uz rezultātiem. Rezultātā tika formulēti šādi secinājumi:

- ar visām trīs metodēm ir lokalizēti bojājumi visos bojājumu scenārijos – viens un vairāki frēzēti iegriezumi alumīnija sijās un plātnē, kā arī trieciena bojājums oglekļa šķiedras lamināta kompozīta sijā – ar dažādiem bojājuma noteikšanas paļāvības līmeņiem. Metožu darbībai nav nepieciešama nebojātu konstrukciju pašsvārstību formu informācija, kuras pieejamība ir daudzu tradicionālo metožu pamatā;
- telpiskā NVT ir efektīva metode konstrukciju bojājumu noteikšanai un lokalizēšanai, izmantojot pašsvārstību formu informāciju. Tomēr metodes efektivitātei ir nepieciešama pareiza veivleta funkcijas un tās mēroga parametra izvēle;
- PFLK metode ir efektīva bojājumu lokalizācijā, pie tam tā ir vienkāršāka nekā NVT saistībā ar mazāku izvēles parametru skaitu. Promocijas darbā izstrādāts paņēmiens nebojātas konstrukcijas pašsvārstību formu iegūšanai, izmantojot tikai bojātās konstrukcijas pašsvārstību formas, atbilstoši veicot formu polinomiālo nogludināšanu plātņu gadījumā un aproksimāciju ar dažādu kārtu Furjē rindas funkcijām siju gadījumā. Salīdzinājumā ar telpisko NVT, PFLK metodes bojājumu lokalizācijas veikspēja ir augstāka, taču arī tās jutība attiecībā pret signālu trokšņiem ir lielāka;
- izstrādāto metožu veikspēja ir uzlabota, izmantojot statistiskās hipotēzes pārbaudi. Nenozīmīgās bojājumu indeksa vērtības ir pielīdzinātas nullei, tādējādi izceļot lielāko amplitūdu pīķus, kas atrodas bojājuma vietā;
- izstrādāto metožu veikspēja ir novērtēta, izmantojot promocijas darbā ieviesto lielumu – bojājumu noteikšanas paļāvība (BNP), kas izteikta procentos. Kā paredzēts, BNP vērtības samazinās, samazinoties pašsvārstību formu izšķirtspējai jeb sensoru blīvumam, tomēr vislielākā veikspēja nav saistīta ar vislielāko sensoru blīvumu –

pašsvārstību formu ar mazāku datu punktu skaitu gadījumā ($p = 2$) metodes ir noturīgākas pret troksni, uzlabojot veikspēju;

- saskaņā ar dažādu bojājumu dziļumu simulāciju rezultātiem alumīnija sijai ar vienu bojājumu izstrādātās bojājumu lokalizācijas metodes ir drošs rīks bojājumu lokalizācijai pat salīdzinoši seklu bojājumu gadījumā. Izņēmums ir NVMDS metode, kuras sniegums (BNP vērtība) ir nestabils, ja ir palielināts bojājuma dziļums un ir mainīgs sensoru blīvums;
- viens no lielākajiem izstrādāto metožu ierobežojumiem ir “malu efekts” – ievērojamas bojājumu indeksa vērtības konstrukcijas malās, kur bojājumu nav. Tā iemesls ir tas, ka pašsvārstību formas nav nepārtrauktas konstrukciju malās. Problēma var tikt risināta, piemēram, mākslīgi ekstrapolējot pašsvārstību formas ar nulles vērtībām, taču tas netika darīts, jo nav saistīts ar promocijas darba uzdevumiem.

Promocijas darba otrajā daļā tika pētītas akustiskas emisijas (AE) avotu atdalīšanas iespējas pilna izmēra iepriekš nospriegotos dzelzsbetona dzelzceļa gulšņos, izmantojot datu klasifikācijas paņēmienus. Veicot statistiskās trīspunktu lieces testus, tika ierakstīti akustiskās emisijas signāli ar četriem sensoriem. Tradicionālās slodzes-izlieces līknes tika salīdzinātas ar akustiskās emisijas signāliem vienādos laika mērogos ar mērķi noteikt sakarību starp plaisāšanas slodzēm un akustiskas emisijas impulsu enerģijas pēkšņu pieaugumu. Akustiskās emisijas avotu atdalīšanai un emisijas pīķa frekvenču nobīdes līdz ar attālumu no lielākās plaisu koncentrācijas raksturošanai tika izstrādāta datu klasifikācijas shēma, balstoties uz lēmumu pieņemšanas kokiem ar optimizētiem hiperparametriem. Apzinoties esošos pētījumus šajā jomā, šī pētījuma rezultāti varētu tikt izmantoti dzelzceļa pašuzraudzības sistēmu izstrādē, piemēram, iepriekš nospriegotos dzelzsbetona gulšņos, kas tiktu izmantoti tādās dzelzceļa joslas kritiskās pozīcijās kā dzelzceļa tilti, pārejas zonas, pārmiju pārvedas un pārbrauktuves. Tādējādi tiks būtiski uzlabotas jau esošas dzelzceļa tīklu bojājumu monitoringa metodes.

Ir izstrādāta jauna metode masveidā ražotu tipveida divdimensiju konstrukciju bojājumu monitoringam ar defektu lokalizāciju, pamatojoties uz uzraudzīto mašīnapmācību shēmu. Metode ir validēta oglekļa šķiedras kompozīta lamināta konsolplātnes eksperimentālajā pētījumā. Formulēti šādi secinājumi:

- AE tehnoloģija ir efektīvs rīks sākotnējo plaisu noteikšanā. Plaisāšanas izraisītie akustiskās enerģijas impulsi korelē ar citiem mainīgajiem lielumiem slogošanas laikā;
- reģistrētie AE dati apstiprina dzelzsbetona gulšņu mehānisko uzvedību lieces slodzē. Izlieces līknes analīze ir salīdzinoši vienkāršs paņēmiens bojājumu konstatēšanai reālā laikā, jo vertikālo pārvietojumu ieraksts sniedz iespēju novērtēt konstrukcijas tehnisko stāvokli. Akustiskās emisijas impulsu skaits strauji pieaug plaisu parādīšanās un izplatīšanās laikā. Vislielākā plaisāšanas koncentrācija reģistrēta gulšņu vidusdaļā, kas tika apstiprināts ar vislielāko akustiskās emisijas impulsu proporciju tieši no vidusdaļas, nevis no citiem sensoriem, kas izvietoti tālāk;
- katrs AE avots ir unikāls ar noteiktu signāla ainu un emisijas parametru vērtībām. Šajā promocijas darbā AE avoti tika atdalīti viens no otra, ļaujot tos analizēt atsevišķi. Šī atdalīšanas procedūra ir noderīga, novērtējot akustiskās emisijas intensitātes

proporciju no katra emisijas avota un konstatējot kritiskākos avotus konstrukcijā. Šiem kritiskajiem AE avotiem ir potenciāls laika gaitā samazināt konstrukcijas nestspēju, plaisām rodoties un izplatoties. AE avotu atdalīšana realizēta, izmantojot datu klasifikācijas metodi, balstītu uz lēmumu pieņemšanas kokiem ar optimizētiem hiperparametriem;

- ir parādīts, ka akustiskās emisijas analizējamo parametru skaita samazināšanai no astoņiem līdz diviem avotu savstarpējai atdalīšanai ir salīdzinoši neliela ietekme uz akustiskās emisijas avotu klasifikācijas precizitāti – samazinājums ir apmēram 10 %, tomēr apstrādājamo datu apmērs samazinās par 70 %;
- visu četru dzelzsbetona gulšņu gadījumā emisijas pīķa frekvenču dinamika, palielinoties slodzei, liecina, ka vairums pīķa frekvenču vērtību grupējas trīs joslās, kuru vērtības, vidējotas pa visiem gulšņiem, ir atbilstoši [150–300] kHz, [300–460] kHz un [500–800] kHz;
- trokšņa radīto emisijas pīķa frekvenču atfiltrēšanai piemērots uzlabotais universālais sliekšnis. Datu filtrēšanas rezultāti liecina, ka iespējams saglabāt 14 % līdz 34 % no sākotnēji ierakstīto pīķa frekvenču vērtību skaita, tajā pašā laikā saglabājot 53 % līdz 98 % no sākotnējā emisijas impulsu skaita;
- pretstatā vairumam gadījumu klasifikācijas modeļa veikspēja pievienotās masas lokalizēšanai uz oglekļa šķiedras kompozīta lamināta konsolplātnes ir augstāka, izmantojot tikai divus deformāciju mērījumu punktus katrā plātnes zonā;
- lai gan ar abiem klasifikācijas modeļiem nebija iespējams iegūt pārliecinošus defekta lokalizēšanas rezultātus metodes eksperimentālās validācijas sarežģītākajos gadījumos, izstrādātajai metodei tomēr ir perspektīva konstrukciju elementu bojājumu monitoringā;
- salīdzinot klasifikācijas modeļu veikspēju pie konstrukcijas dažādām ierosmes rezonanses frekvencēm, konstatēts, ka vismazākās klasifikācijas kļūdas iegūtas, izmantojot fundamentālo pašsvārstību frekvenci liecē.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Grāmatu nodaļas

1. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. A. Sumbatyan, A. Chate. Localization of Impact Damage in Thin-Walled Composite Structure Using Variance-Based Continuous Wavelet Transform In book: *Non-destructive Testing and Repair of Pipelines*, Chapter 2.5 (Editors – Evgeny N. Barkanov, Andrei Dumitrescu, Ivan A. Parinov), 2017, pp. 73–89, Springer, DOI: 10.1007/978-3-319-56579-8_6. **WEB OF SCIENCE**.

Žurnālu raksti

1. **R. Janeliukstis**, A. Clark, M. Papaelias, S. Kaewunruen. Flexural cracking-induced acoustic emission peak frequency shift in railway prestressed concrete sleepers. *Engineering Structures*, 178, 2019, pp. 493–505. **SCOPUS**.
2. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Classification Model for Damage Localization in a Plate Structure. *Mechanics of Composite Materials*, 53(6), 2018, pp. 725–736. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
3. R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, S. Kaewunruen. Fatigue Life Assessment Method for Prestressed Concrete Sleepers. *Frontiers in Built Environment* 3:68, 2017, pp. 1–13.
4. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Experimental structural damage localization in beam structure using spatial continuous wavelet transform and mode shape curvature methods. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 102, 2017, p. 253–270. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
5. S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, P. Akishin, A. Chate. Mode shape-based damage detection in plate structure without baseline data. *Structural Control and Health Monitoring*, 23 (9), 2016, pp. 1180–1193. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
6. **R. Janeliukstis**, S. Kaewunruen, M. Papaelias. A novel separation technique of flexural loading-induced acoustic emission sources in railway prestressed concrete sleepers. *IEEE Access*. **SCOPUS**.
7. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, S. Kaewunruen. Mode shape curvature squares method for crack detection in railway prestressed concrete sleepers. *Engineering Failure Analysis*. **Submitted**.
8. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Condition monitoring enhanced with pseudo-defect localization in a two-dimensional structural element based on supervised multiclass classification of strain features. *Nondestructive Testing and Evaluation*. **Submitted**.

Konferenču raksti un tēzes

1. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Classification-based Damage Localization in Composite Plate using Strain Field Data, *Journal of Physics: Conference Series*, 1106, 012022, 2018. **SCOPUS**.

2. S. Kaewunruen, **R. Janeliukstis**, A. Freimanis, K. Goto. Normalized curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers, *Journal of Physics: Conference Series*, 1106, 012002, 2018. **SCOPUS**.
3. P. Skels, **R. Janeliukstis**, V. Haritonovs. Review on structural health interrogation using fiber bragg grating sensors, *Engineering for Rural Development*, 2018. **SCOPUS**.
4. S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, R. You. Dynamic amplification factors for railway turnout bearers in switches and crossings, *COMPdyn 2017 – Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017. **SCOPUS**.
5. S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, R. You. Influences of surface abrasions on dynamic behaviours of railway concrete sleepers, 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, 2017. **SCOPUS**.
6. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Multiple Damage Identification in Beam Structure Based on Wavelet Transform, *Procedia Engineering*, 172, p. 426–432, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
7. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Damage identification in beam structure based on thresholded variance of normalized wavelet scalogram, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251, 012089, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
8. A. Clark, S. Kaewunruen, **R. Janeliukstis**, M. Papaelias. Damage Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers using Acoustic Emission, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251, 012068, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
9. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Kovalovs, A. Chate. Numerical Investigation on Multiclass Probabilistic Classification of Damage Location in a Plate Structure. *International Conference on Structural Engineering Dynamics ICEDyn 2017: Technical Programme & Book of Abstracts*, Portugal, Ericeira, July 3–5, 2017, pp. 57–58.
10. **R. Janeliukstis**, A. Clark, S. Rucevskis, S. Kaewunruen. Vibration-Based Damage Identification in Railway Concrete Sleepers. *Proceedings of SMAR 2017 Conference*, Switzerland, Zurich, September 13–15, 2017, pp. 193–201.
11. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, P. Akishin, A. Chate. Wavelet Transform Based Damage Detection in a Plate Structure, *Procedia Engineering*, 161, pp. 127–132, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
12. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage Identification in Polymer Composite Beams Based on Spatial Continuous Wavelet Transform, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 111, 012005, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
13. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Damage Identification Dependence on Number of Vibration Modes Using Mode Shape Curvature Squares, *Journal of Physics: Conference Series*, 744, 012054, 2016. **SCOPUS**.

14. S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, P. Akishin, A. Chate. Vibration-based approach for structural damage detection, ICSV 2016 – 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
15. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage identification in beam structure using spatial continuous wavelet transform. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96, 012058, 2015. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
16. M. Wesolowski, S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, M. Polanski. Damping properties of sandwich truss core structures by strain energy method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96, 012022, 2015. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**.
17. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate, A. Kovalovs. Damage Identification in Beam Structure Using Mode Shape Data: from Spatial Continuous Wavelet Transform to Mode Shape Curvature Methods. *Proceedings of ICoEV 2015: International Conference on Engineering Vibration*, Slovenia, Ljubljana, September 7–10, 2015, pp. 1–10.
18. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage Identification in Polymer Composite Beams based on Spatial Continuous Wavelet Transform and Mode Shape Curvature Squares. *Baltic Polymer Symposium 2015: Programme and Proceedings*, Latvia, Sigulda, September 16–18, 2015, pp. 105–105.

INTRODUCTION

Motivation and Scope

Demands for structural integrity of different civil and engineering structures have grown over the years. This can be mainly attributed to the increasing complexity and size of such structures as civil buildings, skyscrapers, bridges, dams, stadiums, tunnels, and industrial facilities, naval and aerial transport. Also, these structures need to maintain structural integrity and functionality throughout the entire service life under constantly changing environmental conditions and, in some cases, in aggressive environments. The consequences of a structural failure are often tragic and involve serious financial investments.

In order to prevent these catastrophes, safety inspections have to be carried out on a regular basis. However, these inspections are often time consuming and costly and, as a result, non-destructive structural health monitoring (SHM) has emerged as a new field in engineering community. SHM has gained significance in the era of complex and massive structures and vehicles in domains of civil, mechanical and aerospace engineering communities. Lightweight structures such as airplanes are also increasingly exploiting the benefits of SHM. SHM technologies are based on sensors (usually piezoelectric or optical fibre) which are mounted directly on the structure or, in case of layered composite structures, embedded within the structure. In conjunction with control units these sensors are used to signal any changes in internal state of the structure in response to environmental loads (temperature, pressure) or direct damage. Systems equipped with such technologies have the obvious benefits over conventional structures of preventing disastrous structural collapses, extending infrastructure lifetime, and reducing maintenance costs and helping design of composite materials [1].

Aims of the Thesis

Although numerous SHM solutions particularly targeted at composite structures already exist, some factors hinder their potential implementation in practice. This is due to complex nature of composites themselves, in particular, anisotropy. Moreover, different possible failure modes in composite structures may require sophisticated tailoring of SHM methods. Also, high demands for structural safety are imposing high standards to SHM in terms of reliability, robustness and safety. Therefore, the aim of this Doctoral Thesis is to develop damage identification methods for one-dimensional and two-dimensional structures using mode shape transformation methods, as well as classification framework for damage interrogation in railway sleepers and condition monitoring of two-dimensional structural members.

Tasks of the Thesis

In order to accomplish the aim, the following tasks are set:

- to review the relevant scientific literature on various vibration-based and machine learning-based SHM techniques;

- to develop methods for structural damage localization in one-dimensional and two-dimensional structures by using structural deflection shape transformations based on novel modifications of continuous spatial wavelet transform and mode shape curvature square method;
- to develop methods for damage identification in full-scale pre-stressed railway concrete sleepers using advanced signal processing techniques based on supervised learning of acoustic emission signals;
- to develop a method for condition monitoring of massively produced two-dimensional structural parts with an added benefit of structural defect localization using supervised learning algorithms;
- to validate the developed methods in experimental studies.

Scientific Novelty

A novel structural damage localisation algorithm for beam structures based on variance of normalized scalogram of spatial continuous wavelet transform is developed. The benefits of this algorithm include the use of all wavelet functions so that there is no need to select the most appropriate function. The second advantage of this method is that no particular scale parameter has to be chosen. This novel method is compared with conventional spatial continuous wavelet transform and mode shape curvature square technique and its advantages are highlighted.

Smoothing techniques for mode shape data are proposed in order to simulate mode shapes of healthy structure using exclusively the mode shape data of damaged structure. Hence, there is no need for modal information of a healthy structure, which is often impossible to obtain.

Acoustic emission source separation technique for pre-stressed railway concrete sleepers based on supervised learning algorithms is developed. By separating these sources, a unique signature of each source in a form of frequency content can be studied further. Peak frequency shifts with a distance from the largest concentration of cracks, which, in turn, are acoustic emission sources, is studied and a correlation law is established.

Practical Significance of the Thesis

Methods for structural damage localization in beam and plate structures are developed allowing to locate damage in structural members using deflection shape data of the damaged structure. Hence there is no need to obtain the baseline deflection shape information of the healthy structure. The developed methods can, up to a point, be effectively used on deflection shapes contaminated with noise of varying degree (at least 4 %) and different sensor densities or resolutions of deflection shapes.

Method for acoustic emission source separation in full-scale pre-stressed railway concrete sleepers is developed, which might be used to gain fundamental insights in peak frequency contents of acoustic emission from cracking concrete during service life after processing the signals obtained from acoustic emission sensors mounted on sleepers, which lie in the most

critical locations of railway track, namely, turnouts. These contents then, in turn, can be correlated with relevant operational failure modes of the sleepers under dynamic loading from passing railway stock.

Supervised machine learning schemes are effective in interrogating structural changes, such as changes in mass or stiffness. This approach, developed for two-dimensional mass-produced structural elements (wind turbine blades, aircraft wings, etc.), can be effectively applied in aerospace industry in order to detect and localize and potentially determine the severity of damage in aircraft elements equipped with sensor network of reasonable density.

Methodology of the Research

- Deflection shape measurements were carried out using non-contact laser scanning vibrometer *Polytec*TM PSV-400-B.
- Deflection shape signals were post-processed and all the calculations were performed using mathematical package *Matlab*TM.
- Numerical models of the structures as well as numerical modal analysis was conducted using commercial finite element package *Ansys*TM.
- Impact damage was implemented using low-velocity impact drop tower *Instron*TM Dynatup 9250 HV.
- Railway concrete sleepers were subjected to three-point bending according to the European Standard BS EN 13230.
- Acoustic emission signals in railway concrete sleepers under flexural loading were recorded using a 4-channel DAQ AE system from Physical Acoustics Corporation (PAC, now *Mistras*). The data acquisition was performed using AE-Win software.
- Mechanical strains in the CFRP plate were measured using two 350 Ω strain gauges, and dynamic excitation of the plate was conducted by employing *MFC*TM (Macro Fibre Composites) actuator. *Agilent* 3322A 20 MHz Waveform generator was used for harmonic excitation of the plate. *Spider 8* acquisition system was used for strain signal acquisition, and *Catman* software was used for visualization.
- Statistics theory was used for data post-processing.

Applicability Limitations of the Developed Methods

- The developed methods for structural damage localization are applicable to beam (one dimension) and plate (two dimensions) structural elements only.
- Deflection shape signals of the damaged structure must be readily available for the implementation of the algorithms of damage localization. Chances of successful damage localization improve with increasing number of deflection shape signals, as with fewer signals at hand there is a higher possibility that zero amplitude of the signal coincides with a location of damage.

- All available wavelet functions at different scale parameters and Fourier approximation functions must be tested in order to select the one with the best performance as this information is not available a priori.
- No damage at the edges of the structures can be localized using the developed algorithms due to edge effects.
- Only limited number of acoustic emission sensors can be mounted on railway sleepers on field. For higher feasibility, it is advised to mount the sensors only on sleepers in the most critical locations of the railway track.
- The high sensitivity to noise of the acoustic emission approach suggests that a reasonable cracking severity has to be reached in order for the developed method to provide early warning of damage in the case of sleeper operation on an actual railway track.

The Arguments for Defence of the Thesis

1. Methods for structural damage localization in one-dimensional and two-dimensional structures by using structural deflection shape transformations based on novel modifications of continuous spatial wavelet transform and mode shape curvature square methods are developed.
2. Methods for damage identification in full-scale pre-stressed railway concrete sleepers using advanced signal processing techniques based on supervised learning of acoustic emission signals are developed.
3. Method for condition monitoring of massively produced two-dimensional structural parts with an added benefit of defect localization using supervised learning algorithms is developed.
4. The developed methods are experimentally validated and suggest that structural damage can be effectively localized.

Structure of the Thesis

Chapter 1: Overview of problems of structural inspection.

Chapter 2: Description of developed damage localization algorithms.

PART I – Mode shape transformations

Chapter 3: Damage localization in beam structures using developed structural damage localization methods.

Chapter 4: Damage localization in plate structures using developed structural damage localization methods.

PART II – Classification of damage-sensitive features

Chapter 5: Condition monitoring with defect localization in two-dimensional structures based on supervised multiclass classification of strain features.

Chapter 6: Characterization of acoustic emission sources in pre-stressed railway concrete sleepers using classification algorithms.

Conclusions.

1. TRENDS IN STRUCTURAL DAMAGE ASSESSMENT

Currently 27 % of an average aircraft's life cycle cost is spent on inspection and repair. The aerospace industry is increasingly using composite materials to take advantage of their excellent specific strength and stiffness properties, fatigue performance, as well as their ability to reduce radar detection [2]. Unfortunately, composites are also subjected to deterioration and crack damage will appear during their service due to aging, chemical corrosion, mechanical vibration, shocks, etc. [3]. The studies of low-velocity impact are important in case of composite materials because impact is one of the main failure modes of composites in through-thickness direction [4].

Railway concrete sleepers and bearers are a safety-critical component of the railway system. Despite the fact that there are more than 1 billion concrete sleepers and bearers around the world, their structural health monitoring systems have not fully been developed. Railway sleepers are designed to transfer the load from the rails into the ballast and substructure below and to secure track gauge during train traffics to prevent track movement in longitudinal and lateral directions. Two main failure mechanisms are the tensile cracking and compressive crushing of the concrete [5]. In [6], for both hard and soft tracks it was flexural cracking that occurred first. Hence, sophisticated SHM methods are of great importance for safe operation of structures.

1.1. Vibration-Based Damage Identification

One of the most popular classes of SHM methods is based on structural vibrations. These methods rely on the fact that dynamic characteristics, namely, resonant frequencies, mode shapes and damping are influenced by the stiffness of the structure. Several studies [7]–[9] have shown that mode shape transformations have been proved to be highly sensitive to damage and could be used for damage detection and quantification. The most serious shortcoming of those methods, however, is a necessity for a baseline data of a healthy structure, which in most cases is difficult or even impossible to obtain.

1.2. Supervised Learning Using Extraction of Damage-Sensitive Features

With the development of machine learning concepts, the methodologies from regression and classification were transferred to the domain of SHM where they have been successfully applied to capture the damage – detection, localization, quantification of severity and, perhaps, estimation of the remaining useful life of the structure. Data classification algorithms hold a potential to be applied in damage detection methodologies based on relevant feature extraction from vibration signals of monitored structures.

2. DAMAGE LOCALIZATION ALGORITHMS

2.1. Continuous Spatial Wavelet Transform

Damage index for each of mode shapes (in 2D) is depicted as follows:

$$DI_{i,j,s}^n = \iint_S w_{i,j}^n \psi_{s,a,b}^*(x, y) dx dy, \quad (2.1)$$

where w^n – the measured transverse displacement of the structure;

ψ – wavelet function;

s – scale factor (expands or contracts wavelet function);

a, b – translation factors (move the wavelet function in x and y directions, respectively);

n – mode number;

i – number of grid points in x direction;

j – number of grid points in y direction;

S – surface of a plate, m^2 .

Asterisk denotes complex conjugation. These wavelet transform coefficients are extremely sensitive to any discontinuities and singularities of signal (w in this case), therefore damage due to a sudden loss of stiffness can be detected in mode shapes that have large amplitude wavelet coefficients.

Mode shapes, measured in experimental conditions, are always contaminated by measurement noise, which may lead to false peaks in damage index profiles, thus misleading data interpretation. In order to overcome this problem, the summarized damage index is then defined as the average summation of damage indices for all modes and normalized with respect to the largest value of each mode

$$DI_{i,j,s} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{DI_{i,j,s}^n}{\max(DI_{i,j,s}^n)}, \quad (2.2)$$

where N – total number of modes.

According to [10] and [11], these damage indices are then standardized and a concept of statistical hypothesis testing is applied to classify damaged and healthy elements and to localize damage depending on the pre-defined damage threshold value yielding *standardized damage index*

$$SDI_{i,j,s} = \frac{DI_{i,j,s} - \mu_s}{\sigma_s}, \quad (2.3)$$

where μ_s – scale-dependent mean value of damage indices $DI_{i,j,s}$;

σ_s – scale-dependent standard deviation of damage indices $DI_{i,j,s}$.

A new damage metric, called *damage estimate reliability* (DER), is introduced in an attempt to quantify the performance of wavelet functions. DER is a ratio of an average SDI in the zone of damage divided by an average SDI in all structure and expressed in percentage.

2.2. Thresholded Variance of Normalized Wavelet Scalogram

Three-dimensional plots showing magnitude of CWT coefficients versus different scale factors and time or space are known as *wavelet scalograms* [12], [13]. More beneficial, however is a *normalized wavelet scalogram* (NWS):

$$NWS_{s,a(i)} = \left| \frac{W_{s,a(i)}}{s} \right|^2. \quad (2.4)$$

Regions of maxima in NWS (ridges) correspond to the most energetic features of the signal and denote the location of damage for a spatial CWT.

Damage metric for this method is defined as a *variance of a normalized wavelet scalogram* with respect to scale factor and expressed as follows:

$$S_{a(i)} = \sigma^2(NWS_{s,a(i)}, s). \quad (2.5)$$

Universal threshold is defined as:

$$T = \sigma \sqrt{2 \ln(A)} = \frac{MAD}{0.6745} \sqrt{2 \ln(A)} = \frac{\text{Median}|S_{a(i)} - \text{Median}(S_{a(i)})|}{0.6745} \sqrt{2 \ln(A)}, \quad (2.6)$$

where σ – the standard deviation of noise of $S_{a(i)}$;

A – number of DOFs in a mode shape signal;

MAD – Median Absolute Deviation.

Universal Threshold is applied to variance distribution to filter out the insignificant values. The $S_{a(i)}$ values that do not pass the threshold value T , are assigned a value of zero, otherwise these values are assigned a value of 1, giving *thresholded variance of normalized wavelet scalogram*

$$\begin{aligned} \text{if}(S_{a(i)} \geq T) &\rightarrow TS_{a(i)} = 1 \\ \text{else} &\rightarrow TS_{a(i)} = 0. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Values of $TS_{a(i)}$ are summed up over all wavelet functions for each i , yielding *summarized thresholded variance of normalized wavelet scalogram*

$$\Lambda_{a(i)} = \sum_{j=1}^{78} TS_{a(i),j}. \quad (2.8)$$

All i values of $\Lambda_{a(i)}$ are summed to yield *total thresholded variance of normalized wavelet scalogram*

$$\Theta = \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^{78} TS_{a(i),j} = \sum_{i=1}^A \Lambda_{a(i)}. \quad (2.9)$$

$\Lambda_{a(i)}$ is expressed in percent of Θ for each i , giving *fractional thresholded variance of normalized wavelet scalogram*

$$Z_{a(i)} = 100 \cdot \Lambda_{a(i)} / \Theta. \quad (2.10)$$

The universal threshold (T_2 to distinguish from threshold applied to $S_{a(i)}$) is applied to $Z_{a(i)}$, and the logical decision as the one stated in Equation (2.7) is applied once more

$$\begin{aligned} \text{if}(Z_{a(i)} \geq T_2) &\rightarrow TZ_{a(i)} = 1 \\ \text{else} &\rightarrow TZ_{a(i)} = 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

The final decision on the location of damage is based on those coordinates x (related to i) that correspond to $Z_{a(i)}$ values that have passed the universal threshold T_2 .

2.3. Mode Shape Curvature Square

In real life, baseline data of a healthy structure is rarely available, especially for structures that are already in exploitation. This Thesis provides means to estimate a state of a healthy structure through an interpolation technique applying a Fourier series approximation on a mode shape curvature data of the damaged structure in one dimension, thus generating smooth mode shape curvature curves. The trigonometric form of Fourier series is

$$\kappa(x) = a_0 + \sum_{i=1}^u a_i \cos(u\omega x) + b_i \sin(u\omega x), \quad (2.12)$$

where a_0 – constant (intercept) term in the data and is associated with the $i = 0$ cosine term;

ω – the fundamental frequency of the signal;

u – the number of harmonics or order of a series.

In this Thesis, the mode shape curvature data of beams is approximated with Fourier series functions of orders 1–8.

Damage localization algorithm is extended to two dimensions to tackle the problem in plate-type structures. The mode shape curvature of a healthy structure has a smooth surface and in two dimensions is obtained by a polynomial approximation. This procedure is carried out using a mode shape curvature of a damaged structure and applying the least-squares fitting technique. The damage index DI is defined as the absolute difference between the measured curvature of the damaged structure and reconstruction of the mode shape curvature approximation with Fourier series (or polynomial approximation in 2D) representing the healthy structure.

$$DI_{i,j}^n = \left| \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial x^2} \right)_{(i,j)} - \kappa_x^{n^2}(i,j) \right| + \left| \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial y^2} \right)_{(i,j)} - \kappa_y^{n^2}(i,j) \right|, \quad (2.13)$$

where κ_x^n and κ_y^n – reconstructed mode shape curvature in x and y direction, respectively, m^{-2} .

The mode shape curvatures are calculated from the mode shapes by the central difference approximation at grid point (i, j) as:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial x^2} \right)_{(i,j)} &= \frac{w_{i+1,j}^n - 2w_{i,j}^n + w_{i-1,j}^n}{h^2}; \\ \left(\frac{\partial^2 w^n}{\partial y^2} \right)_{(i,j)} &= \frac{w_{i,j+1}^n - 2w_{i,j}^n + w_{i,j-1}^n}{h^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

where h – the distance between two successive nodes or measured points, m.

The summarized damage index is calculated using Equation (2.2). Afterwards, this damage index is also standardized (refer to Equation (2.3)), leading to SDI. DER values are also obtained.

2.4. Data Classification

The study explores the feasibility to develop an effective method for condition monitoring of structural parts using sensor data. The realization of the algorithm is implemented through the following steps.

1. Harmonic analysis of a structural part is carried out to identify the resonant frequencies.
2. Structural part equipped with an actuator is partitioned into arbitrary number of zones (which serve as class labels) and a point mass is applied in each zone an arbitrary number of times.
3. At each event of application of point mass, the mechanical strain ε due to applied harmonic force from the actuator is extracted. It is known that the application of mass will cause a shift of resonant frequency peaks of the structure with respect to the healthy state. Amplitudes of strain readings will decrease in correlation with the magnitude of this frequency shift, hence signaling damage.
4. These extracted strain data is organized into separate matrices for each of the identified resonant frequencies:

$$\begin{array}{cc} \text{1st frequency} & \text{last frequency} \end{array} \quad (2.15)$$

$$\left(\begin{array}{ccc} \{1\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_1|\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_2|\}_{m \times 1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \{n\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_1|\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_2|\}_{m \times 1} \end{array} \right)_{n \times k+1} \quad \left(\begin{array}{ccc} \{1\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_1|\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_2|\}_{m \times 1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \{n\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_1|\}_{m \times 1} & \{|\varepsilon_2|\}_{m \times 1} \end{array} \right)_{n \times k+1}$$

where m – a number of points per each class;

n – a number of zones the part is partitioned into;

k – a number of strain sensors on the part.

The curly braces denote vectorial entities.

5. Two different supervised learning algorithms – linear discriminant and non-linear k -NN are used to build classifiers from the acquired strain data for each of the resonant frequencies separately. In general, any classification scheme can be used.
6. K -fold cross-validation scheme is adopted to tune the parameters of classifiers and avoid overfitting.
7. The algorithm is validated on unknown data points (query points). The final results are displayed in terms of distributions of prediction probability for every zone of the part.

3. DAMAGE LOCALIZATION IN 1D STRUCTURES

3.1. Case Study 1: Aluminium Beams With a Mill-Cut Damage

Commercial finite element program *Ansys*TM is used to build numerical models of all structures considered in this Thesis.

Geometrical configuration of aluminium beams is shown in Fig. 3.1. Two beams with a one site of mill-cut damage and one beam with two damages are considered. FE model of aluminium beams consists of 2D beam elements. The damage is modelled by reducing the flexural stiffness EI of the selected elements, which is achieved by decreasing the thickness of elements.

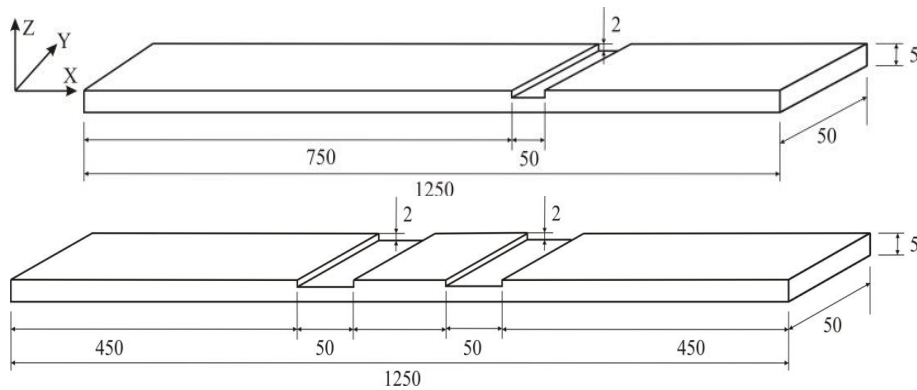


Fig. 3.1. Geometry of aluminium beams (in mm).

In order to compare the sensitivity of the damage identification algorithm to noisy experimental data, a uniformly distributed random noise was added to the numerically simulated mode shapes. It is often not possible to equip the structure with a dense grid of sensors. Therefore an additional study was conducted where numerical mode shape data was divided by integer numbers $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Damage localization procedure employing all 3 algorithms (CWT, MSCS and TVNWS) is carried out using numerically simulated mode shapes contaminated with noise with the levels of $\delta = 0.5 \%$, 1% , 2% and 4% .

Healthy and damaged beams are subjected to the dynamic vibration test in order to store their mode shapes for further application of developed methods. The experimental modal analysis is conducted using a *Polytec*TM PSV-400-B scanning laser vibrometer. See *Polytec*TM system in Fig. 3.2.

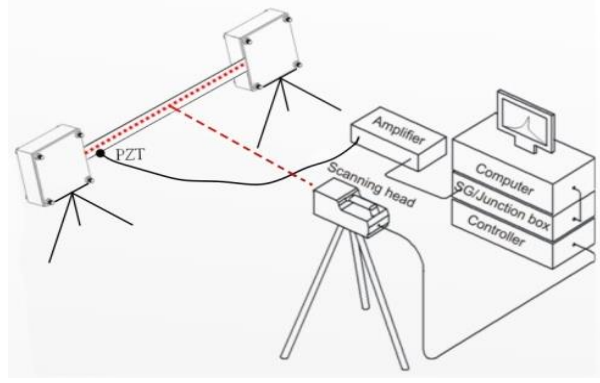


Fig. 3.2. Experimental set-up for modal analysis employing scanning laser vibrometer.

The SDI distributions corresponding to scales with the highest DER are shown in Fig. 3.3. The highest peak is located in the actual zone of damage between two vertical dashed lines, thus damage is located. Large amplitude SDI value is also found at the edges of Al beam 1d.

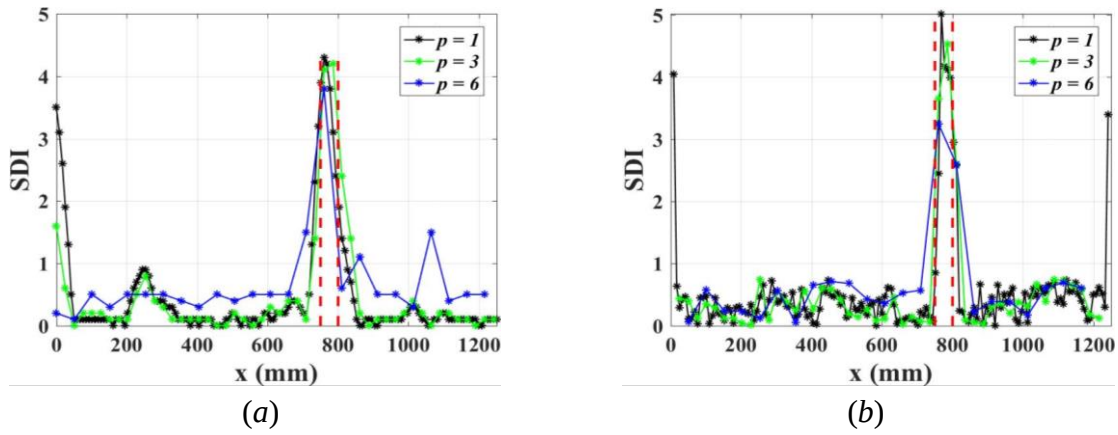


Fig. 3.3. SDI profiles at $p = 1, 3, 6$ (experiment): (a) CWT; (b) MSCS.

Plots of SDI distributions for Al beam 2d using MSCS method are shown in Fig. 3.4, and using CWT method – in Fig. 3.5. For the CWT method, the respective SDI distributions are all shown at scale = 6, set as a reference, since the highest DER value is attained at this scale, at original sensor density. At $p = 1$, the highest SDI peaks are convincingly located between two red vertical lines that indicate the zones of damage. At $p = 3$, however, SDI are widely spread across the coordinate of the beam, clearly not revealing the damage (at scale = 6). Nevertheless, scale = 3 is the best for this case as indicated by a respective DER vs p plot.

By application of statistical hypothesis with damage localization confidence level of 99 %, SDI values lower than a threshold value of 3 are assigned a zero value. Thresholds for SDI are applied to filter out smaller peaks that do not contribute to damage.

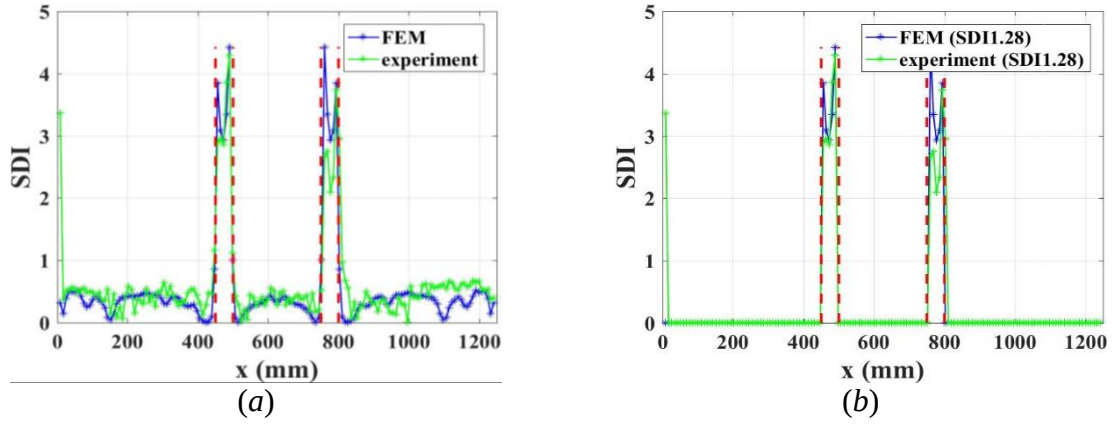


Fig. 3.4. SDI for MSCS method for Al beam 2d: (a) no threshold; (b) thresholded with 90 % confidence.

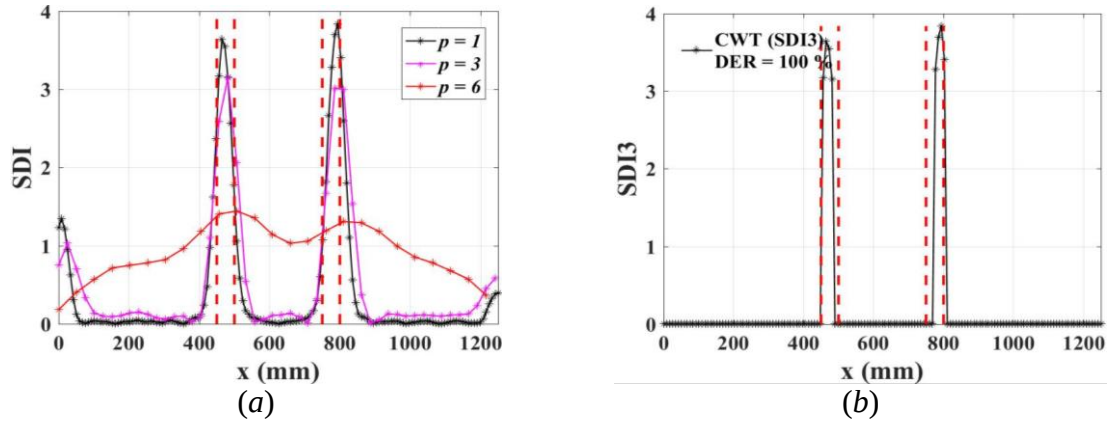


Fig. 3.5. SDI for Al beam 2d (CWT) at scale = 6 (experiment): (a) no threshold; (b) thresholded with 99 % confidence.

Damage localization results using TVNWS method are shown in Fig. 3.6 for Al beam 1d and in Fig. 3.7 for Al beam 2d. The fractionalized wavelet scalograms show that the largest amplitude of variance of normalized wavelet scalogram is between vertical lines – in the zone of damage. By applying the universal threshold the second time (T_2) these values are filtered and the ones passing this threshold are depicted in small inset plots. A separate DER value is calculated for these inset plots and results are shown.

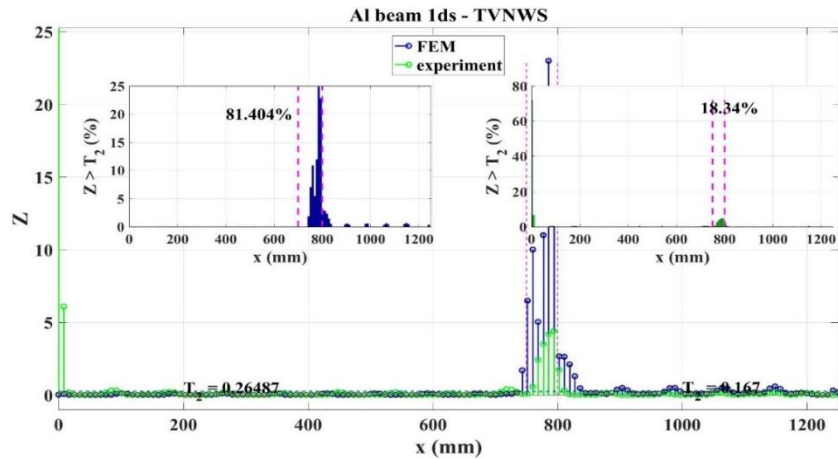


Fig. 3.6. Damage indices for TVNWS method for Al beam 1d.

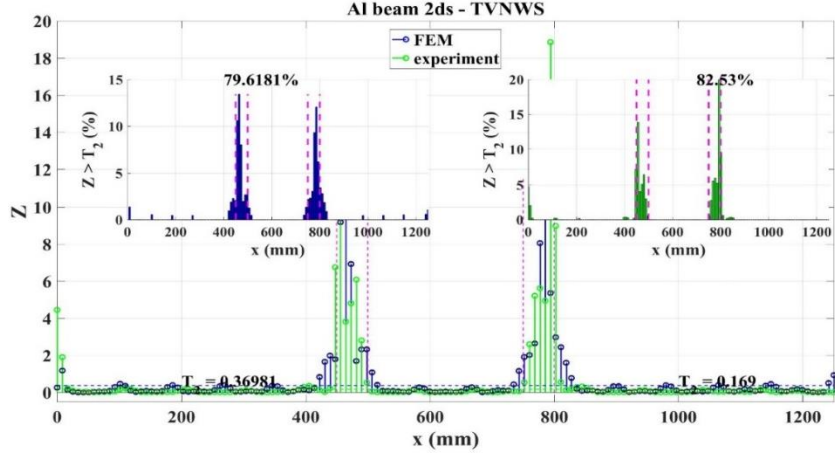


Fig. 3.7. Damage indices for TVNWS method for Al beam 2d.

Sensitivity of the proposed damage localization methods is tested with respect to various damage depths. Numerically simulated mode shapes of Al beam 1d are used for this parametric study. Damage depths ranging from 0.5 mm to 4.5 mm are considered with an increment of 0.5 mm for this beam with 5 mm thickness.

A simultaneous analysis of the effect of changing sensor density (p) is carried out. DER values for cases $p = 1, 3, 6$ are shown in Fig. 3.8. The most stable results are obtained with MSCS method with DER in the range of 83 % to 93 % in all cases. The most unstable performance is achieved, again, with TVNWS. On one hand, high DER values are reached in case of deep damage and high sensor densities. On the other hand, this method is extremely sensitive to sensor density and damage depth with dramatic drop of performance. The CWT method is similar to MSCS method in this regard. However, it shows a higher instability with varying damage depth for lower sensor densities.

Overall, one can conclude that the proposed methods, except for TVNWS, are adequate for damage localization even in the cases of relatively shallow cuts and relatively sparse sensor network for mode shape interrogation.

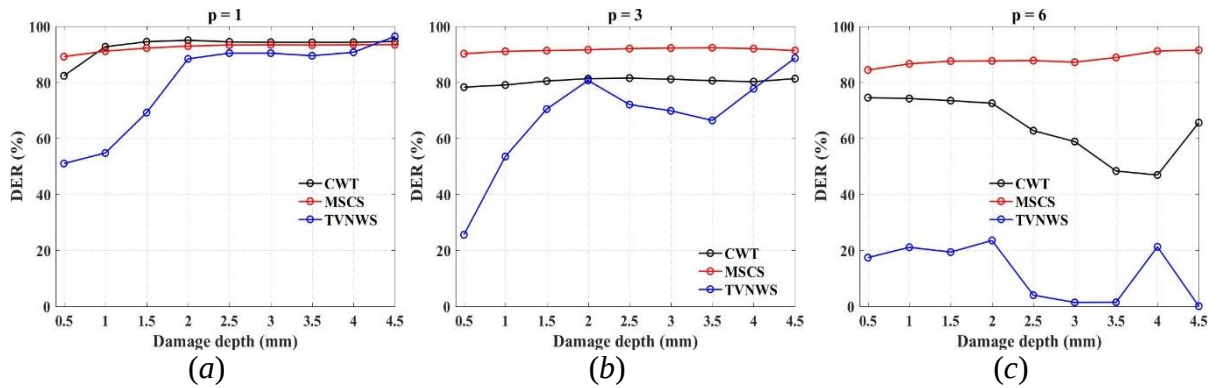


Fig. 3.8. Effect of damage depth and sensor density on DER variability for Al beam 1d for the developed damage localization methods (FEM): (a) $p = 1$; (b) $p = 3$; (c) $p = 6$.

3.2. Case Study 2: Composite Laminate Beam With an Impact Damage

Laminated carbon/epoxy composite beam depicted in Fig. 3.9 is considered. Low-velocity impact test was conducted using INSTRON Dynatup 9250 HV drop tower. The impact energy of 15 J was selected. The zone with dashed lines shows the location of damage based on the outer boundaries of ultrasonic C-scan – it is assumed that the damage is located between 320 mm and 370 mm. The laminate lay-up is $[0/90/+45/-45]_s$ with a ply thickness of 0.3 mm, thus total thickness of the plate is 2.4 mm. FE element model also consists of 2D beam elements. Reduction of stiffness is achieved by decreasing the elastic modulus of elements in the damaged region of the beam. The dynamic vibration test was performed using the scanning laser vibrometer.

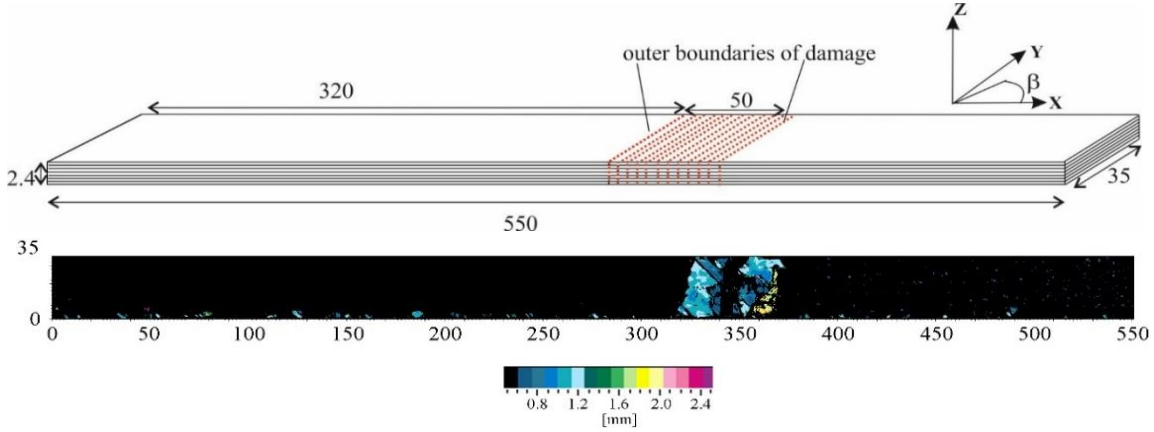


Fig. 3.9. Geometry of a damaged CFRP beam (in mm) and image of ultrasonic C-scanning.

The best wavelet function is *complex Gaus* of order 5 at scale 2 for experimental study and *reverse biorthogonal* wavelet of order 3.1 at scale 9 for numerical case. As for MSCS method, the best approximation function is F4.

Damage identification results for both methods (CWT and MSCS) are shown in Fig. 3.10 and Fig. 3.11, respectively. As one can see, the location of damage, which is indicated between two red dashed lines, is successfully identified by both methods. There are some smaller peaks present in these plots that are later filtered out using SDI thresholds.

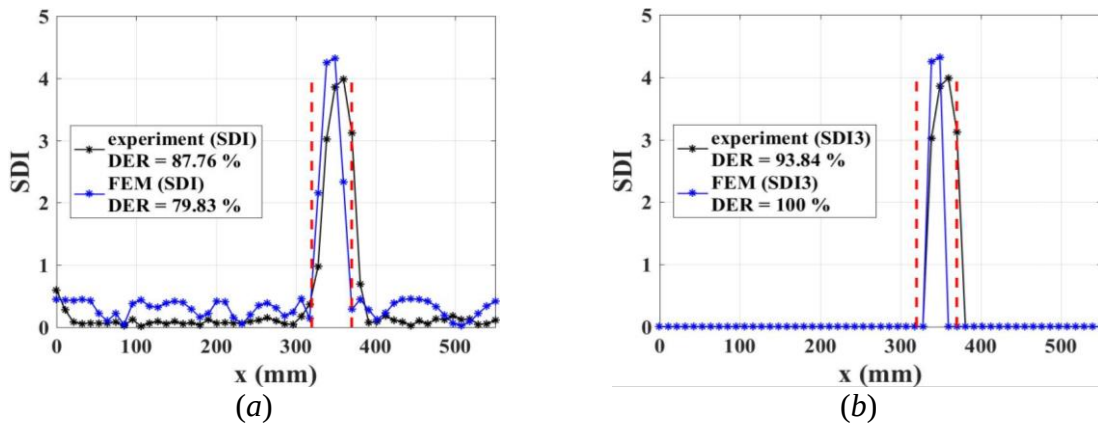


Fig. 3.10. SDI for CWT method: (a) no threshold; (b) thresholded.

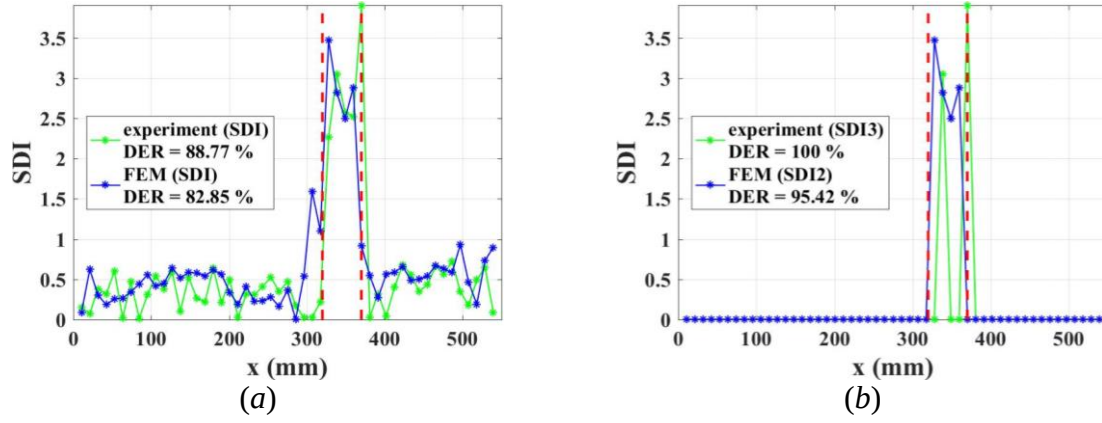


Fig. 3.11. SDI for MSCS method: (a) no threshold; (b) thresholded.

Damage has been localized also using TVNWS method as shown in Fig. 3.12.

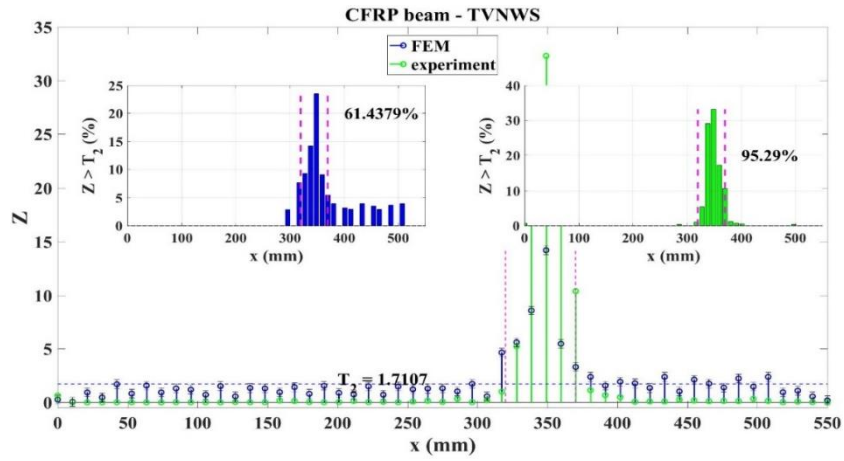


Fig. 3.12. Damage indices for TVNWS method for CFRP beam with an impact damage.

4. DAMAGE LOCALIZATION IN 2D STRUCTURES

4.1. Case Study 1: Aluminium Plate With a Mill-Cut Damage

A square aluminium plate with dimensions of 1000 mm $\times$ 1000 mm and 5 mm thickness is considered. The finite element model of the plate consists of 8-node shear-deformable shell elements, modelling damage by reducing thickness of the selected elements. Mill-cut damage with a depth of 2 mm is introduced in the region $270 \text{ mm} \leq x \leq 350 \text{ mm}$ and $640 \text{ mm} \leq y \leq 700 \text{ mm}$ representing 0.48 % of the plate area (Fig. 4.1 (a)).

Noise-contaminated mode shapes with noise levels $\delta = 1 \%$, 0.5% , 0.1% , 0.05% are simulated. In practice, mode shapes often can be only measured using relatively sparse distribution of sensors and thus the robustness of the proposed method under limited data points is of interest. Thus it is proposed to divide the initial mode shape matrix of 51×51 data points by integer values of $p = 1, 2, 3, 4, 5$. The clamped boundary conditions are realized for the experimental modal analysis by fixing the plate into a specially designed aluminium frame (Fig. 4.1 (b)).

Damage detection results for the experimental test case and the corresponding simulated test case (noise level $\delta = 0.5 \%$) using original matrix of 51×51 data points are given in Fig. 4.2 (a), (c). To classify the damaged elements, it is proposed to truncate the values of standardized damage indices smaller than three units according to the standardized damage index threshold value for the 99 % confidence level for the presence of damage. Now the damage detection results for both cases clearly reveal the pre-determined damage location as shown in Fig. 4.2 (b), (d).

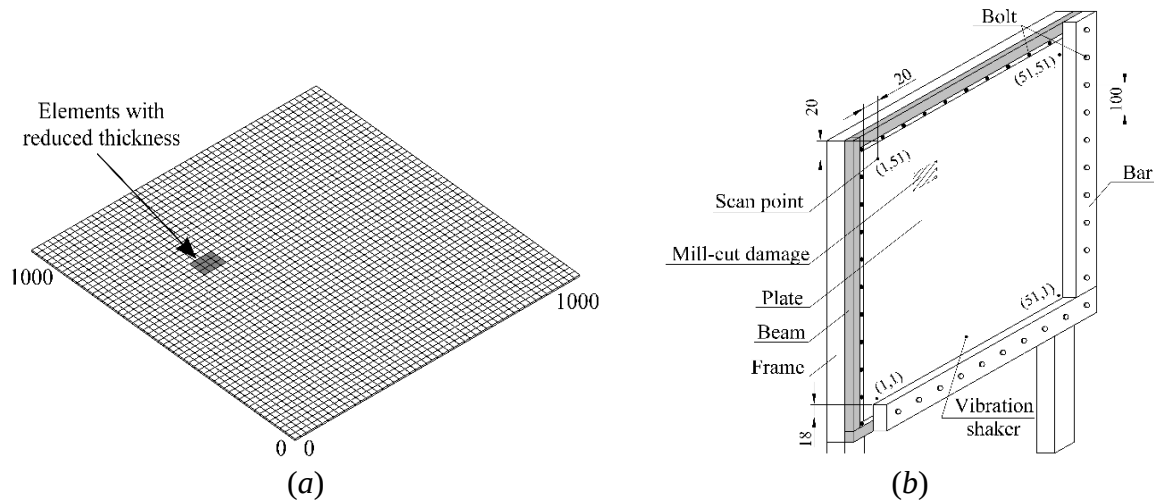


Fig. 4.1. Tested aluminium plate: (a) FE model with damage; (b) clamping boundary conditions for the vibration test.

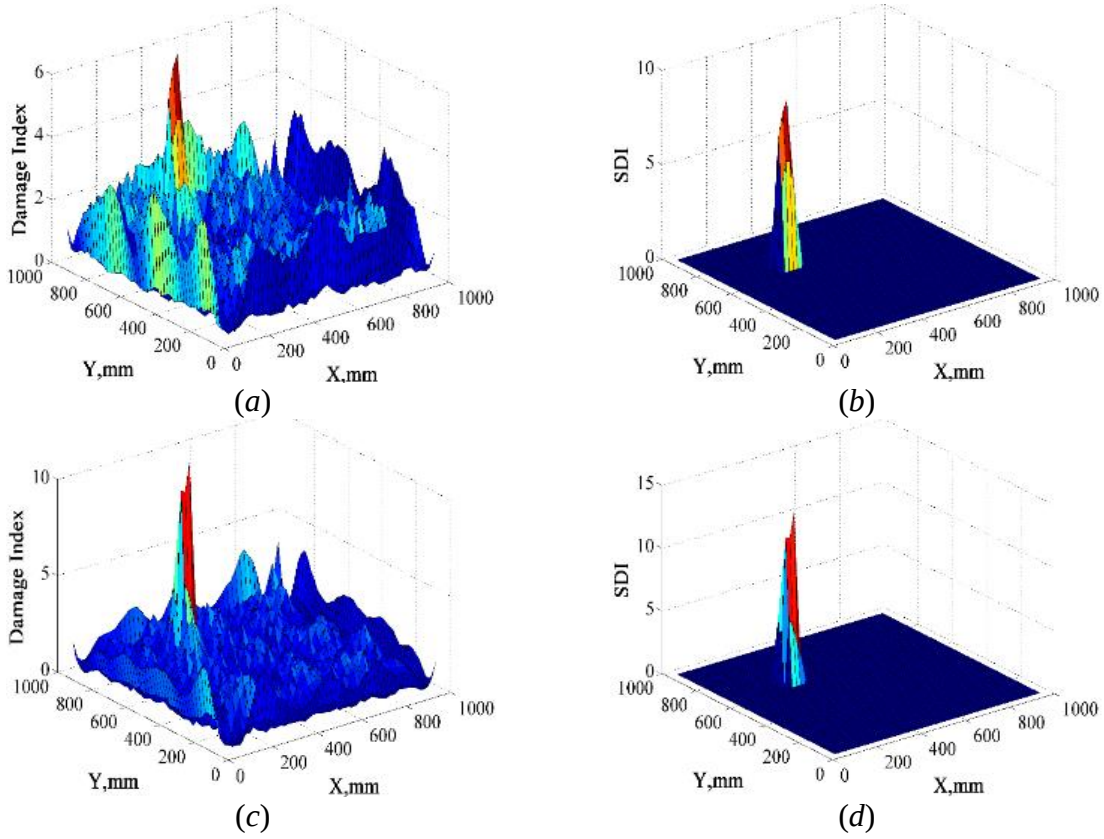


Fig. 4.2. Damage indices for aluminium plate: (a) DI (experiment); (b) SDI with 99 % confidence (experiment); (c) DI (FEM); (d) SDI with 99 % confidence (FEM).

Standardized damage indices presented in Fig. 4.3 illustrate the effectiveness of the proposed method when different numbers of measured mode shape data points are available for the damage detection. The method is still able to detect the damage when the lowest number of measurement points 11×11 is considered for the simulated test case, but it fails to accurately determine the pre-determined location and size of the damage. The results show that robustness of the proposed damage detection algorithm under the limited measured data points is relatively good and the method can be applied for practical structural tests.

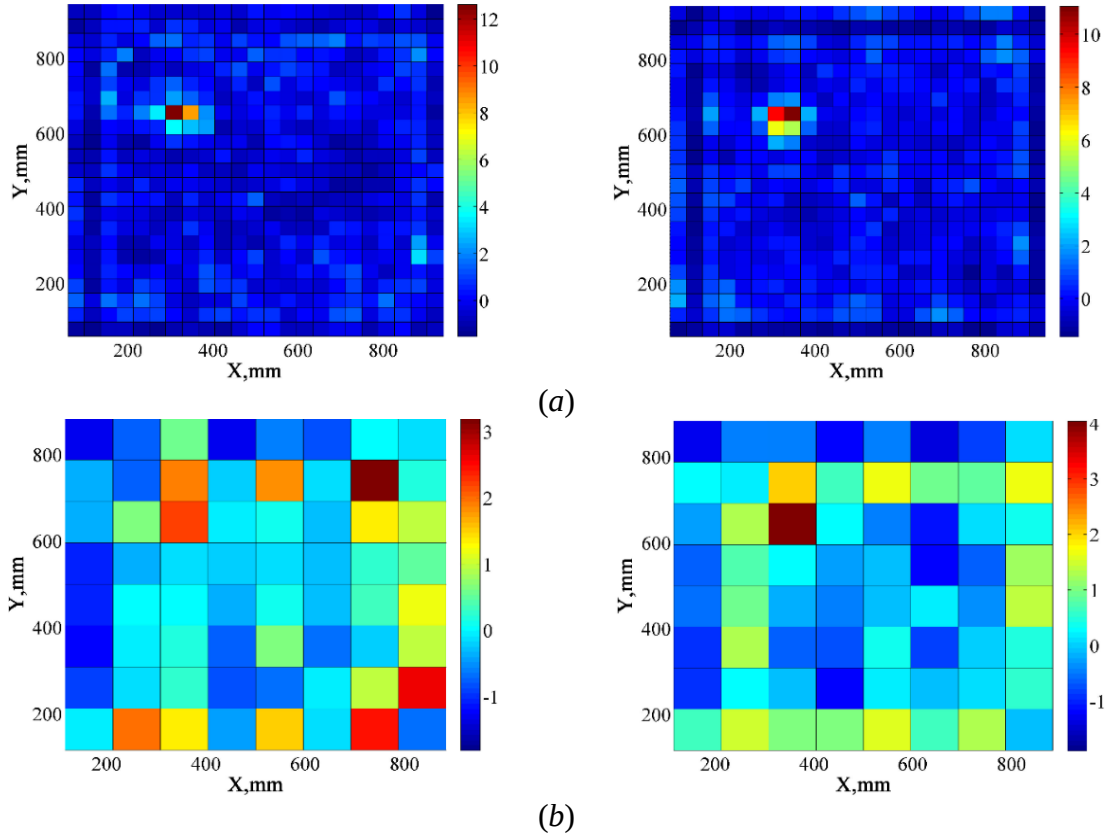


Fig. 4.3. SDI for aluminium plate using various sizes of mode shape data: (a) 26×26 ; (b) 11×11 . Left: experiment, right: FEM.

4.2. Case Study 2: CFRP Beam With an Impact Damage

The CFRP beam from Chapter 3 with mode shapes measured in two dimensions is considered. *Mexican Hat* wavelet at scale 1 with a DER value of 90.07 % is selected for SDI calculations in further steps as the performance of this wavelet is the best. SDI distributions over the whole area of the composite beam are shown in Fig. 4.4 using the *Mexican Hat* wavelet for CWT. Results for MSCS method are also shown.

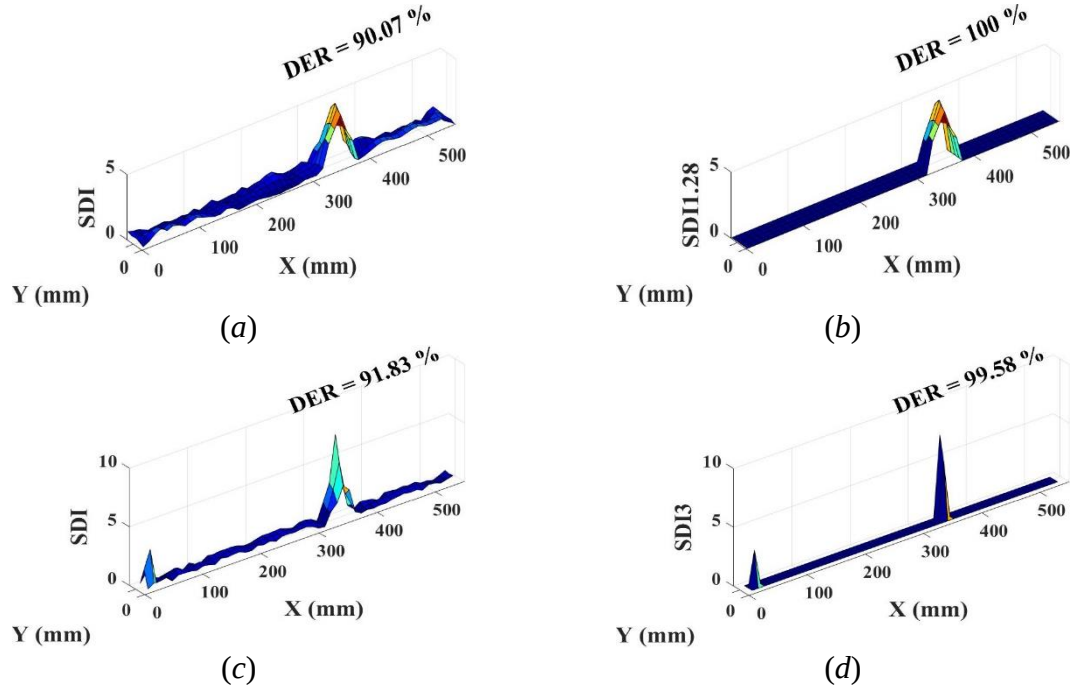


Fig. 4.4. SDI distributions for CFRP beam: (a) no threshold (2D CWT); (b) 90 % confidence (2D CWT); (c) no threshold (2D MSCS); (d) 99 % confidence (2D MSCS).

The location of impact damage is clearly revealed through SDI in an actual zone of impact. The obtained results show that the proposed damage index provides reliable information about the location and size of the damage. The obtained results suggest that the proposed method can be applicable not only for laboratory tests but also for practical structural applications.

5. CONDITION MONITORING WITH DEFECT LOCALIZATION IN A TWO-DIMENSIONAL STRUCTURE BASED ON SUPERVISED MULTICLASS CLASSIFICATION OF STRAIN FEATURES

The chapter presents a method for condition monitoring and localization of defects in mass-produced structural members by utilizing multiclass classification approach. These structural elements could be a wind turbine blade or airplane wing where regular structural inspections are carried out to pinpoint the location of damage. The idea of the method is based on compilation of different damage scenarios in a sort of damage catalogue using finite element modelling. By simulating damage of varying severity and different coordinates, different damage cases from the compiled catalogue can be compared with real structural damage. Comparison of sensor measurement data of real damage and data values from catalogue would reveal the necessary damage information – severity and position. The study in this chapter demonstrates the effectiveness of this algorithm on a cantilevered CFRP plate with a pseudo-defect. The pseudo-defect is added mass that serves the purpose to locally modify structural response of the object as in the case with real damage.

The finite element model of a cantilevered composite plate is created with commercial finite element package *Ansys*TM version 16.2. The material model is a prepreg carbon fibre laminate consisting of 32 layers of lamina with layer thickness of 90 μm , and stacking sequence is $(90/0)_{8S}$. The mass element with a magnitude of mass equal to 0.02 kg (9.43 % of plate's mass) is put on every zone of the plate and a harmonic analysis is conducted to extract the resonant frequencies of the plate. For excitation purposes, a voltage of 10 volts is passed to the plate using piezoelectric transducer MFC. As proved in [14], only two strain sensors with optimal position are enough for an effective strain feature classification. Strain gauge #1 is the farthest from MFC, perpendicular to fibre orientation, while strain gauge #2, in the direction of fibres, is the closest of the two to the MFC element. The model of the plate is shown in Fig. 5.1.

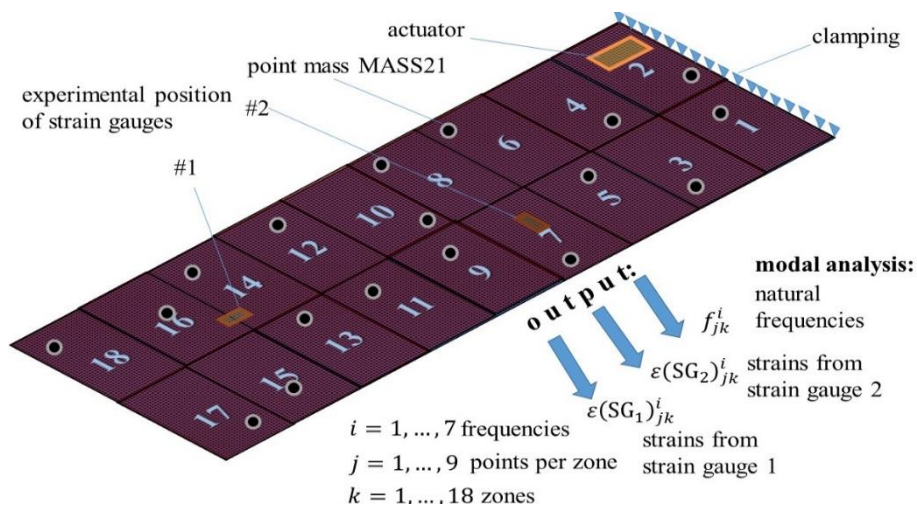


Fig. 5.1. Numerical model of the plate with partition zones, point mass and recording of output features.

Cross-validation errors are computed by considering varying numbers of data points per class (zone) for all extracted resonant frequencies. These results for both algorithms are shown in Fig. 5.2. The overall lowest errors are associated with the first frequency of 21 Hz for both linear discriminant and k -NN. Hence, only the first resonant frequency is used in further calculations due to lower error values.

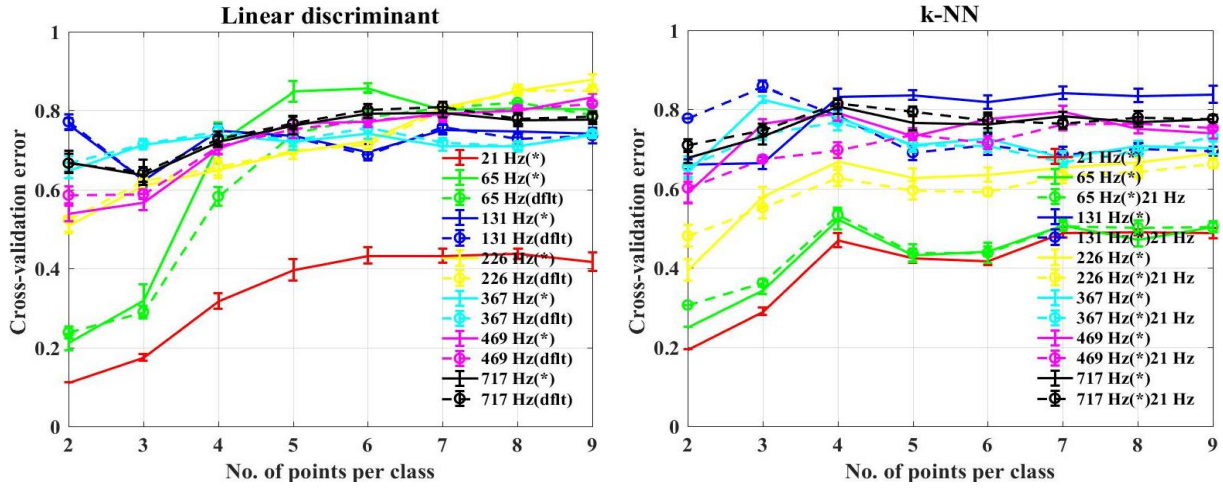


Fig. 5.2. Cross-validation errors for extracted frequencies versus number of points per class.

By conducting a hyperparameter optimization routine, it is found that the optimum set of hyperparameters for the 1st frequency (21 Hz) is $k = 3$, distance equal to *Mahalanobis distance*. Inverse distance weighting is used. Hyperparameter optimization results (dashed lines) are also displayed (marked with an asterisk * in Fig. 5.2, while the default or unoptimized linear discriminant classifier is denoted with “dflt”. The optimization of hyperparameters (γ and δ for linear discriminant and number of nearest neighbours, distance and distance weight for k -NN) have minor effect on cross-validation loss.

A total of five query points are simulated in random locations of the plate. Their coordinates are depicted in Table 5.1.

Table 5.1

Coordinates of the Simulated Query Points and Their Locations in Terms of Plate Zones					
Query point	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
x (m)	0.09	0.064	0.032	0.032	0.088
y (m)	0.346	0.206	0.126	0.026	0.146
Zone	18	between 9, 10, 11 and 12	5	1	8

Distributions of prediction probabilities of the unknown query points for both classifiers are depicted in Fig. 5.3. Only the results for 2 and 9 data points per class are shown.

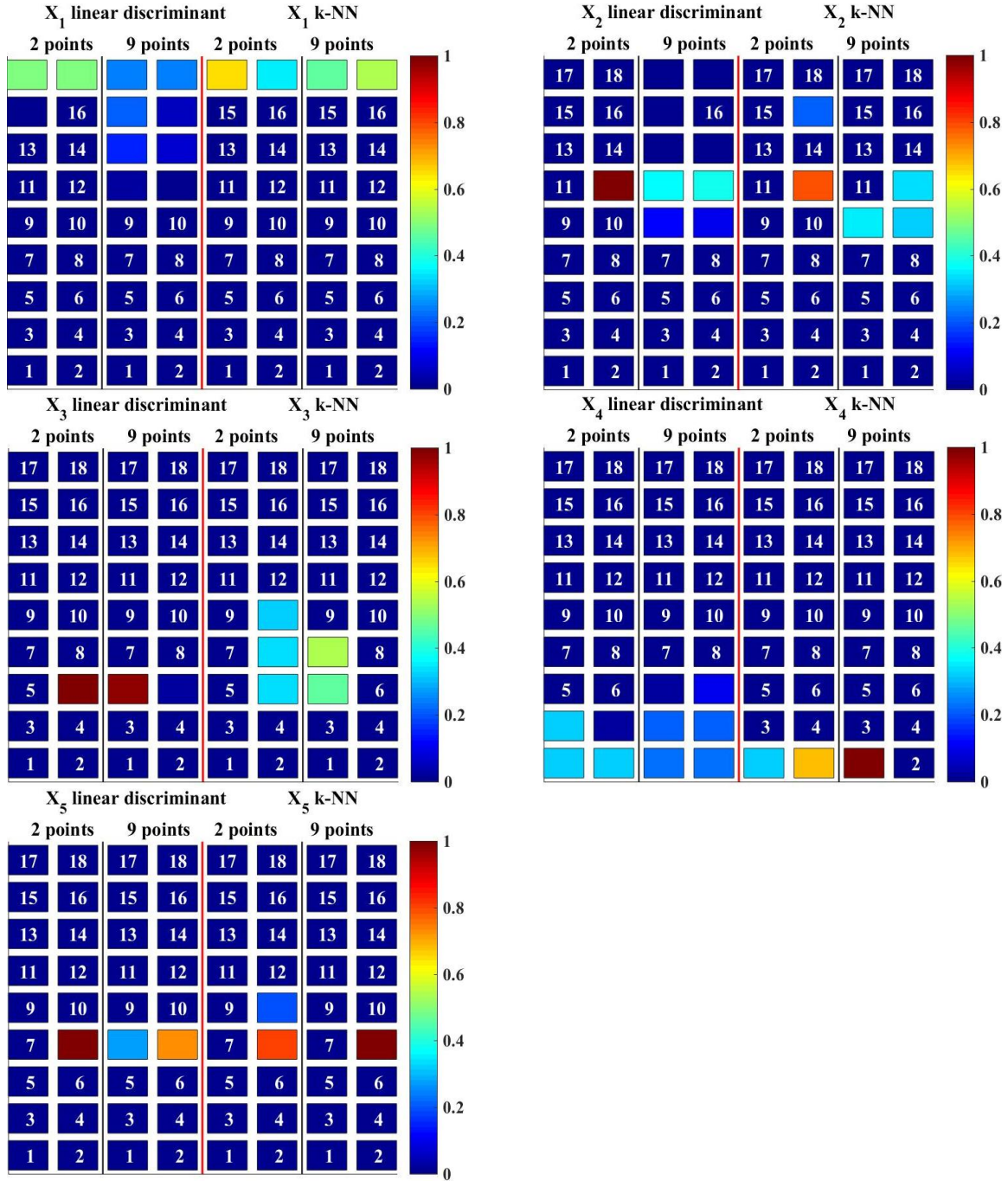


Fig. 5.3. Distributions of prediction probability of 5 query points.

Notable differences for most prediction cases are observed. The first query point X_1 is predicted to lie either in zone 17 or 18 with both classifiers and just 2 points per class. More points per class give inaccurate prediction, except for k -NN. The correct prediction for query point X_2 would be any of zones 9, 10, 11 or 12, as this point lies in the intersection of these zones and there is an equal probability for it to be attributed to any of these zones. Both classifiers assigned a class 12 to this point, which is correct (2 points per zone). Even for 9 points per class the prediction is correct for both algorithms. X_3 lies in zone 5, but is classified to belong to zone 6 (linear discriminant) which is close, considering that the strain values do not vary much in neighbouring zones. k -NN algorithm classifies this point to belong either to

zone 6, 8 or 9, which is larger misclassification. X_4 is correctly classified to lie in zone 1 only with k -NN with 9 points per class. Linear discriminant also gives a correct classification, but again the probabilities are much more spread out over other zones. This effect is less pronounced for 2 points per class, though. X_5 is correctly classified by both algorithms to belong to zone 8. This time, both 2 points and 9 points per class yield the correct prediction.

The proposed method is experimentally validated on a carbon prepreg cantilevered composite plate (Fig. 5.4 (a)). Positions of sensors and actuator correspond to the ones in the numerical model. The event of application of actual mass (the same as in numerical study) on one of the zones is shown in Fig. 5.4 (b).



Fig. 5.4. Cantilevered CFRP plate: (a) photo; (b) partition into zones and application of mass.

The dynamic strain measurement system consists of a waveform generator (*Agilent 3322A* 20 MHz Function/Arbitrary Waveform Generator), which is connected to the MFC actuator for harmonic excitation of the plate, signal amplifier (*LE 150/025 Piezomechanik GmbH* signal amplifier (230 V AC, serial number: 10902/936)), strain measurement acquisition box (*Spider 8* 600 Hz / DC HBM with USB adapter *USBHBM2903*), which is connected to both strain gauges using two channels and the waveform generator. *Spider 8* system is connected to personal computer through a USB port. The recorded strain signals are visualized in *Catman* software. A total of 3 measurements are recorded for each zone of the plate.

The experimental modal analysis is carried out by exciting the plate with a piezoelectric MFC (macro-fiber composite) element (model *M2807-P1 smart material*) glued on the surface of the plate. The measured spectrum of vibration velocity averaged over all scanning grid of the plate reveals a total of 8 peaks in the bandwidth of 800 Hz. Considering numerical results, only the first peak is selected.

The distributions of prediction probability across the zones of the plate calculated for 5 points of added mass (in the same locations as in numerical study) are depicted in Fig. 5.5. Point X_1 is consistently classified to lie in zone 17. In general, the performance of linear discriminant is better than the one of k -NN as higher probabilities of prediction are associated with the correct zone. No convincing results are obtained by localizing X_2 . X_3 lies in the intersection between zones 6 and 8. The correct classification with linear discriminant is obtained showing zone 6. k -NN classifier also performs satisfactory. Point X_4 is slightly misclassified and X_5 is classified correctly to belong to zone 7.

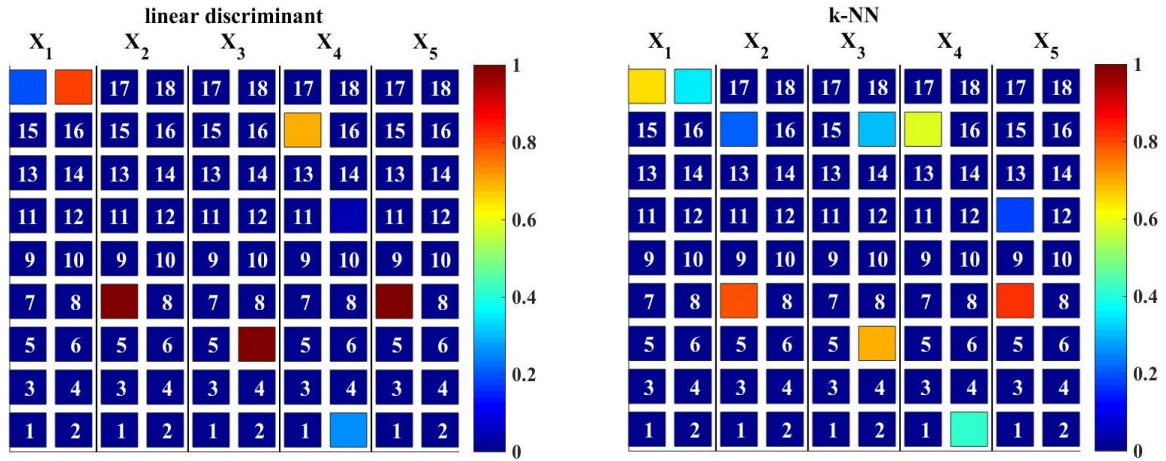


Fig. 5.5. Prediction probability for an experimental study with 2 points per class.

The experimental validation demonstrates that both classifiers are capable of capturing the zone of damage in the easiest cases when the mass lies in only one zone. By using this approach, no baseline data is necessary for successful localization of defect. Also, the defect does not necessary have to be near sensor to be localized as is the case with other methods. However, the limitation, as shown by results, is when mass is lying in the intersection between several zones. Also, close lying pseudo-defects are likely to not be successfully distinguished as they will possess similar strain response.

6. A NOVEL SEPARATION TECHNIQUE AND PEAK FREQUENCY SHIFT OF FLEXURAL LOADING-INDUCED ACOUSTIC EMISSION SOURCES IN RAILWAY PRE-STRESSED CONCRETE SLEEPERS

In this chapter, acoustic emission (AE) monitoring is employed for cracking characterization in railway pre-stressed concrete sleepers subjected to flexural loading, delivering an engineering assessment for future applications especially at railway switches and crossings. The objectives of the study are to, firstly, identify flexural cracking damage in sleepers using AE sensing. Secondly, the uncorrelated acoustic emission features can be used to construct a classifier to separate AE sources in the sleepers and to examine the feasibility to use reduced set of AE parameters. This study also proposes to filter non-significant peak frequencies of emissions due to noise. This novel procedure allows for compression of the acquired acoustic emission data considerably leaving only the signatures due to cracking and failure.

Four full-scale pre-stressed railway concrete sleepers supplied by *CEMEX* are shown in Fig. 6.1. The length of sleepers is 2500 mm, height at mid-span is 175 mm, height at rail seat is 200 mm and width is 200 mm. A single sleeper has a mass of $309 \text{ kg} \pm 3 \text{ kg}$ for loose fastening components. A total of 6 pre-stressed steel tendons are embedded in each sleeper.



Fig. 6.1. Railway pre-stressed concrete sleepers supplied by *CEMEX*.

The technical standard for testing of sleepers and bearers is specified by European Standard BS EN 13230 [15]. It provides material specifications, support conditions, loading procedures and some other specific requirements for bending tests. For this study, a static load is applied at the mid-span of the sleepers for both positive and negative bending. In practice, 3-point bending usually assesses cracking problems associated with railway sleepers. Figure 6.2 illustrates the location of AE sensors. Deflection was recorded using a linear variable differential transformer (LVDT) under the sleeper soffit (bottom) at mid-span.

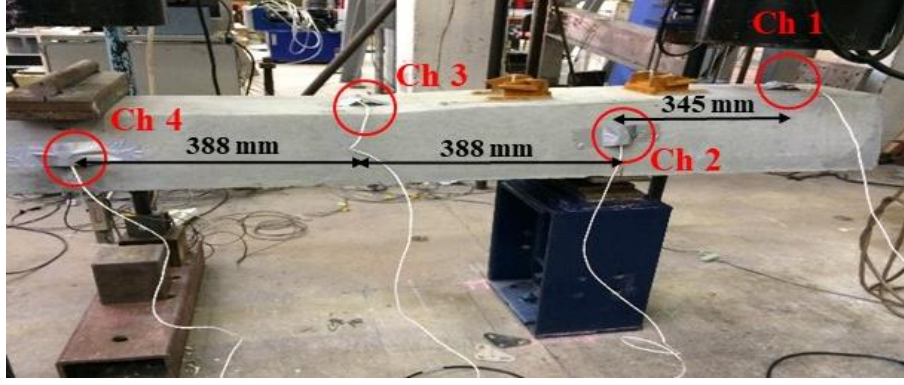


Fig. 6.2. Static loading layout for railway concrete sleepers with location of AE sensors (positive bending configuration).

The AE signals were detected and recorded using a 4-channel DAQ AE system procured from *Physical Acoustics Corporation* (PAC, now *Mistras*). The data acquisition was performed using “AE-Win” software. The AE signals were detected using wideband PAC-WD piezoelectric acoustic emission transducers operating at frequency range of 20 kHz to 1000 kHz. Each sensor is connected to PAC 2/4/6 preamplifier. The amplification level of the pre-amplifiers (acoustic emission signal capturing threshold) was set to 50 dB prior to testing. The AE sensors were coupled on the samples using Vaseline petroleum jelly and held in place with duct tape.

The sampling rate for recording AE signals was set to 1 MSample/s, peak definition time (PDT), hit definition time (HDT) and hit lockout time (HLT) were set to 600 μ s, 600 μ s and 1000 μ s, respectively. The pre-trigger time was set to 256 μ s.

The flowchart of acoustic emission source separation methodology is shown in Fig. 6.3. Two out of four sleepers are statically loaded in negative bending configuration, while other two – in positive. In these tests, two sleepers are loaded until failure. The other two sleepers (Nos. 2 and 4) are first loaded until the first crack. Then the load is further increased until it reaches 1.5 times the load corresponding to the first crack. Eight acoustic emission features are selected from the whole set of registered features: Rise (R), Counts (C), Energy (E), Duration (D), Counts/Duration (C/D) or average frequency, Amplitude (A), Rise/Peak amplitude or RA value and Signal strength (SS).

Referring to [16], the correlation analysis was conducted to study the linear relationship between these signatures. The features that showed the most correlation were discarded from further calculations to avoid the multi-collinearity between AE features. One feature is further removed in every consecutive case study with a total of 7 case studies. At least two features have to be included so that it is possible to assess their mutual relationship. The features from each case are input in a decision trees classifier, since it is the only classifier with a reasonable computation time with about 98 609 samples to process. The K-fold cross-validation scheme is adopted in order to improve the performance of the classifier and avoid overfitting. Following the standard approach, 10 folds are used. Hyperparameters of decision trees are optimized over a course of 10 runs because of the 10-fold data partition. The average values of hyperparameters are calculated and a final decision trees model is built for every case.

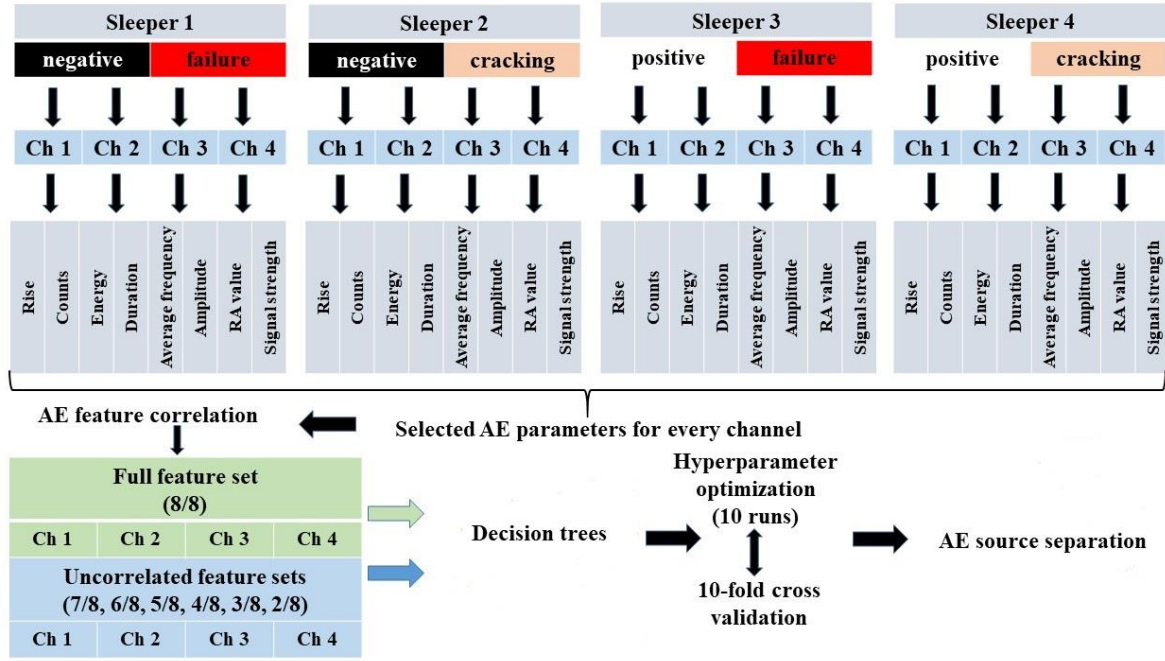


Fig. 6.3. Flowchart of acoustic emission source classification procedure.

Classification performance of a classifier is evaluated by considering resubstitution loss and cross-validation loss. In the case of decision trees, resubstitution loss is influenced by number of maximum node splits, while cross-validation loss is affected by number of data partitioning folds.

Only the results with a significant mutual correlation of AE features (above 60 %) are shown. The organization of feature selection is shown in Table 6.1.

Table 6.1

Feature Selection Strategy for AE Source Classification

Case No.	Number of features	Features to exclude
1	8/8	None
2	7/8	C
3	6/8	C, D
4	5/8	C, D, SS
5	4/8	C, D, SS, E
6	3/8	C, D, SS, E, A
7	2/8	C, D, SS, E, A, RA

The largest average classification accuracy is obtained by removing 2 features and attaining 6 as shown in Fig. 6.4 (a).

The slight decrease in classification performance is compensated by a compression of data to be processed. By decreasing the number of AE features by one in each increment, the data size decreases linearly as shown in Fig. 6.4 (b). It is found that the average slope of data reduction is roughly 1.9 MB per AE feature, which has been removed from the classification model. By considering only a bare minimum (two) of AE features, the average classification accuracy decreases only by about 10 %, while the size of the data to be analysed decreases by

about 70 %. This insight can form a strategy for placing AE sensors at the switches and crossings where it is difficult to locate the damage.

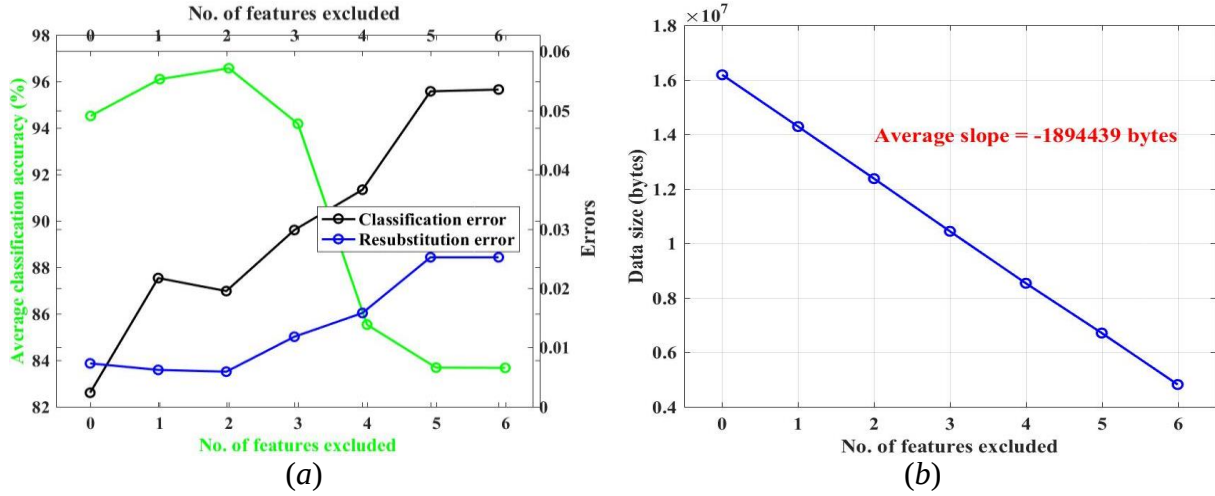


Fig. 6.4. The influence of number of features on: (a) average classification accuracy and errors; (b) the size of analysed AE data.

The generation of acoustic emission events due to breakage of bonds between particles of material occurs at specific frequency regions or bands. At increased loading, defects (cracks in concrete) propagate, increasing the range of emitted frequencies (frequency shifting). The magnitude of shift is dependent on damage severity and size. Acoustic emissions with a wide array of different peak frequency values are recorded during the loading process. Some of these frequencies are characteristic of noise. However, the events of formation of damage usually emit waves characterized by a relatively massive amount of emission counts. Peak frequency of an acoustic emission waveform is chosen as a damage-sensitive parameter as it is a reliable indicator of different acoustic emission sources [17], including corrosion of concrete reinforcement and load-induced cracking.

A typical failed specimen is shown in Fig. 6.5 (a). The failure mode is mixed (flexural + shear). Load-deflection plot in Fig. 6.5 (b) shows that the elastic zone extends to approximately 60 kN at which point the first crack occurs. The highest energy signal of 31 600 attojoules takes place at the ultimate load of the specimen, 102 kN. At the moment of failure, a deflection of 17 mm is registered at the mid-span. Beyond this point, the steel tendons assume the tensile load, allowing further deformation to take place, hence AE activity continues.

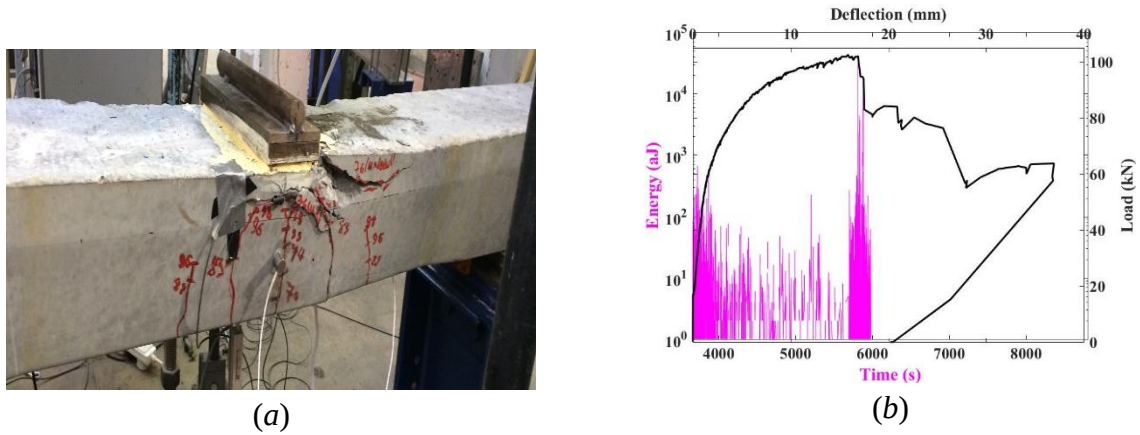


Fig. 6.5. Failure pattern for sleeper No. 1 (a); acoustic energy for all channels superimposed with load vs deflection (b).

The evolution of peak frequencies corresponding with loading is shown in Fig. 6.6. The most intense emissions correspond to the event of failure and even after that. Emission events are clearly dominated by the ones coming from mid-span (Channel No. 4) with a range of peak frequencies from 150 kHz to about 600 kHz. Three distinctive bands of peak frequencies are registered – [150–300] kHz, [385–460] kHz and [498–496] kHz. Emissions from Channels No. 1 and No. 2 occur at the lowest frequency band [150–300] kHz.

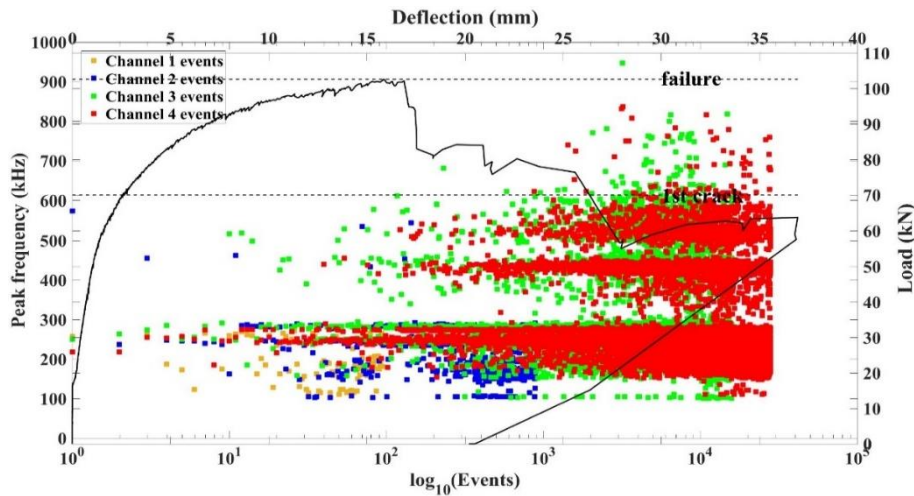


Fig. 6.6. Peak frequency evolution for sleeper No. 1.

The failure pattern of sleeper No. 3 is shown in Fig. 6.7 (a). The failure mode is pure shear with pre-stressing tendons clearly exposed near the mid-span. Load/deflection curve is shown in Fig. 6.7 (b). The initial cracking occurs at 53 kN while the failure of the sleeper is registered at a load of 113 kN. The ultimate load for positive bending is over 11 % higher than for negative bending, this is unsurprising since sleepers are designed to have higher strength in this orientation. The AE energy data shows reasonably strong correlation with the load-deflection curve so that the first crack and ultimate load events can be distinguished. In comparison to the negative bending test, the values of energy are relatively low at ultimate

load. It is possible, that the aggressive brittle failure that took place prevented the sensors from recording high energy data.

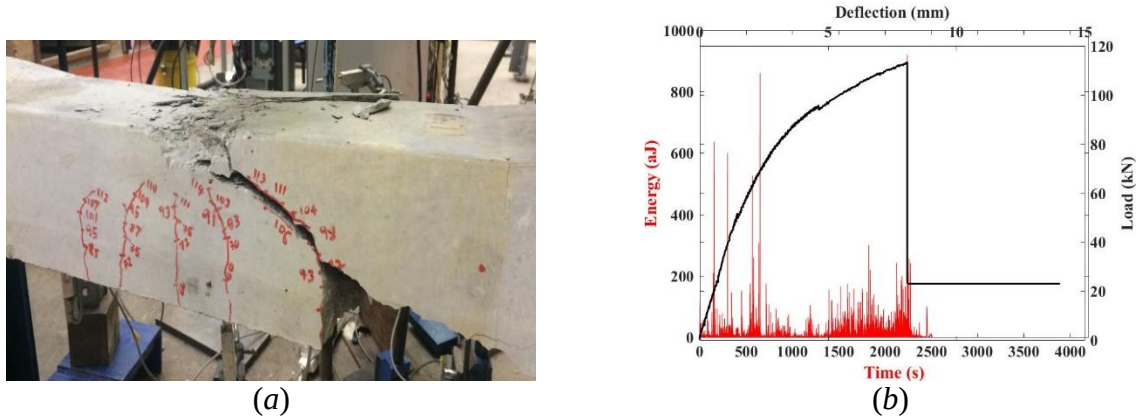


Fig. 6.7. Failure pattern for sleeper No. 3 (a); acoustic energy for all channels superimposed with load vs deflection (b).

Three bands of peak frequency values are clearly seen in Fig. 6.8. The widest band is [150–300] kHz, the second band is [350–450] kHz and the third band is [500–600] kHz. Acoustic emission events are clearly dominated by Channel No. 4 characterized by the highest density of cracks. As with sleepers Nos. 1 and 2, acoustic emissions from Channels Nos. 1 and 2 mostly occur at the lowest frequency band of [150–300] kHz. Significant emission bursts correspond to the stage of failure. Emissions from other channels are much less pronounced.

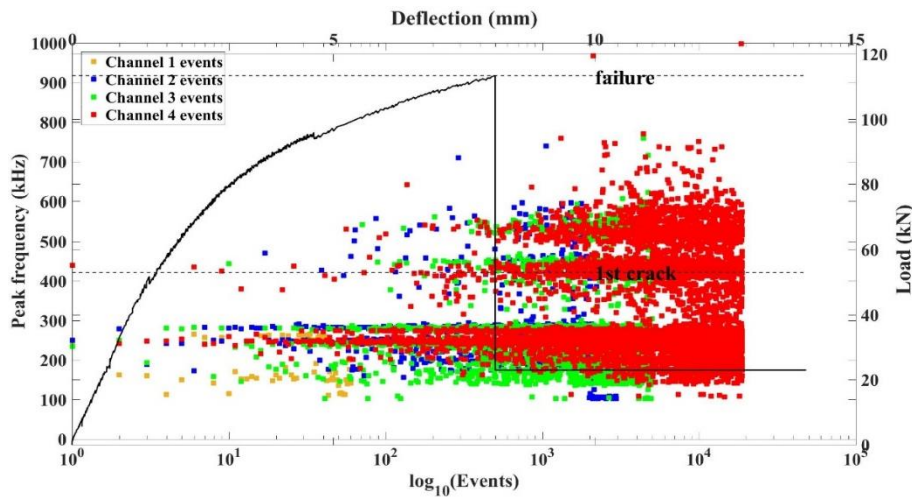


Fig. 6.8. Peak frequency evolution for sleeper No. 3.

As seen in Fig. 6.9 (a), the first crack load is at 60 kN. AE does not correlate perfectly with the load-deflection curve, but the energy hit that caused the first crack can clearly be noticeable. Beyond the first crack, AE energy stays low with the exception of a hit at 79 kN. This magnitude of load is approaching a severe condition; therefore, damage events will produce greater energy. The loading is proceeded until the load of approximately 83 kN.

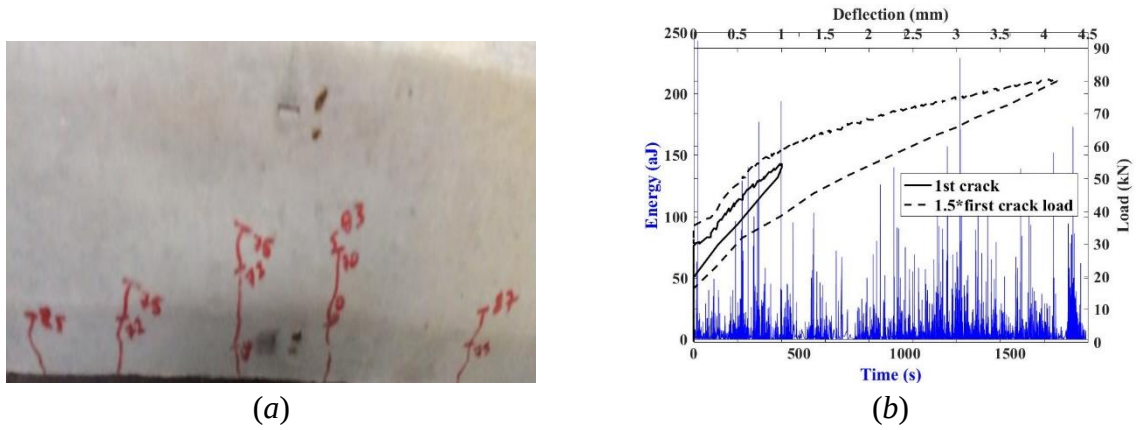


Fig. 6.9. Cracking pattern at load of 1.5 times the first crack load for sleeper No. 4 (a); acoustic energy for all channels superimposed with load vs deflection (b).

The load-deflection curves along with peak frequency evolution during loading are shown in Fig. 6.10. Surprisingly, the increase of peak frequency values of Channel No. 2 is the most pronounced with increasing load with the ladder-like signature and comparatively few emission events. Relatively lower peak frequencies are emitted in the vicinity of Channel No. 4 – the band is [100–300] kHz and there are relatively few events in this channel, although the emissions have lasted throughout the whole test. The dominating proportion of events are emitted near Channel No. 3 where a range of frequencies is wide with 3 distinct bands [150–300] kHz, [300–460] kHz and [500–700+] kHz. Very few emissions from Channel No. 1 are registered and mostly attributed to the lowest frequency band [150–300] kHz.

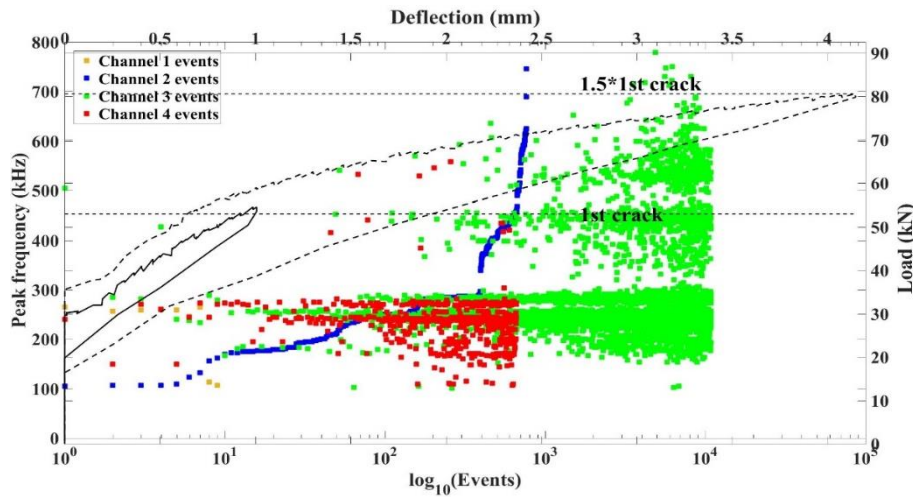


Fig. 6.10. Peak frequency evolution for sleeper No. 4.

The intensity of acoustic emissions had increased in the direction towards the mid-span of the sleepers. The only exception is sleeper No. 4.

For all of the channels, the proportion of significant peak frequencies constitute only 14 % to 34 % of the initial data with 53 % to 98 % count information retained. This insight is critical for modified universal thresholds that are suitable for local placement of sensors.

CONCLUSIONS

This Thesis deals with the development of structural damage localization algorithms comprising two parts. The first part describes algorithms based on mode shape transformation methods, namely continuous wavelet transform (CWT), mode shape curvature square (MSCS), and another method developed in the framework of this Thesis. This method is based on a normalized wavelet scalogram involving computation of variance with respect to scale parameter and summing the results for all wavelet functions considered in this work. Hence, the selection of two appropriate parameters (scale and wavelet function) is avoided in this method. These methods are designed for structural elements, such as beams and plates. Mode shapes of the damaged structures (aluminium beams and plate with mill cut damage and CFRP beam with an impact damage) are experimentally measured with non-contact scanning laser vibrometer and numerically simulated using commercial finite element program *Ansys*TM. These mode shapes are post-processed in *Matlab*TM environment with the aforementioned methods to reveal the location of damage. Also, a parametric study is conducted involving different noise levels ranging from 0 % to 4 % and sensor densities where original mode shape signal is divided by integer values from 1 to 6. The following conclusions can be drawn.

- All three methods are capable of localizing single and multiple mill-cut damage in aluminium beams and plate, as well as impact damage in CFRP beam with varying estimate reliability. Moreover, mode shape information is sufficient on damaged structures only – no baseline data of healthy structures is needed.
- The CWT is a promising method for structural damage detection and localization based on mode shape information. However, this is not a straightforward procedure as it involves a selection of the appropriate wavelet function and scale parameter. Also, there is an issue of sensitivity to damage size as this Thesis deals with a relatively appreciable reduction of stiffness due to damage, although a more rigorous treatment of this problem was not within a scope of this Thesis.
- The MSCS method is an effective damage localization tool and simpler than the CWT involving fewer adjustable parameters. This Thesis offers an approach to obtain mode shapes of healthy structures using exclusively mode shapes with structural damage. The mode shapes with damage information are subjected to the polynomial smoothing technique for plate structures and smoothing based on harmonic Fourier approximation functions for beam structures. Compared to CWT, MSCS offers better overall performance, although it is more susceptible to noise.
- The performance of the methods is enhanced through the application of statistical hypothesis testing. Non-significant damage indices are filtered out, thus highlighting the locations of the most significant damage index peaks, which lie in the zone of damage.
- The performance of the methods is assessed through the parameter called damage estimate reliability (DER) expressed in percent. As expected, this performance deteriorates with decreasing sensor density. However, the best performance is not

achieved at the original mode shape signal length – in most cases fewer data points yield better performance and this case is more robust to noise.

- According to the results of simulations on varying depths of damage for aluminium beam with one damage site, the proposed methods are a reliable tool for damage localization even in the case of relatively shallow damage, except for TVNWS, which shows instability of performance with increasing damage depth and varying sensor density.
- A notable limitation to the proposed algorithms is the issue of edge effect – significant damage index values at edges of structures where, in fact, damage is not introduced with reason lying in the discontinuity of mode shapes at the edges of the structures. The possible remedy to this problem is application of padding methods that artificially extend the mode shape signal. For example, zero padding where zeros are added at the ends of mode shape signal. This issue, however was not addressed in the Thesis.

The second part of the Thesis explores the plausibility of acoustic emission source separation in full-scale pre-stressed railway concrete sleepers involving acoustic emission interrogation technique coupled with a classification framework. Static three-point bending tests of the concrete sleepers were carried out and acoustic emission signals were recorded with four sensors. The classic load-deflection curves are overlaid with acoustic emission signature to correlate the events of cracking. The classification scheme involving decision trees with optimized hyperparameters is adopted to separate the largest concentrations of acoustic emission sources and characterize peak frequency shifting from the largest to smallest concentrations of cracking. Within the scope of existing research into this field, this study realises the potential of self-monitoring systems, providing a positive case for their implementation on track structures, such as pre-stressed concrete sleepers and bearers in remote locations such as switches and crossings, railway bridges, and transition zones. It will revolutionise the SHM system of railway networks. New method for condition monitoring of two-dimensional mass-produced structural parts with defect localization is developed exploiting supervised machine learning schemes. The method is validated on a cantilevered CFRP plate.

The following conclusions are made.

- The acoustic emission sensing technology is effective in the detection of initial crack events. The energy jump induced by these cracks correlate well with other variable parameters.
- The data obtained through AE confirms the behaviour of concrete sleepers under flexural load. The deflection curve provides a simple method of real-time damage detection, because vertical displacement recordings can identify changes in structural integrity. Acoustic emission events greatly increase in the moment of fracture. The most prominent cracking occurs at the mid-span, which is verified by the largest proportion of released acoustic energy compared to other emission sources located farther.
- The acoustic emission sources have been separated to highlight their uniqueness with respect to one another. This unique and novel procedure is useful to assess the

contribution of emission intensity from each source and to eventually detect the most critical ones. The source separation is based on a new classification method employing the novel decision trees classifier with optimized hyperparameters.

- It is shown that reduction of number of acoustic emission features from eight to two has a minor impact on acoustic emission source classification accuracy – the drop is only about 10 %, while the size of the data to be processed decreases by 70 %.
- In the cases for all four concrete sleepers, the recorded evolution of peak frequencies with increased loading suggests that most of the peak frequency values cluster around three bands with the following average values over all sleepers: [150–300] kHz, [300–460] kHz and [500–800] kHz.
- A modified universal threshold technique is established for filtering the peak frequencies due to noise. The filtering results suggest that it is possible to retain 14 % to 34 % of initially recorded peak frequencies, while retaining count information to the extent of 53 % to 98 % of the initial number of counts.
- Contrary to the most cases, the classification performance to localize the added mass on a CFRP plate is better considering just two points per class.
- Although both classifiers could not reliably manage the more difficult defect localization cases in the experimental validation phase, the developed method still holds promise in the field of condition monitoring of structural elements.
- By exploring the classifier performance based on strain responses obtained at different resonant frequencies, the fundamental frequency in bending yields the lowest classification losses.

APPROBATION OF THE THESIS

Book chapter

1. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. A. Sumbatyan, A. Chate. Localization of Impact Damage in Thin-Walled Composite Structure Using Variance-Based Continuous Wavelet Transform In book: *Non-destructive Testing and Repair of Pipelines*, Chapter 2.5 (Editors – Evgeny N. Barkanov, Andrei Dumitrescu, Ivan A. Parinov), 2017, pp. 73–89, Springer, DOI: 10.1007/978-3-319-56579-8_6. **WEB OF SCIENCE**

Journal papers

1. **R. Janeliukstis**, A. Clark, M. Papaelias, S. Kaewunruen. Flexural cracking-induced acoustic emission peak frequency shift in railway prestressed concrete sleepers. *Engineering Structures*, 178, 2019, pp. 493–505. **SCOPUS**
2. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Classification Model for Damage Localization in a Plate Structure. *Mechanics of Composite Materials*, 53(6), 2018, pp. 725–736. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
3. R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, S. Kaewunruen. Fatigue Life Assessment Method for Prestressed Concrete Sleepers. *Frontiers in Built Environment* 3:68, 2017, pp. 1–13.
4. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Experimental structural damage localization in beam structure using spatial continuous wavelet transform and mode shape curvature methods. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 102, 2017, pp. 253–270. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
5. S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, P. Akishin, A. Chate. Mode shape-based damage detection in plate structure without baseline data. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(9), 2016, pp. 1180–1193. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
6. **R. Janeliukstis**, S. Kaewunruen, M. Papaelias. A novel separation technique of flexural loading-induced acoustic emission sources in railway prestressed concrete sleepers. *IEEE Access*. **SCOPUS**.
7. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, S. Kaewunruen. Mode shape curvature squares method for crack detection in railway prestressed concrete sleepers. *Engineering Failure Analysis*. **Submitted**.
8. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Condition monitoring enhanced with pseudo-defect localization in a two-dimensional structural element based on supervised multiclass classification of strain features. *Nondestructive Testing and Evaluation*. **Submitted**.

Conference papers and theses

1. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Chate. Classification-based Damage Localization in Composite Plate using Strain Field Data, *Journal of Physics: Conference Series*, 1106, 012022, 2018. **SCOPUS**

2. S. Kaewunruen, **R. Janeliukstis**, A. Freimanis, K. Goto. Normalized curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers, *Journal of Physics: Conference Series*, 1106, 012002, 2018. **SCOPUS**
3. P. Skels, **R. Janeliukstis**, V. Haritonovs. Review on structural health interrogation using fiber bragg grating sensors, *Engineering for Rural Development*, 2018. **SCOPUS**
4. S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, R. You. Dynamic amplification factors for railway turnout bearers in switches and crossings, *COMPDYN 2017 – Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017. **SCOPUS**
5. S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, **R. Janeliukstis**, R. You. Influences of surface abrasions on dynamic behaviours of railway concrete sleepers, 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, 2017. **SCOPUS**
6. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Multiple Damage Identification in Beam Structure Based on Wavelet Transform, *Procedia Engineering*, 172, pp. 426–432, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
7. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Damage identification in beam structure based on thresholded variance of normalized wavelet scalogram, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251, 012089, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
8. A. Clark, S. Kaewunruen, **R. Janeliukstis**, M. Papaelias. Damage Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers using Acoustic Emission, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251, 012068, 2017. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
9. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, A. Kovalovs, A. Chate. Numerical Investigation on Multiclass Probabilistic Classification of Damage Location in a Plate Structure. *International Conference on Structural Engineering Dynamics ICEDyn 2017: Technical Programme & Book of Abstracts*, Portugal, Ericeira, July 3–5, 2017, pp. 57–58.
10. **R. Janeliukstis**, A. Clark, S. Rucevskis, S. Kaewunruen. Vibration-Based Damage Identification in Railway Concrete Sleepers. *Proceedings of SMAR 2017 Conference*, Switzerland, Zurich, September 13–15, 2017, pp. 193–201.
11. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, P. Akishin, A. Chate. Wavelet Transform Based Damage Detection in a Plate Structure, *Procedia Engineering*, 161, pp. 127–132, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
12. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage Identification in Polymer Composite Beams Based on Spatial Continuous Wavelet Transform, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 111, 012005, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
13. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate. Damage Identification Dependence on Number of Vibration Modes Using Mode Shape Curvature Squares, *Journal of Physics: Conference Series*, 744, 012054, 2016. **SCOPUS**

14. S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, P. Akishin, A. Chate. Vibration-based approach for structural damage detection, ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics, 2016. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
15. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage identification in beam structure using spatial continuous wavelet transform. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96, 012058, 2015. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
16. M. Wesolowski, S. Rucevskis, **R. Janeliukstis**, M. Polanski. Damping properties of sandwich truss core structures by strain energy method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96, 012022, 2015. **SCOPUS, WEB OF SCIENCE**
17. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Chate, A. Kovalovs. Damage Identification in Beam Structure Using Mode Shape Data: from Spatial Continuous Wavelet Transform to Mode Shape Curvature Methods. *Proceedings of ICoEV 2015: International Conference on Engineering Vibration*, Slovenia, Ljubljana, September 7–10, 2015, pp. 1–10.
18. **R. Janeliukstis**, S. Rucevskis, M. Wesolowski, A. Kovalovs, A. Chate. Damage Identification in Polymer Composite Beams based on Spatial Continuous Wavelet Transform and Mode Shape Curvature Squares. *Baltic Polymer Symposium 2015: Programme and Proceedings*, Latvia, Sigulda, September 16–18, 2015, pp. 105–105.

LITERATŪRA/REFERENCES

- [1] Cai J., Qiu L., Yuan S., Shi L., Liu P., Liang D. Structural Health Monitoring for Composite Materials. Chapter 3 in *Composites and Their Applications*. InTech Publishing, 2012.
- [2] Kessler S. S., Spearing S. M., Soutis C. Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. *Smart Mater. Struct.* 2002;11: 269–278.
- [3] Yan Y. J., Yam L. H. Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis. *Compos. Struct.* 2002; 58(1): 29–38.
- [4] Ginzburg D., Pinto F., Iervolino O., Meo M. Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact. *Compos. Struct.* 2017; 161: 187–203.
- [5] Rezaie F., Farnam S. M. Fracture mechanics analysis of pre-stressed concrete sleepers via investigating crack initiation length. *Eng. Fail. Anal.* 2015; 58: 267–280.
- [6] Kaewunruen S. *Experimental and numerical studies for evaluating dynamic behaviour of prestressed concrete sleepers subject to severe impact loading*. PhD thesis. 2007. Available at: <http://ro.uow.edu.au/theses/27> (accessed 12.03.2017.).
- [7] Wu D., Law S. S. Damage Localization in Plate Structures from Uniform Load Surface Curvature. *J. Sound Vib.* 2004; 276 (1-2): 227–244.
- [8] Fan W., Qiao P. A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures. *Int. J. Solids Struct.* 2009; 46 (25–26): 4379–4395.
- [9] Khiem N. T., Tran H. T. A procedure for multiple crack identification in beam-like structures from natural vibration mode. *J. Vib. Control* 2014; 20 (9): 417–442.
- [10] Kim J. T., Ryu Y. S., Cho H. M., Stubbs N. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Eng. Struct.* 2003; 25 (1): 57–67.
- [11] Bayissa W. L., Haritos N., Thelandersson S. Vibration-based structural damage identification using wavelet transform. *Mech. Syst. Signal Pr.* 2008; 22 (5): 1194–1215.
- [12] Goswami S., Bhattacharya P. 2015 Real-Time Damage Detection in Laminated Composite Beams Using Dynamic Strain Response and Modular Neural Arrays for Aerospace Applications. *IRJET*. 2015; 2 (3): 2060–2069.
- [13] Reda Taha M. M., Noureldin A., Lucero J. L., Baca T. J. Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features. *Struct. Health Monitor.* 2006; 5(3): 267–95.
- [14] Janeliukstis R., Rucevskis S., Chate A. Classification Model for Damage Localization in a Plate Structure. *Mech. Compos. Mater.* 2018; 53 (6):725–736.
- [15] British Standards Institute (BSI), BS EN 13230:2016 Railway applications. Track. Concrete sleepers and bearers. London, UK. 2016.

- [16] Kim K. B., Kang H. Y., Yoon D. J., Choi M. Y. Pattern Classification of Acoustic Emission Signals During Wood Drying by Principal Component Analysis and Artificial Neural Network. *Key Eng. Mat.* 2005; 297–300: 1962–1967.
- [17] Yoon D. J., Weiss W. J., Shah S. P. Assessing damage in corroded reinforced concrete using acoustic emission. *J. Eng. Mech.* 2000; 126 (3): 273–283.