

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE



UNIVERSITATEA TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII

Ing. Dragoș Florin Lișman

TEZĂ DE DOCTORAT

**DETERMINĂRI NEDISTRUCTIVE LA
STRUCTURI PORTANTE PE CABLURI**

**Conducător științific,
Prof.dr.ing. Ludovic Gheorghe Kopenetz**

2014

Cuprins

Lista Figurilor.....	iv
Lista Tabelelor.....	vii
Abrevieri.....	viii
1 Introducere	9
1.1 Motivația cercetării întreprinse.....	9
1.2 Obiectivele tezei	11
1.3 Definiția conceptelor de monitorizare structurală	11
1.3.1 Monitorizarea distructivă versus monitorizarea nedistructivă	13
1.4 Clasificarea structurilor cu cabluri	16
1.4.1 Structura internă a cablului	18
1.5 Istoricul apariției cablurilor metalice și dezvoltarea acestora	19
1.6 Clasificarea cablurilor metalice	22
1.7 Degradările cablurilor.....	26
1.7.1 Deteriorări locale	26
1.7.2 Cedare totală.....	30
1.8 Surse generatoare ale deteriorărilor și degradărilor cablurilor	31
1.9 Monitorizarea nedistructivă a cablurilor	35
1.10 Conținutul tezei	37
2 Studiul actual al metodelor de testare nedistructivă a cablurilor	40
2.1 Monitorizarea vizuală a cablurilor.....	40
2.1.1 Istoric și principii de bază	40
2.1.2 Tehnici și echipamente	45
2.1.3 Evaluarea rezultatelor.....	45
2.2 Monitorizarea magnetică a cablurilor.....	46
2.2.1 Istoric și principii de bază	46
2.2.2 Tehnici și echipamente	48
2.2.3 Evaluarea rezultatelor.....	52
2.3 Monitorizarea bazată pe ultrasunete	54
2.3.1 Istoric și principii de bază	54
2.3.2 Tehnici și echipamente	57
2.3.3 Evaluarea rezultatelor.....	58
2.4 Monitorizarea bazată pe emisii acustice	59
2.4.1 Istoric și principii de bază	60

2.4.2	Tehnici și echipamente	62
2.4.3	Evaluarea rezultatelor	64
2.5	Monitorizare termală prin infraroșu	65
2.5.1	Istoric și principii de bază	65
2.5.2	Tehnici și echipamente	66
2.5.3	Evaluarea rezultatelor	68
3	Modelul sistemului integrat de monitorizare nedistructivă a structurilor pe cabluri 70	
3.1	Evaluarea cerințelor sistemului supus monitorizării și definirea obiectivelor monitorizării 70	
3.1.1	Beneficiile monitorizării	71
3.1.2	Stabilirea degradărilor și a scenariilor de degradare	71
3.1.3	Condițiile operaționale și de mediu	73
3.1.4	Limitările achiziției de date în situ	73
3.2	Arhitectura sistemului de monitorizare nedistructivă	74
3.3	Componentele de achiziție a datelor	76
3.3.1	Caracteristicile senzorilor	77
3.3.2	Alimentarea cu energie a senzorilor	84
3.4	Componentele de filtrare și de agregare a datelor	84
3.5	Subsistemul de transmisie a datelor	85
4	Tehnici de detecție a degradărilor și a defectelor cablurilor	88
4.1	Modelarea geometrică a cablului	89
4.1.1	Modelul 3D al cablului metalic	89
4.1.2	Calculul proiecțiilor 2D ale modelului 3D	91
4.1.3	Estimarea proprietăților fizice ale cablurilor	93
4.2	Determinarea caracteristicilor deteriorărilor cablului	94
4.2.1	Caracteristicile coroziunii externe a cablului	94
4.2.2	Caracteristicile abraziunii externe	97
4.2.3	Caracteristicile firelor individuale rupte	105
5	Recunoașterea degradărilor și clasificarea automată a imaginilor	111
5.1	Clasificarea deteriorărilor prin învățare supervizată	112
5.1.1	Utilizarea rețelelor neuronale	113
5.1.2	Metode bazate pe logica fuzzy	115
5.2	Clasificarea deteriorărilor prin învățare nesupervizată	119
5.3	Detecția prin intermediul modelelor Markov cu stări ascunse	120

6	Rezultate experimentale	121
6.1	Analiza rezultatelor detecției coroziunii externe	122
6.2	Analiza detecției abraziunii externe	124
6.3	Analiza detecției firelor individuale rupte	125
7	Concluzii	129
7.1	Concluzii generale	129
7.2	Contribuții personale	129
7.3	Valorificarea rezultatelor cercetării	131
7.4	Direcții viitoare de cercetare	132
	Bibliografie	133
	Anexe.....	143

Lista Figurilor

Figura 1.1 Clasificarea structurilor pe cabluri.....	17
Figura 1.2 Structura unui cablu metalic, adaptare după [6].	18
Figura 1.3 Structura primului cablu metalic, redesenat din [8].....	19
Figura 1.4 Structura cablurilor metalice [8]: a) cu un strat (7 fire). b) cu două straturi	20
Figura 1.5 Structura cablului metalic dezvoltat de Seale, redesenat din [8].	21
Figura 1.6 a) Structura cablului Filler. b) Structura cablului Warrington [11].	21
Figura 1.7 Exemple de cabluri cu fire aplatizate.....	22
Figura 1.8 Structuri de cabluri cu mai multe toroane, adaptare după [11] și [15].	23
Figura 1.9 a) secțiune rotundă. b) secțiune triunghiulară. c) secțiune ovală. d) secțiune dreptunghiulară, adaptare după [16].	24
Figura 1.10 Structura de tip: 49 Seale–Warrington–Seale [1-8-8-(8+8)-16], reproducă din [15].	24
Figura 1.11 Clasificarea cablurilor în funcție de pasul și sensul de cablaj.	25
Figura 1.12 a) Exemplu de coroziune internă a cablului în secțiune. b) Coroziune externă. ..	27
Figura 1.13 Exemplu de abraziune externă.	27
Figura 1.14 Exemplu de fire individuale rupte.	27
Figura 1.15 Exemplu de fire individuale rupte datorită oboselii, reprodus din [19].	28
Figura 1.16 a) Reducerea secțiunii firului. b) Modificarea secțiunii firului prin deformare. ..	28
Figura 1.17 Exemplu de uzură cu reducerea secțiunii cablului.	28
Figura 1.18 Exemplu de toron rupt la interfața cu inima.	29
Figura 1.19 Exemplu de ruptură la nivelul unui toron extern.	29
Figura 1.20 Exemplu toron-inimă rupt și toroane exterioare intacte, reprodus din [20].	29
Figura 1.21 Exemplu de cedare a unui toron de tip inimă.	29
Figura 1.22 Exemplu de deformare locală a cablului, reprodus din [15].	30
Figura 1.23 Exemplu de deformare a cablului de tip colivie, reprodus din [15].	30
Figura 1.24 Cablu cu inima ieșită spre exterior, reprodus din [6].	30
Figura 1.25 Fazele premergătoare și cedarea totală a unui cablu, reprodus din [21].	31
Figura 1.26 Fire individuale rupte, preluat din [28].	33
Figura 1.27 Caz de fire rupte în rosturi, reprodus din [30].	34
Figura 2.1 Condițiile monitorizării directe [53].	41
Figura 2.2. Crăpătură, vopsea uscată sau exfoliată [54].	43
Figura 2.3. Neuniformitate a înfășurării [51].	44
Figura 2.4. Încrêțitură, fire încrucișate [54].	44
Figura 2.5. Reprezentare schematică a senzorului [44].	47
Figura 2.6. Senzor cu magnet permanent și bobină de înregistrare [44].	48
Figura 2.7. Senzor cu magnet permanent și dispozitive Hall [44].	48
Figura 2.8. Fluxul magnetic creat de o sârmă ruptă [44].	48
Figura 2.9	49
Figura 2.10	49
Figura 2.11	49
Figura 2.12	50
Figura 2.13	50
Figura 2.14	50

Figura 2.15	50
Figura 2.16	51
Figura 2.17	51
Figura 2.18	51
Figura 2.19	52
Figura 2.20	52
Figura 2.21	53
Figura 2.22	54
Figura 2.23	54
Figura 2.24 Principiul de funcționare a aparatelor de detecție cu ultrasunete.	56
Figura 2.25 Tipuri de traductori, reprodus din [64].	56
Figura 2.26 Sistemul Cable-Scan, reprodus din [61].	57
Figura 2.27 Amplasare în situ a sistemului Cable-Scan, reprodus din [68].	58
Figura 2.28 Rezultate testării pentru cablurile unui pod suspendat, reprodus din [68].	58
Figura 2.29 Echipamente pentru investigații ale emisiilor acustice [71].	60
Figura 2.30 Reprezentarea grafică a efectelor Kaiser și Felicity.	61
Figura 2.31 Senzori piezoelectrice și cabluri [76].	63
Figura 2.32 Senzori piezoelectrice [76].	63
Figura 2.33 Dispozitiv de achiziție de date, conectat la calculator [76].	63
Figura 2.34 Amplificator de semnal [76].	64
Figura 2.35 Energia acustică emisă de ruperea firelor dintr-un cablu supus la întindere [77].	64
Figura 2.36 Detector termic [83].	67
Figura 2.37 Cameră termoviziune [84].	67
Figura 2.38 Sistem complex de termoviziune pentru inspecția fuzelajului avioanelor [64]. ...	67
Figura 2.39 Termograma unui cablu, imediat după rupere [81].	68
Figura 2.40 Termograme la diferite trepte de tensionare [80].	68
Figura 3.1 Arhitectura sistemului de monitorizare nedistructivă.	75
Figura 3.2 Tehnologii de achiziție a imaginilor.	78
Figura 3.3 Disponerea camerelor în raport cu cablul.	79
Figura 3.4 Camera Smartek Vision Giganetix Plus2753C	80
Figura 3.5 Nod WSN dotat cu mini-panou solar intern.	81
Figura 3.6 Arhitectura rețelelor de comunicație.	86
Figura 3.7 Scenariul comunicației prin retransmisii WiFi și/sau rețele UMTS.	87
Figura 4.1 Secțiune de cablu din oțel, tip 6 x 19 + FC, utilizat în experimente.	88
Figura 4.2 Secțiunea modelului 3D al cablului.	89
Figura 4.3 Geometria toroanelor în raport cu centrul inimii cablului.	91
Figura 4.4 Geometria firelor în cadrul unui toron, în raport cu centrul toronului,	91
Figura 4.5 Cuantificarea direcțiilor gradientului pentru $w = 5$	102
Figura 4.6 Cuantificarea direcțiilor gradientului pentru $w = 7$	103
Figura 4.7 Conturul unui cablu neafectat de abraziune.	104
Figura 4.8 Conturul extras al cablului.	105
Figura 4.9 Fir individual rupt, atasat la toron.	105
Figura 4.10 Schiță de corespondență pixeli.	107
Figura 4.11 Fazele detecției firului rupt.	109
Figura 4.12 Fire individuale rupte desprinse de pe toron.	109

Figura 5.1 Neuron McCulloch-Pitts.	113
Figura 5.2 Perceptronul MLP.....	114
Figura 5.3 Gradele de apartenență pentru corozia externă.	118
Figura 5.4 Gradele de apartenență pentru abraziunea externă.	119
Figura 6.1 Pod suspendat cu cabluri afectate de corozie.....	122
Figura 6.2 Rezultatele grafice ale experimentului	123

Lista Tabelelor

Tabel 2.1 Aparate INTRON	50
Tabel 2.2 Aparate NDT Technologies	52
Tabel 3.1 Specificațiile optice ale camerei	79
Tabel 3.2 Specificațiile mecanice și electrice ale camerei	80
Tabel 5.1 Descrierea variabilei lingvistice "Coroziune externă"	117
Tabel 5.2 Descrierea variabilei lingvistice "Abraziune externă"	117
Tabel 5.3 Descrierea variabilei lingvistice "Fire rupte"	117
Tabel 5.4 Descrierea variabilei lingvistice "Gravitate fire rupte"	118
Tabel 6.1	122
Tabel 6.2	123
Tabel 6.3	124
Tabel 6.4	125
Tabel 6.5	125
Tabel 6.6	125
Tabel 6.7	126
Tabel 6.8	126
Tabel 6.9	126
Tabel 6.10	127
Tabel 6.11	127
Tabel 6.12	128
Tabel 6.13	128
Tabel 6.14	128

Abrevieri

1D	One-dimensional
2D	Bi-dimensional
3D	Three-dimensional
4D	Four-dimensional
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CCD	Charge-Coupled Device
FC	Fiber Core
GLCM	Gray Level Co-occurrence Matrix
GPRS	General Packet Radio Service
HSI	Hue Saturation Intensity
IEC	International Electrotechnical Commission
ISMB	Industrial Scientific Medical Band
ISO	International Organization for Standardization
IWRC	Independent Wire Rope Core
LF	Local Fault
LMA	Loss of Metallic Cross-Sectional Area
MFL	Magnetic Flux Leakage
PoE	Power over Ethernet
PR	Pattern Recognition
RGB	Red Green Blue
SIM	Subscriber Identification Module
TDI	Time Delay Integration
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WiFi	Wireless Fidelity
WSC	Wire Strand Core
WSN	Wireless Sensor Network

1 Introducere

1.1 Motivația cercetării întreprinse

În prezent, lumea depinde în funcționarea de zi cu zi de sisteme mecanice bazate pe cabluri cum sunt podurile, instalațiile de transport pe cablu sau structurile ușoare cu cabluri portante. Deși structurile enumerate mai sus au fost proiectate având în vedere o durată de exploatare clar specificată în documentațiile tehnice, multe dintre ele se afla încă în uz, chiar dacă s-a depășit această durată. Cauzele sunt dintre cele mai diverse, totuși una dintre cele mai importante cauze fiind cea de natură economică, în ultimii ani diminuându-se investițiile datorită scăderii fluxurilor de capital.

Soluția directă pentru structurile care și-au depășit durata de exploatare proiectată ar fi demolarea și înlocuirea lor cu alte structuri noi. De cele mai multe ori, din considerentele economice menționate anterior, beneficiarii acestor structuri recurg la implementarea de soluții pentru monitorizarea structurală în vederea detecției deteriorărilor, avariilor și defectelor care pot să apară în cadrul structurilor. Astfel structurile pot rămâne în uz și pot fi menținute astfel încât să prezente siguranță pentru perioade de timp mai lungi decât durata de exploatare specificată în proiectul inițial.

În plus, în vederea asigurării siguranței în exploatarea structurilor, monitorizarea poate începe deja de pe parcursul duratei de exploatare proiectate putându-se astfel surprinde modificările comportamentale, fizice sau materiale ale structurii care pot rezulta din interacțiunea cu elementele naturii sau cu alte structuri cu care relaționează.

Printr-un simplu exercițiu de folosire a motoarelor de căutare web se descoperă un număr ridicat de tragedii umane cauzate de cedarea cablurilor. Cele mai des întâlnite accidente au loc la instalațiile de transport pe cabluri a persoanelor. O scurtă listă cronologică a celor mai grave accidente este prezentată mai jos :

09.04.1947: Monte Serrate, Santos, São Paulo, Brazilia (funicular): 1 mort, 6 răniți.

Descriere succintă: La ora 13.45, la 20 de ani de la construcție, cablul funicularului Monte Serrate care transporta 30 de persoane la acel moment a cedat. Ca urmare, 1 persoană a decedat și 6 au fost grav rănite.

26.07.1956: Rowe Mountain, New Hampshire, SUA (telescaun): 1 mort, 7 răniți.

Descriere succintă: Probabil primul accident fatal de telescaun, când 1 persoană a decedat și 7 au fost rănite deoarece cablul de oțel al telescaunului din Rowe Mountain a cedat. La acel moment, 30 de persoane se aflau pe instalație.

12.07.1972: Bettmeralp, Elveția (telecabina): 12 morți, 2 răniți.

Descriere succintă: Telecabina de la Bettmeralp avea o capacitate de 120 oameni și parcurgea un traseu cu o diferență de înălțime de 1000m. În ziua accidentului, telecabina se întorcea la bază când cele 2 cabluri tractoare au cedat, determinând accelerarea necontrolată a cabinei și zdrobirea acesteia de peretele de beton al clădirii de la bază. Din cei 14 pasageri, 12 au decedat iar 2 au fost grav răniți.

09.03.1976: Cavalese, Italia (telecabină): 42 morți, 1 rănit.

Descriere succintă: Catastrofa de la Cavalese din 1976 este cel mai grav accident din istoria instalațiilor pe cablu. Pe 9 martie 1975, cablul purtător al telecabinei s-a rupt în timpul coborârii de la Cermis spre Cavalese. Telecabina a căzut în gol 200m, după care a mai alunecat încă 300m pe versantul muntelui până s-a oprit într-o pajiște; 43 de persoane au decedat, inclusiv 15 copii. Investigația a relevat faptul că 2 cabluri de oțel s-au intersectat, unul dintre ele secționându-l pe celălalt. Experții au susținut că fusese efectuată o testare recentă a cablurilor purtătoare cu o greutate mult mai mare decât greutatea unei cabine încărcate la capacitate maximă. La acel moment, compania producătoare a cablului, Falck-Acciaierie e Ferriere Lombarde, a examinat porțiunea ruptă a cablului și a constatat scobituri adânci și urme ale unei temperaturi înalte aplicate la suprafața cablului, cauzate de frecare.

01.06.1990: Tbilisi, Georgia (telegondolă): 21 morți.

Descriere succintă: Cablul de tracțiune s-a rupt determinând alunecarea pe cablul purtător a unei gondole cu viteză mare până la momentul zdrobirii de un pilon. Pasagerii au căzut din cabină pe clădirile și străzile aflate dedesubt. Ulterior, o a doua gondolă, afectată de alunecarea primei, s-a prăbușit de asemenea în peretele clădirii de la baza instalației.

12.10.1996: Quebec, Canada (funicular): 1 mort, 15 răniți.

Descriere succintă: Funicularul din Vieux Quebec s-a prăbușit în clădirea de la baza instalației cu 16 turiști la board, deoarece cablul de susținere s-a rupt iar frânele au cedat.

02.03.2009: Parcul Național Sierra Nevada, Spania (telescaun): 17 răniți.

Descriere succintă: Cablul de susținere a deraiat de pe rolele de ghidaj determinând căderea telescaunelor.

Pe lângă exemplele de accidente produse la instalațiile de transport pe cabluri, pe continentul asiatic în țări precum India, Vietnam sau Indonezia, unde infrastructura fie se dezvoltă rapid și haotic (India) fie duce lipsă de finanțare (Vietnam) au loc zeci de accidente sau prăbușiri ale unor poduri suspendate pe cabluri sau cu hobane, rutiere sau pietonale. Aceste accidente au un ecou redus sau inexistent în societatea vestică, dar produc decesul sau vătămarea corporală gravă a sute de persoane. Exemple sunt colapsul unor poduri precum cel din Daman, India din 28 august 2003 [1] sau cel al podului pietonal din Lai Chau, Vietnam din 24 februarie 2014 [2].

Multe dintre tragediile prezentate mai sus puteau fi anticipate și evitate dacă existau informații cu privire la evoluția cronologică a stării de integritate structurală a cablurilor. Inspecțiile vizuale sau de altă natură întreprinse de către specialiștii autorităților statale sau de către entități private autorizate la intervale de timp de unul sau doi ani nu sunt suficiente pentru a asigura siguranța deplină a utilizatorilor. Din acest motiv în următorul paragraf se expune succint scopul cercetării finalizate cu prezenta teză de doctorat.

Scopul tezei este dezvoltarea teoretică și experimentală a unui model inovativ de monitorizare a integrității structurale a cablurilor din componența podurilor hobanate/suspendate, din componența instalațiilor de transport pe cablu sau din componența instalațiilor de ridicare. Acest model trebuie să fie transpus într-un sistem de tip prototip pentru monitorizarea integrității structurale a cablurilor.

1.2 Obiectivele tezei

Din scopul tezei derivă o serie de obiective detaliate în următoarele paragrafe. Obiectivul principal al cercetării este propunerea unui prototip de monitorizare structurală a cablurilor format atât din componente hardware cât și din aplicații software. Sistemul trebuie să permită evaluarea integrității structurale a cablurilor de la distanță cu un minim de intervenție în situ a specialiștilor în inginerie civilă, automatică, electronică și tehnologia informației.

Următoarele obiective sunt secundare și derivă din primul obiectiv al tezei. Al doilea obiectiv a fost proiectarea unei soluții tehnice pentru obținerea automată a informațiilor de natură vizuală asupra stării fizice exterioare a cablurilor. Acest obiectiv implică dezvoltarea unui sistem de achiziție a imaginilor cablurilor de transport în situ și propunerea unui model optimizat pentru achiziția imaginilor cablurilor fixe de la podurile hobanate sau suspendate.

Al treilea obiectiv a fost dezvoltarea pe baza ultimelor tehnologii în domeniu, a unui sistem de comunicație la distanță a datelor achiziționate în situ pentru a putea fi prelucrate și analizate în cadrul unui laborator de cercetare sau în cadrul unor centre tehnice de mentenanță.

Al patrulea obiectiv a fost dezvoltarea unor componente software de procesare a informațiilor achiziționate cu privire la starea structurii. Aceste componente trebuie să manifeste capacitatea de a detecta cu acuratețe apariția în structura cablurilor metalice a degradărilor sau a deteriorărilor.

Al cincilea obiectiv este legat de dezvoltarea unor procese software capabile să evolueze și să „învețe” din cadrul datelor de intrare despre modelele și scenariile posibile de manifestare a diferitelor tipuri de degradări structurale.

1.3 Definiția conceptelor de monitorizare structurală

Degradările sau deteriorările pot fi descrise ca schimbări (nedorite) care apar în mod intenționat sau nu, într-un sistem sau structură, și care îi afectează în mod nefavorabil funcționarea și performanțele actuale și viitoare. În general, deteriorările și avariile afectează materialele din care este construită structura, sau proprietățile geometrice ale acestora. În orice structură există deteriorări la nivel microscopic sau la nivelul materialelor din care sunt compuse elementele structurii. Aceste deteriorări pot fi de tipul golurilor, incluziunilor de alte materiale, dislocărilor etc. Specialiștii în știința materialelor identifică aceste deteriorări ca fiind defecte, de cele mai multe ori de fabricație. Dacă sunt create condiții de încărcare, și forțe suficient de mari acționează asupra structurii, aceste defecte conduc la deteriorări la nivelul componentelor structurale, care pot duce la rândul lor la deteriorări majore ale structurii și, în final, la cedarea acesteia. Cedarea structurii semnifică faptul că aceasta nu mai este capabilă să realizeze funcționalitățile pentru care a fost proiectată.

Monitorizarea structurală poate presupune utilizarea unor tehnici care produc sau nu produc deteriorări sau modificări de comportament ale structurii. Monitorizarea structurilor devine în acest mod o combinație de discipline înrudite, cum sunt: predicția deteriorărilor,

testarea nedistructivă, monitorizarea stării structurale, controlul statistic al proceselor și monitorizarea integrității structurale prin detecția defectelor.

Pe lângă beneficiarii, operatorii și utilizatorii de structuri cu cabluri, principalele grupe de specialiști care sunt interesați de monitorizarea structurală și de detecția defectelor sau ale deteriorărilor apărute în urma exploatării curente sunt formate din ingineri de structuri și ingineri specializați în știința materialelor.

Principalul punct de vedere abordat în lucrare este cel din perspectiva inginerilor de structuri. Problemele care se ridică pentru ei sunt următoarele: apariția deteriorărilor structurale, dacă da, care sunt cauzele apariției acestor deteriorări și care sunt efectele pe care le produc asupra structurii, cum pot fi diminuate sau atenuate aceste efecte, cum se poate acționa și ce poate fi făcut pentru a preveni pe viitor apariția unor deteriorări similare, ce măsuri pot fi luate pentru eliminarea sau atenuarea efectelor deteriorărilor și cât de repede și de accentuat vor evolua deteriorările până când vor ajunge să depășească un anumit nivel critic.

Prima problemă majoră asociată monitorizării este modul în care se efectuează aceasta. Din punct de vedere al efectelor asupra structurii monitorizate, aceasta poate fi de tip distructiv sau de tip nedistructiv. O a doua problemă majoră de care se lovesc atât beneficiarii sau utilizatorii structurilor, cât și inginerii de structuri, este posibilitatea efectuării monitorizării nedistructive în timp ce structura este în uz, sau necesitatea întreruperii utilizării structurii în intervalul de timp în care are loc monitorizarea.

În trecut, primele metode de întreținere și de monitorizare a structurilor aveau un caracter periodic. Se poate spune că partea de întreținere avea un caracter principal, iar partea de monitorizare unul secundar. Spre exemplu, cablurile utilizate în cadrul sistemelor de transport pe cablu erau înlocuite după un anumit număr de ore de utilizare, sau după un anumit număr de curse efectuate, indiferent de starea acestora. Se considera că, pentru intervalul de timp stabilit pentru utilizare, acestea prezintă siguranță în procent de 100% și că după acest interval de timp este posibil să apară probleme în exploatare. Un astfel de sistem, putea avea încorporată și o componentă de monitorizare simplă, care să înregistreze numărul de ore de utilizare, sau care să înregistreze numărul de curse efectuate sau alți parametri pe baza cărora poate avea loc înlocuirea cablurilor.

În ultimele decenii are loc o tranziție a tehnicilor de monitorizare și de întreținere spre abordări bazate pe starea curentă a structurii sau a anumitor părți ale structurii. În cadrul acestor abordări componenta de monitorizare are un rol principal. Astfel, este necesar un sistem, de obicei complex, de monitorizare care să fie capabil să supravegheze comportamentul structurii și să poată semnaliza utilizatorii structurii cu privire la modificări în comportamentul structurii care sunt cauzate de apariția unor degradări. Notificarea trebuie să aibă loc în timp util, astfel încât degradarea să nu aibă un nivel critic, iar utilizatorul structurii să poată să întreprindă operațiuni de întreținere și de reparații care să aducă structura la o stare sigură pentru utilizatorii acesteia.

Totuși, un astfel de sistem aduce un nivel suplimentar de complexitate în utilizarea structurii datorită componentelor hardware destul de sofisticate care trebuie instalate în cadrul structurii monitorizate, și datorită proceselor de analiză a datelor furnizate de către componentele de măsurare care sunt parte integrantă a sistemului de monitorizare.

1.3.1 Monitorizarea distructivă versus monitorizarea nedistructivă

1.3.1.1 Monitorizarea distructivă

Monitorizarea distructivă trebuie percepută ca o testare distructivă compusă dintr-un grup de teste de natură mecanică. Prin efectuarea acestor teste mecanice se determină cu exactitate caracteristicile fizice și mecanice ale elementului testat din punct de vedere cantitativ. Deși, informația obținută prin intermediul acestor metode beneficiază de o acuratețe ridicată, ea se aplică cu certitudine doar mostrelor testate. Testarea distructivă duce la alterarea caracteristicilor elementului testat și, de cele mai multe ori, chiar la distrugerea acestuia. Elementul testat nu mai poate fi utilizat după testare, dar sunt obținute informații importante cu privire la aspectele care trebuie incluse în faza de proiectare/îmbunătățire a elementului testat și cu privire la durata de exploatare a elementului testat.

Conform [3] testarea distructivă poate fi statică sau dinamică și furnizează informații importante despre următoarele proprietăți ale elementului testat: rezistența limită de rupere la întindere, punctul de rupere, caracteristicile de elongație, ductilitatea, durabilitatea la solicitări de oboseală, rezistența la coroziune, rezistența dinamică sau de impact, duritatea sau rigiditatea.

Rezistența limită de rupere la întindere, punctul de rupere și caracteristicile de elongație ale cablurilor se testează cu ajutorul preselor de înaltă precizie, precum este și cea din cadrul Laboratorului de Acțiuni în Construcții și Structuri de la Facultatea de Construcții a Universității Tehnice din Cluj-Napoca [4].

În urma unei analize a tehnicilor de monitorizare/testare distructivă din [3], [5] sunt scoase în evidență următoarele avantaje ale acesteia:

- Furnizarea de informații cu o acuratețe ridicată despre elementul testat;
- Furnizarea de date extrem de utile pentru procesele de proiectare;
- Informația obținută poate fi folosită pentru stabilirea specificațiilor tehnice ale elementului și a unor viitoare standarde în domeniu;
- Informațiile obținute sunt preponderent de natură cantitativă;
- Pe baza rezultatelor se poate aproxima intervalul de exploatare al elementului testat.
- Totuși, conform [5] există un set de limitări ale efectuării testării distructive:
- Informațiile obținute sunt aplicabile în proporție de 100% doar elementului testat și pot fi doar extinse, prin aproximare, altor produse în aceleași condiții cu elementul testat;
- Majoritatea metodelor de efectuare a testării/monitorizării implică prezența elementului testat într-un laborator;
- Majoritatea metodelor de efectuare a testării/monitorizării implică costuri ridicate din cauza necesarului de echipamente complexe de testare;
- În cele mai multe cazuri, testarea unor elemente aflate în utilizare implică distrugerea elementului testat și scoaterea din funcțiune pentru un anumit interval de timp a sistemului din care face parte elementul;
- Chiar dacă elementul testat nu este distrus, de cele mai multe ori acesta suferă modificări care nu mai permit utilizarea lui în condiții de siguranță.

1.3.1.2 Monitorizarea nedistructivă

La modul general, monitorizarea nedistructivă a unei structuri, sau părți dintr-o structură, presupune examinarea periodică sau permanentă a acesteia, testarea și evaluarea ei, fără ca în timpul execuției acestor acțiuni să apară schimbări, degradări sau deteriorări de orice fel ale structurii.

Obiectivul principal al efectuării monitorizării este de a determina prezența sau absența unor modificări, degradări sau discontinuități ale componentelor sau ale materialelor din care este alcătuită structura, care pot avea efecte negative asupra integrității structurale sau a continuării menținerii în stare de funcționare a structurii.

Alți termeni utilizați în literatura de specialitate [6] pentru a desemna tehnicile de monitorizare nedistructivă sunt cei de examinare nedistructivă, inspecție nedistructivă sau evaluare nedistructivă.

Deși, monitorizarea structurală nedistructivă se aplică de câteva decenii, faptul că aceasta are loc este destul de puțin cunoscut de către utilizatorii structurilor, care consideră un fenomen natural faptul că structurile nu cedează sau că podurile nu se prăbușesc. În majoritatea domeniilor de activitate inginerescă, dar nu numai, unde există posibilitatea de accidentare sau chiar de pierdere a vieților omenești din cauza deteriorării, defectării sau funcționării necorespunzătoare a unor sisteme. putem găsi în prezent sisteme de monitorizare sau de testare a funcționării.

Monitorizarea structurală sau testarea nedistructivă a unei structuri își găsește modelul de aplicare chiar în urma analizei comportamentului zilnic uman. Corpul omenesc efectuează în permanență o monitorizare a mediului în care se află și a propriei stări de funcționare prin intermediul simțurilor. Spre exemplu, prin simțul mirosului omul detectează prezența în aer a unei substanțe urât mirositoare sau toxice, prin intermediul simțului tactil se determină apropierea de un obiect încins sau foarte rece, prin intermediul auzului se permite detecția unor surse de pericol cum ar fi apropierea unui obiect zgomotos în trafic și, poate cel mai elocvent exemplu este cel dat de simțul vizual care permite monitorizarea nedistructivă și versatilă a majorității mediului înconjurător [3].

Sistemele de monitorizare structurală nedistructivă trebuie să urmeze exemplul evident, dar complex, oferit de corpul uman. Dezvoltarea sistemelor de monitorizare structurală a fost facilitată în ultimii ani de descoperirile tehnologice dintr-o serie de domenii precum cele ale hardware-ului computațional, al rafinării și diversificării tehnologiilor de producție a senzorilor, a procesării digitale a semnalelor, a mecanicii computaționale sau a dinamicii structurale experimentale.

În [7] se formulează următoarele axiome fundamentale sau principii fundamentale ale monitorizării structurale ale unui sistem:

Axioma nr.1: Toate materialele manifestă defecte sau vicii inerente.

Axioma nr.2: Evaluarea stării de degradare a unei componente sau a unui sistem necesită o comparație între două stări cunoscute ale sistemului.

Axioma nr.3: Identificarea existenței și a locației unei deteriorări sau a unui defect poate fi făcută într-un mod de învățare nesupervizat, dar identificarea tipului de

deteriorare/defect sau a severității deteriorării/defectului poate fi făcută, în general, doar într-un mod de învățare supervizat.

Axioma nr.4: Senzorii nu sunt capabili să măsoare direct deteriorarea, aceștia au nevoie de extragerea caracteristicilor/trăsăturilor prin intermediul procesării semnalelor, și apoi de clasificare statistică în vederea conversiei informațiilor captate de senzori în informații despre deteriorări.

Axioma nr.5: În situația în care nu se utilizează extragerea inteligentă a trăsăturilor, măsurătorile unei deteriorări vor fi în mod proporțional sensibile cu cât este de sensibil sistemul de măsurare la condițiile schimbătoare ale mediului de operare.

Axioma nr.6: Durata de la apariția deteriorării și evoluția deteriorării până la momentul inițierii monitorizării structurale dictează proprietățile necesare pentru componenta de măsurare a sistemului de monitorizare structurală.

Axioma nr.7: Acuratețea detecției deteriorărilor la un sistem de monitorizare va fi tot timpul în compensație cu capacitatea sistemului de a avea o toleranță ridicată la sursele de zgomot.

Axioma nr.8: Deteriorările apărute într-un sistem monitorizat cresc complexitatea sistemului.

Principalele avantaje aduse de metodele de monitorizare structurală nedistructive sunt următoarele [3]:

- Elementul monitorizat/testat nedistructiv nu este modificat sau deteriorat și poate să rămână în serviciu după testare și în multe cazuri chiar și în timpul monitorizării;
- Se pot efectua monitorizări ale elementelor atât la suprafață, cât și în interior;
- Pot fi monitorizate segmente sau porțiuni ale unui element structural fără a influența sau modifica starea segmentelor adiacente sau interconectate;
- Elementele structurale pot fi monitorizate în timpul funcționării, sau în timp ce fac parte și conlucrează cu alte elemente ale sistemului structural;
- Majoritatea metodelor de monitorizare nedistructivă pot fi aplicate în situ, în zona elementului structural;
- În general, costurile asociate monitorizării nedistructive sunt mai scăzute decât în cazul celei distructive.

Totuși, metodele și sistemele de monitorizare nedistructivă prezintă următorul set de limitări [3], [5]:

- În general, informația obținută nu este de natură cantitativă, ci calitativă;
- În majoritatea cazurilor este dependent de operatorul uman; Unele metode nu oferă posibilitatea de înregistrare a informațiilor rezultate în urma monitorizării; Necesită unele cunoștințe dobândite a priori despre deteriorările și defectele monitorizate; Modul de interpretare al unor categorii de rezultate este subiectiv și poate naște discuții contradictorii.

În urma analizei celor două clase de metode de monitorizare distructivă și nedistructivă, concluzia este că, pentru a beneficia de un set cât mai complet de informații despre structura

supusă monitorizării, de cele mai multe ori este necesară utilizarea unei combinații dintre cele două metode.

1.4 Clasificarea structurilor cu cabluri

Structurile portante cu cabluri sunt întâlnite în cele mai variate domenii ingineresti, începând cu podurile suspendate/hobanate, continuând cu structurile ușoare bazate pe cabluri și membrane, structuri de producere și de furnizare a energiei, structuri specifice telecomunicațiilor, structuri utilizate în industria extractivă sau, nu în ultimul rând, sistemele de irigații în agricultură.

Structurile portante pe cabluri pot fi clasificate conform schemei din Figura 1.1:

1. Structuri suspendate
 - 1.1. Structuri hobanate:
 - 1.1.1. În industria energetică;
 - 1.1.2. Antene;
 - 1.1.3. Poduri;
 - 1.1.4. Clădiri civile și industriale;
 - 1.1.5. Sisteme de irigații gravitaționale.
 - 1.2. Structuri sistem pod suspendat:
 - 1.2.1. Ancorate în blocuri;
 - 1.2.2. Auto-ancorate;
2. Structuri pe rețele de cabluri:
 - 2.1. Tensionate:
 - 2.1.1. Mecanic;
 - 2.1.2. Cu aer;
 - 2.2. Netensionate:
 - 2.2.1. Corturi;
 - 2.2.2. Rezervoare;
 - 2.2.3. Suprafețe cu curbura pozitivă;
 - 2.2.4. Suprafețe funiculare.

Alte două domenii de importanță strategică, în care cablurile își găsesc utilizarea, sunt instalațiile de transport pe cabluri sau instalațiile de transport utilizate în industria minieră. Instalațiile de transport pe cabluri pot fi clasificate în principal după următoarele criterii:

1. În funcție de numărul și modul de folosire a cablurilor;
 - 1.1. Funiculare monocabluri;
 - 1.2. Funiculare bicabluri;
2. În funcție de modul de deplasare al cablurilor tractoare;
 - 2.1. Cu deplasare continua;
 - 2.2. Cu deplasare pendulară;
3. În funcție de destinație;
 - 3.1. Pentru transportul persoanelor;
 - 3.2. Pentru transportul materialelor.

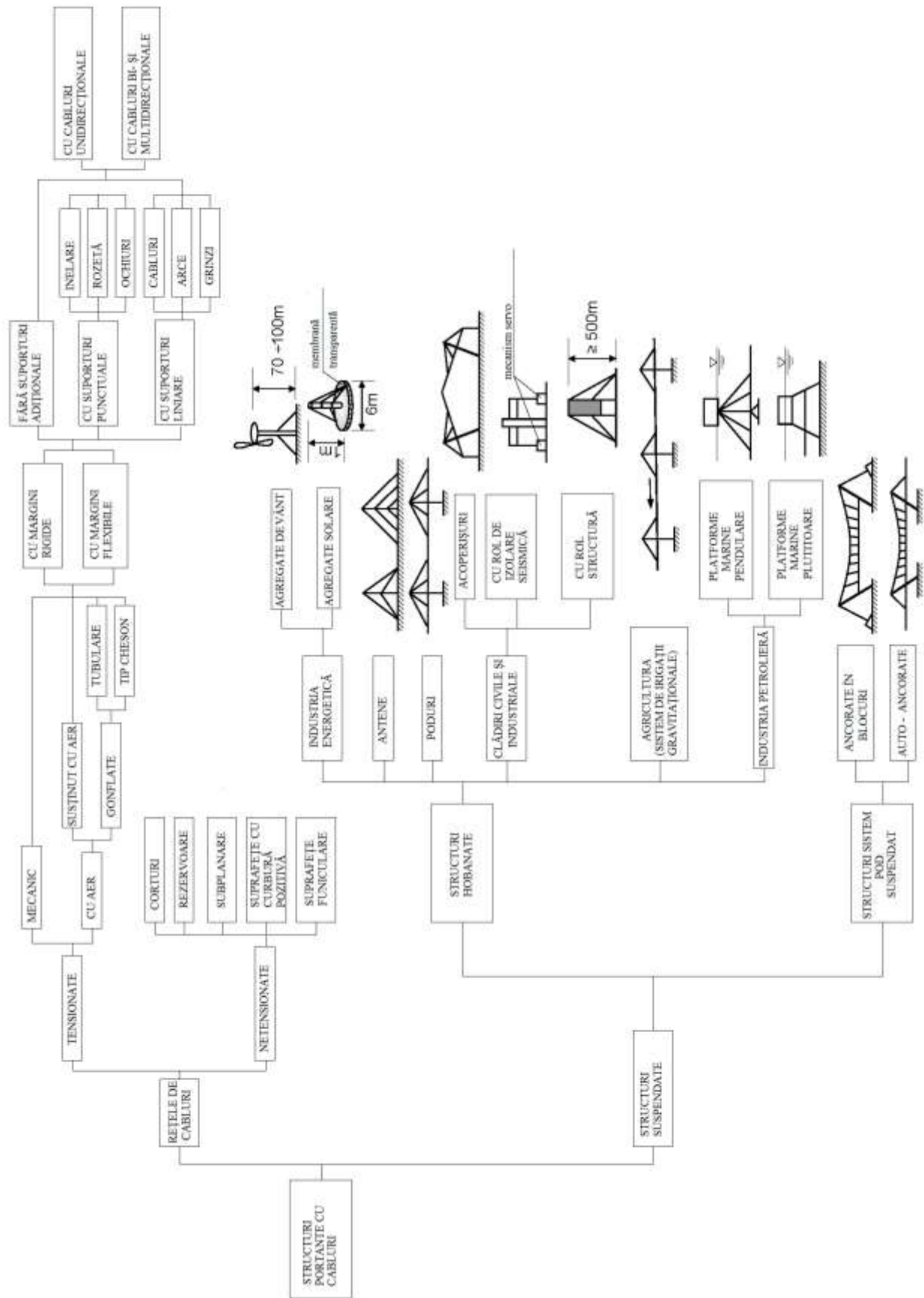


Figura 1.1 Clasificarea structurilor pe cabluri.

1.4.1 Structura internă a cablului

Componentele unui cablu metalic obișnuit, utilizat în aplicațiile generale, sunt prezentate în Figura 1.2. Componenta individuală de bază a unui cablu este firul. Un grup de cel puțin 3 fire și ajungând uneori până la 110 fire formează un toron. Firele componente ale unui toron pot fi răsucite în jurul axei proprii, spiralate sau dispuse în mod paralel. Torsadarea mai multor toroane în jurul unui toron central creează structura finală a cablului. Toronul central poartă numele de inimă (sau de toron de tip inimă).

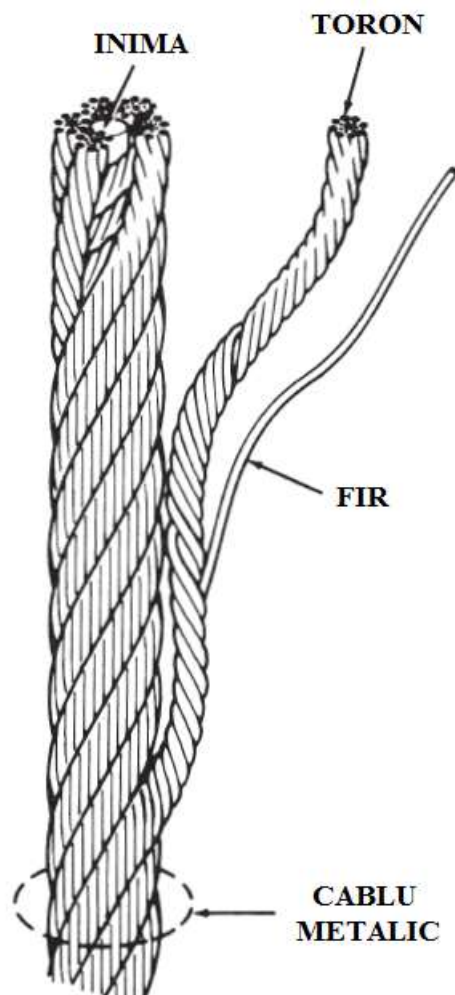


Figura 1.2 Structura unui cablu metalic, adaptare după [8].

Descrierea corectă a componentelor cablului este foarte importantă în momentul efectuării monitorizării stării de degradare a cablului. Folosirea greșită a termenilor ce descriu componentele cablului poate induce în eroare și poate conduce la raționamente greșite. De exemplu, interschimbarea termenilor de *toron* și de *fir* în cadrul unei analize a rupturii unui toron, poate cauza impresia unei gravități diminuate, neglijabile, când de fapt cablul afectat de această problemă trebuie înlocuit cât mai repede [9].

1.5 Istoricul apariției cablurilor metalice și dezvoltarea acestora

Apariția cablurilor din sârmă metalică, în sensul în care sunt folosite și în zilele noastre, are loc la începutul secolului al 19-lea, când (între anii 1824-1839) inginerul de mine german W. A. J. Albert von Clausthal a căutat o soluție mai sigură pentru îmbunătățirea transportului în puțurile de mină [10]. Inginerul a încercat să combine într-un singur element avantajele funiilor tradiționale din cânepă (paralelismul elementelor portante) cu avantajele oferite de lanțurile metalice (rezistență ridicată la întindere). Încercarea lui a dus la nașterea cablurilor din sârmă care se găsesc și în prezent în uz într-un număr ridicat de aplicații, inclusiv la transportul pe cablu (terestru, marin), structuri civile și industriale pe cabluri, sisteme de exploatare minieră, sisteme de ancorare a platformelor marine etc.

Primul cablu din sârmă metalică dezvoltat de inginerul german a avut un diametru de 18 mm, era compus din 3 toroane, fiecare a câte 4 fire cu un diametru de aproximativ 3,5 mm răsucite manual. În Figura 1.3 este prezentată structura acestuia.



Figura 1.3 Structura primului cablu metalic, redesenat din [10].

Începutul utilizării cablurilor din sârmă este marcat de inginerul german pe 23 iulie 1834, când cablul său este testat în puțul minei Caroline din Clausthal la o adâncime de 484 m. Testul a fost un succes, cablul său putând susține o încărcătură de 4 ori mai mare decât era susținută până la acel moment de lanțurile metalice, sau de 6 ori mai mare decât a frânghiilor de cânepă, totul la un spațiu ocupat pe tambur de o treime față de tehnicile pe lanțuri și frânghii [10].

Principalele avantaje ale modelului de cablu inventat de către inginerul german erau următoarele: în primul rând, cablul de sârmă nu ceda brusc și cedarea firelor metalice era treptată, putând fi observate la controalele de rutină de la începutul și sfârșitul lucrului și, ca urmare, se puteau lua măsuri de înlocuire; firele individuale erau identice din punct de vedere al formei, erau produse din același material, în aceleași condiții de producție, aveau același diametru și conform structurii erau toate paralele; toate firele puteau fi inspectate de la exterior, iar dacă se constatau probleme, firele individuale deteriorate se înlocuiau.

Această ultimă caracteristică, ce dădea posibilitatea de inspectare a tuturor firelor componente ale cablului, este unică modelului propus de Wilhelm Augustus Julius Albert. În plus, inginerul Albert a fost un pionier al testării cablurilor prin faptul că a prezentat în detaliu într-o lucrare de specialitate structura primului cablu, procesul de producție și primele testări ale cablului. Lucrarea publicată la acea vreme într-un jurnal de lucrări miniere, a fost extrem de utilă diseminării la nivel mondial a informațiilor despre apariția și avantajele cablurilor de

sârmă. Tot el a efectuat primele teste asupra cablurilor pentru a determina oboseala la încovoiere. Caracteristicile prezentate mai sus au dus la răspândirea rapidă în Europa și în America de Nord a cablurilor din sârmă [11].

Următoarele dezvoltări în structura cablurilor au presupus apariția cablurilor metalice cu rezistență mai ridicată la rupere și cu flexibilitate mai ridicată decât modelul lui Albert. Aceste cabluri erau compuse din 6 fire înfășurate în jurul unui fir central, toate având diametrul identic (Figura 1.4a). Dezavantajele inerente al acestei structuri sunt faptul că nu a mai fost posibilă inspectarea tuturor firelor din componența cablului metalic, firul central fiind complet izolat, iar firele din cabluri au început să aibă lungimi diferite și grosimi diferite datorită dispunerii lor în spirală în structura cablului.

Evoluția a continuat cu dispunerea în mai multe straturi a firelor. Astfel, în jurul unui strat interior de 7 fire, a fost înfășurat un strat exterior de 12 fire cu același diametru (Figura 1.4b). Pentru a avea o încărcare uniformă a tuturor elementelor cablului, firele din componența stratului exterior trebuiau să aibă exact aceeași lungime ca și cele din componența stratului interior, acest lucru se întâmpla doar dacă firele aparținând celor două straturi erau înfășurate la același unghi față de firul central. Tehnologia de producție, fiind deficitară, a dus la foarte multe suprapuneri de fire în cadrul cablurilor produse, care la rândul său a fost urmată de cedarea prematură a firelor datorită apariției forțelor locale destul de mari.

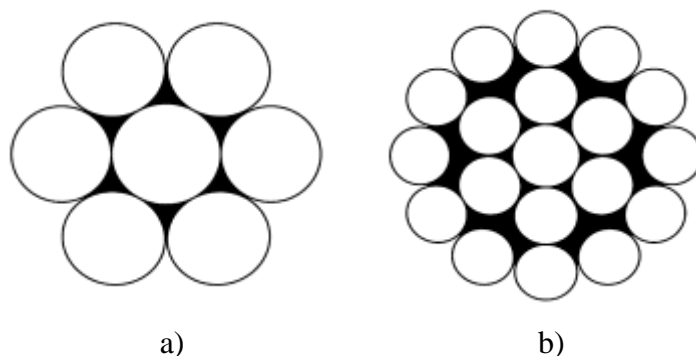


Figura 1.4 Structura cablurilor metalice [10]: a) cu un strat (7 fire). b) cu două straturi.

În jurul anului 1884, inginerul american Tom Seale a dezvoltat primul cablu metalic cu dispunere paralelă a firelor. Cablurile cu această structură au fost folosite pentru transportul vagonetelor pe cabluri din San Francisco. Sistemul de tracțiune pe cabluri este încă în uz în San Francisco. Acesta presupune un sistem de cabluri subterane, care sunt în permanentă mișcare, la care se cuplează sau de la care se decuplează vagoanele. Din [12] rezultă că problema cu care se confrunta compania condusă de Seale era siguranța în exploatare scăzută a cablurilor, care se rupeau des și comportau costuri ridicate de reparație. După un studiu al structurii interne a cablurilor existente Seale a testat mai multe structuri construite manual de către el și, după mai multe eșecuri, a ajuns la o structură din două straturi având același număr de fire, iar firele din stratul interior având un diametru de aproximativ $\frac{1}{2}$ față de diametrul firelor stratului exterior. Pentru a evita încrucișarea firelor celor două straturi, firele erau dispuse în paralel, iar firele mari din stratul extern se așezau astfel pe o suprafață destul de netedă formată de suprafața firelor subțiri din care era compus stratul intern. Structura cablului este ilustrată în Figura 1.5.

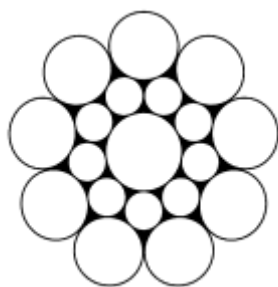


Figura 1.5 Structura cablului metalic dezvoltat de Seale, redesenat din [10].

Tom Seale a patentat cablul inventat de el și mai multe patente pentru invenția lui au fost cumpărate de producători. Cei care nu au avut licență au încercat dezvoltarea altor structuri pentru a evita costurile cu patentul lui Seale. Astfel, după câțiva ani, inginerul american James Stone a propus o altă structură pentru un cablu mai ușor de produs, acesta fiind compus din fire metalice cu același diametru și aducea un element de noutate: firele de umplutură sau de aport. Cablul metalic era compus din 19 fire cu diametru egal, dispuse în două straturi, iar între straturi erau dispuse fire de aport cu diametru mult mai mic. Acest tip de cablu este probabil cel mai utilizat până în zilele noastre. În Figura 1.6a este prezentată structura internă a cablului Filler, reprodusă din [13].

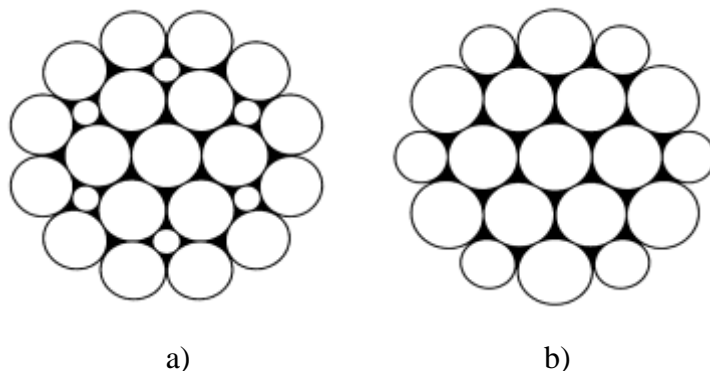


Figura 1.6 a) Structura cablului Filler. b) Structura cablului Warrington [13].

Următorul pas în dezvoltarea cablurilor metalice a fost adus de apariția oțelului de înaltă rezistență, care, deși permitea construirea de cabluri cu o capacitate portantă mult mai ridicată, crea mari probleme în ceea ce privește torsadarea din cauza rigidității crescute a oțelului. Astfel, s-au pus bazele unei tehnici numite preformarea cablurilor cu fire din oțel. Tehnica presupune utilizarea unui echipament de presare care, înainte ca firele individuale să fie dispuse în formă torsadată în cablul final, spiralează firele individual pentru a le conferi forma elicoidală permanentă în timpul construcției cablului torsadat. Principalele avantaje ale utilizării acestei tehnici sunt reducerea tensiunilor interne din cablu, acest lucru făcând mai facilă manipularea, instalarea și așezarea pe rolele de ghidaj a cablurilor, crearea unei distribuții uniforme a eforturilor în cablu pe toroane și pe fire individuale ceea ce conferă o viață mai lungă cablurilor, o rezistență mai bună la uzură și la încărcări dinamice, facilitând tendința cablurilor de a-și păstra forma inițială și când sunt torsionate [14].

Următorul progres în dezvoltarea cablurilor a fost legat de producția de fire cu alte secțiuni decât secțiunea clasică circulară. Principiul din spatele noilor secțiuni a apărut în

urma studierii modurilor în care cablurile metalice se uzează și ajung să se deterioreze la un așa nivel încât să cedeze. Uzura suprafeței cablului presupune aplatizarea secțiunii firelor dispuse la exteriorul cablului și reducerea secțiunii. Astfel, s-au dezvoltat forme ale firelor cu suprafețe aplatizate, dispuse spre exteriorul toroanelor, precum cele prezentate în Figura 1.7.

Următorul punct de cotitură în producția cablurilor a fost apariția în jurul anilor 1960-1970 a cablurilor cu strat intermediar din plastic. Prima fază a presupus un simplu procedeu de îmbrăcare a cablului metalic final cu un strat din material plastic care să protejeze împotriva coroziunii și împotriva altor factori de uzură prezenți în medii agresive. Dezavantajul inerent al acestei prelucrări este faptul că nu mai pot fi detectate firele rupte prin inspectarea vizuală a cablului și nu se mai respectă astfel normativele internaționale care specifică faptul că un anumit tip de cablu trebuie înlocuit dacă se depășește numărul critic de fire rupte. Totuși, faza a doua a protejării cablurilor a dus doar la izolarea toronului central în cablurile compuse, obținându-se astfel protecția inimii împotriva coroziunii. Cablurile construite utilizând acest model sunt cabluri cu strat intermediar, iar avantajele suplimentare ale utilizării unor astfel de cabluri constau în stabilitate structurală mai ridicată la nivelul întregului cablu, reducerea presiunilor interne și a abraziunii dintre inimă și toroanele cu care ar fi avut contact direct și o protecție ridicată împotriva rupturilor interne ale firelor componente ale toroanelor [10].

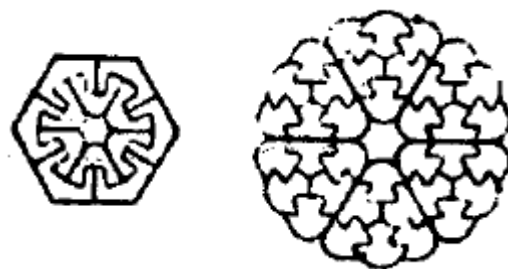


Figura 1.7 Exemple de cabluri cu fire aplatizate.

Tendențele viitoare de dezvoltare în structura cablurilor sunt legate de înlocuirea în multe domenii de utilizare a cablurilor metalice cu cabluri compuse din fibre cu rezistență foarte ridicată la tracțiune. Principalele avantaje ale acestor noi tipuri de cabluri implică rezistența ridicată la uzură și oboseală, eliminarea apariției coroziunii și reducerea greutateii cu menținerea, sau chiar cu îmbunătățirea condițiilor de rezistență.

Totuși, cablurile metalice beneficiază de un set propriu de avantaje care le recomandă pentru utilizarea în multe domenii de activitate. Aceste avantaje sunt rezistența la abraziune și la șocuri de natură mecanică mai ridicate decât la cablurile compuse din fibre, modulul de elasticitate mai ridicat, rezistența la uzură cauzată de expunerea la razele ultraviolete și apariția mai clară a urmelor de degradare, cel puțin la suprafața cablului.

1.6 Clasificarea cablurilor metalice

Organizația Internațională pentru Standardizare – ISO este implicată de mai bine de 40 de ani în dezvoltarea de standarde pentru cabluri. România este afiliată la ISO prin intermediul comitetelor locale, alături de țări din Europa de vest precum Germania sau Franța,

dar și de țări din Asia cum sunt India, sau Japonia. Conform [15] și [16] clasificarea cablurilor se poate face după mai multe criterii. Cele mai importante criterii de clasificare sunt:

1. Forma secțiunii firelor;
2. Numărul de toroane;
3. Forma secțiunii toroanelor;
4. Numărul de straturi;
5. Tipul inimii;
6. Felul, direcția și pasul înfășurării;
7. Tipul/calitatea materialului din compoziția firelor/ toroanelor.

Conform standardului ISO2532:1974 [15], în funcție de forma secțiunii firelor, cablurile pot fi împărțite în următoarele categorii:

1. Cu formă rotundă;
2. Cu formă în Z;
3. Cu forma trapezoidală;
4. Cu formă de I sau X, semi-blocată sau de tip șină;
5. Cu alte forme.

În funcție de numărul de toroane, există cabluri compuse dintr-un singur toron, cum sunt cele din Figura 1.4a, sau cu 2, 3 (Figura 1.3), 4, 6, 7, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 23, 35, 36, sau 40 de toroane, dar în mod constant laboratoarele de cercetare dezvoltă cabluri cu diferite numere de toroane pentru aplicații speciale. În Figura 1.8 sunt prezentate exemple de cabluri cu 4 (a), 13 (b), 14 (c), 15 (d), 19 (e), 23 (f), 35 (g) și 40 (h) de toroane.

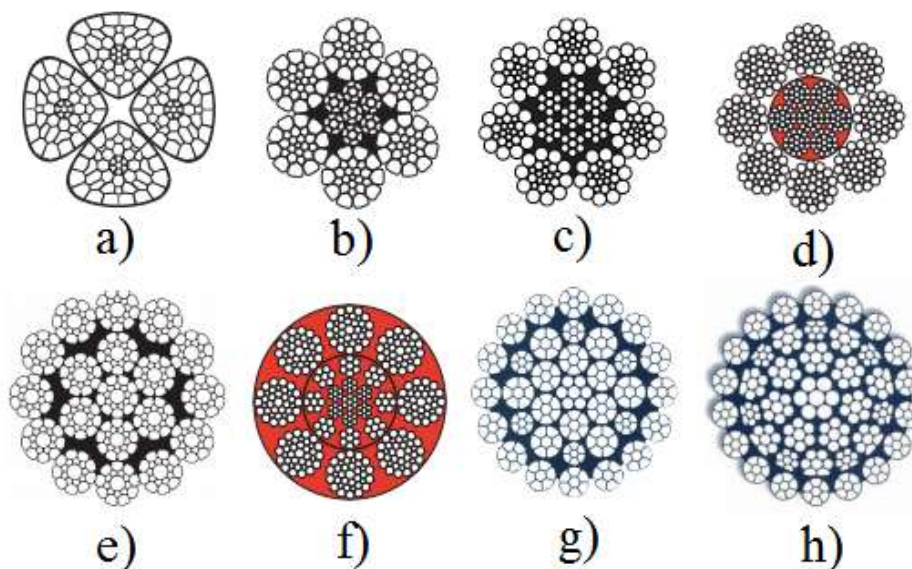


Figura 1.8 Structuri de cabluri cu mai multe toroane, adaptare după [13] și [17].

Conform standardului ISO17893:2004 [18], în funcție de forma secțiunii toroanelor, cablurile pot fi clasificate astfel:

1. Secțiune rotundă (Figura 1.9a);
2. Secțiune triunghiulară (Figura 1.9b);
3. Secțiune ovală (Figura 1.9c);
4. Secțiune dreptunghiulară sau de formă paralelogram (Figura 1.9d).

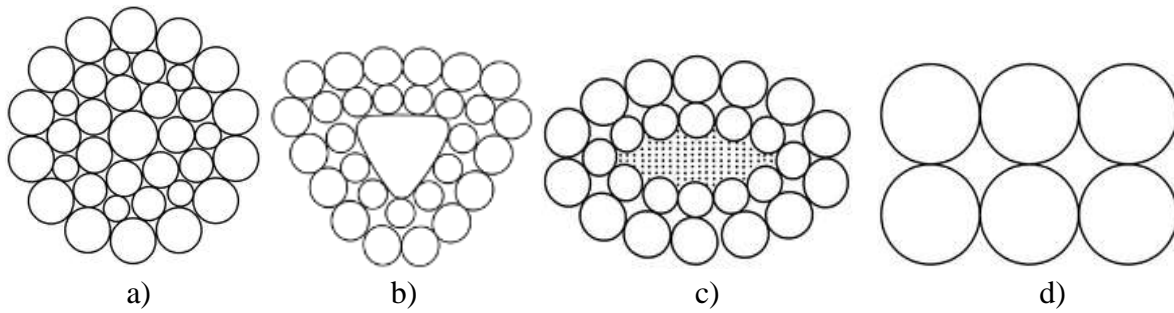


Figura 1.9 a) secțiune rotundă. b) secțiune triunghiulară. c) secțiune ovală. d) secțiune dreptunghiulară, adaptare după [18].

Conform standardului ISO2532:1974 [15], clasificarea cablurilor în funcție de numărul de straturi componente se face astfel:

1. Cabluri cu un singur strat,
 - 1.1. Cu 7 fire (Figura 1.4a).
2. Cabluri cu două straturi,
 - 2.1. Seale (Figura 1.5).
 - 2.2. Filler (Figura 1.6a).
 - 2.3. Warrington (Figura 1.6b).
3. Cabluri cu straturi multiple.
 - 3.1. Cabluri cu structură combinată, de ex. de tip Warrington–Seale, Seale–Filler, sau Seale–Warrington–Seale (Figura 1.10).

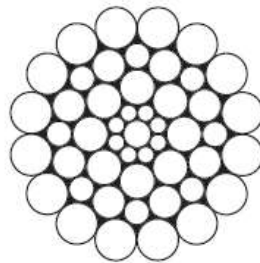


Figura 1.10 Structura de tip: 49 Seale–Warrington–Seale [1-8-8-(8+8)-16], reprodusă din [17].

În funcție de tipul de inimă folosită în structură, conform standardului ISO4345:1988 [19], cablurile pot fi cu inimă:

1. Compusă dintr-un fir metalic;
2. Compusă din fibre
 - 2.1. de polipropilenă;
 - 2.2. vegetale, sau de tip FC (Fiber Core), construite din fibre de sisal, manila, cânepă, iută, bumbac pescăresc etc.;
3. Formată dintr-un cablu independent (cablul este la rândul său format din toroane și inimă proprie) sau de tip IWRC (Independent Wire Rope Core) [20];

4. Compusă dintr-un singur toron de fire sau de tip WSC (Wire Strand Core).

În funcție de direcția firelor componente și de pasul de cablaj, conform [ISO17893, 2004], cablurile pot fi cu firele individuale înfășurate spre dreapta (Z) sau spre stânga (S) în toron, sau din toroane înfășurate spre dreapta sau spre stânga, după cum urmează:

1. Pas de cablaj regulat la dreapta – tip sZ (right hand regular lay) (Figura 1.11a);
2. Pas de cablaj regulat la stânga – tip zS (left hand regular lay) (Figura 1.11b);
3. Pas de cablaj de tip LANG la dreapta – tip zZ (Figura 1.11c);
4. Pas de cablaj de tip LANG la stânga – tip sS (Figura 1.11d);
5. Pas de cablaj alternant (combinație de un toron de tip LANG și unul de tip regulat) (Figura 1.11e);
6. Pas de cablaj alternant special (combinație de două toroane LANG și unul regulat) (Figura 1.11f).

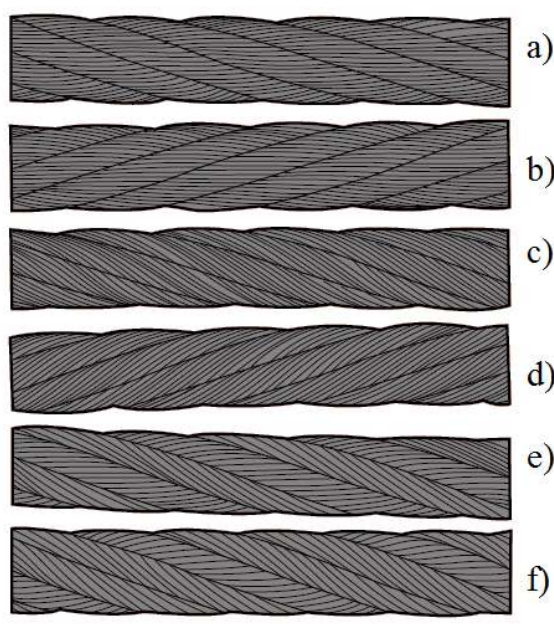


Figura 1.11 Clasificarea cablurilor în funcție de pasul și sensul de cablaj.

Conform standardului ISO2408:2004 [20], din punct de vedere al tipului de material folosit, al calității și al finisajului firelor din componența cablului, acesta se clasifică astfel:

1. Din oțel de înaltă rezistență;
2. Din oțel de înaltă rezistență, galvanizat;
3. Din oțel de înaltă rezistență de tip extra;
4. Din oțel de înaltă rezistență de tip extra, galvanizat;

1.7 Degradările cablurilor

Cablurile metalice fabricate respectând recomandările tehnice în vigoare, supuse operațiilor de întreținere cu periodicitatea recomandată de fabricant, pot beneficia de o durată de funcționare lungă în condiții de siguranță, ajungând să parcurgă un proces de îmbătrânire constantă și, în cele din urmă, să fie înlocuite corespunzător.

Cronologia duratei de viață a unui cablu prezentată mai sus este cea ideală și, în cele mai multe cazuri, se întâmplă ca din cauza abraziunilor, coroziunii sau a altor efecte de natură mecanică sau structurală, cablurile să se deterioreze și să se uzeze prematur, fiind necesară înlocuirea lor. Pentru cablurile utilizate la tracțiune, de cele mai multe ori componentele din structura sistemului de transport, de ghidaj sau de depozitare a cablului sunt cele responsabile pentru deteriorările ce apar. Deteriorările la nivelul cablurilor pot fi locale, afectând anumite părți componente ale cablurilor, sau pot fi degradări care duc la colapsul cablului prin ruperea acestuia [16].

1.7.1 Deteriorări locale

Cele mai întâlnite degradări/deteriorări locale ale cablurilor metalice sunt:

1. Coroziunea cablului la nivel:
 - 1.1. Intern (Figura 1.12a),
 - 1.2. Extern (Figura 1.12b).
2. Abraziunea cablului la nivel:
 - 2.1. Intern (Figura 1.12a),
 - 2.2. Extern (Figura 1.13).
3. Fire individuale rupte (Figura 1.14 și Figura 1.15);
4. Uzura la nivelul firelor individuale:
 - 4.1. Prin reducerea secțiunii firului (Figura 1.16a),
 - 4.2. Prin deformarea metalului și, ca urmare, a secțiunii firului (Figura 1.16b).
5. Reducerea secțiunii totale a cablului, în special în zona periferică (Figura 1.17);
6. Rupturi totale la nivelul toroanelor:
 - 6.1. La nivelul interfeței dintre toroanele exterioare și inimă (Figura 1.18),
 - 6.2. La nivelul unuia sau mai multor toroane exterioare (Figura 1.19),
 - 6.3. La nivelul inimii (Figura 1.20 și Figura 1.21).
7. Deformații ale cablului:
 - 7.1. Locale cu deformare redusă (Figura 1.22),
 - 7.2. Tip „colivie” (Figura 1.23).
8. Ieșirea în exterior a inimii, între celelalte toroane, de obicei la inimi de tip FC sau IWRC (Figura 1.24).



Figura 1.12 a) Exemplu de coroziune internă a cablului în secțiune. b) Coroziune externă.



Figura 1.13 Exemplu de abraziune externă.

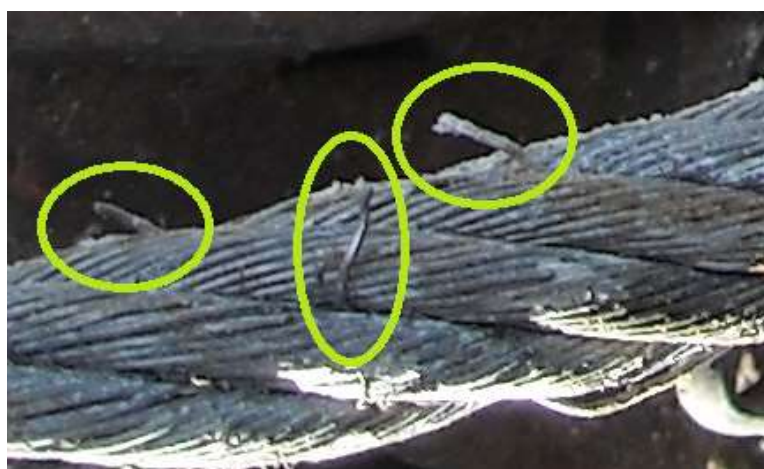


Figura 1.14 Exemplu de fire individuale rupte.

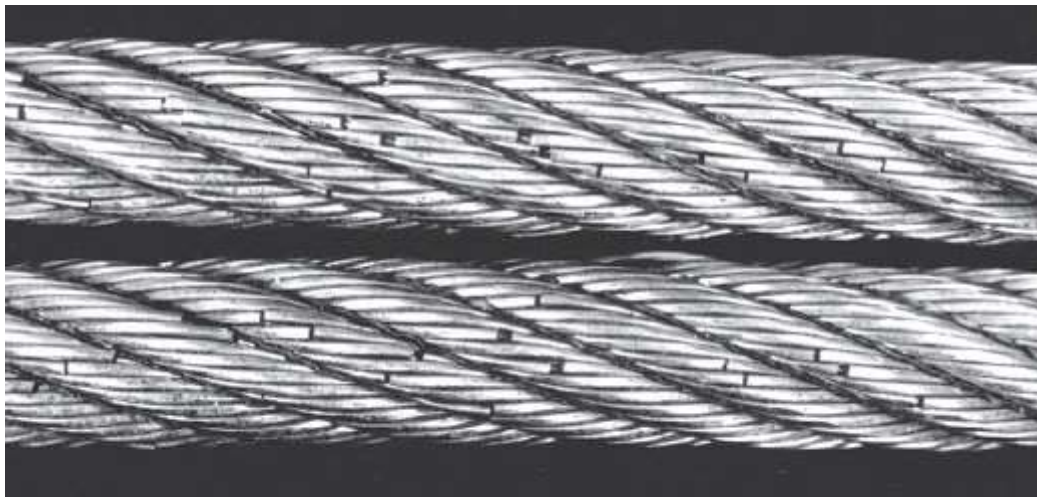


Figura 1.15 Exemplu de fire individuale rupte datorită oboselii, reprodus din [21].

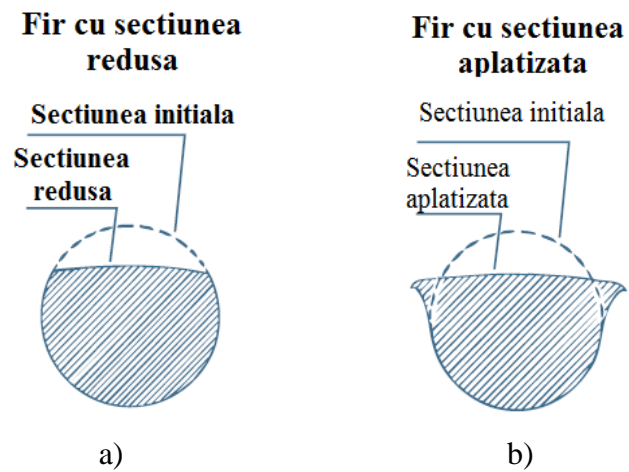


Figura 1.16 a) Reducerea secțiunii firului. b) Modificarea secțiunii firului prin deformare.

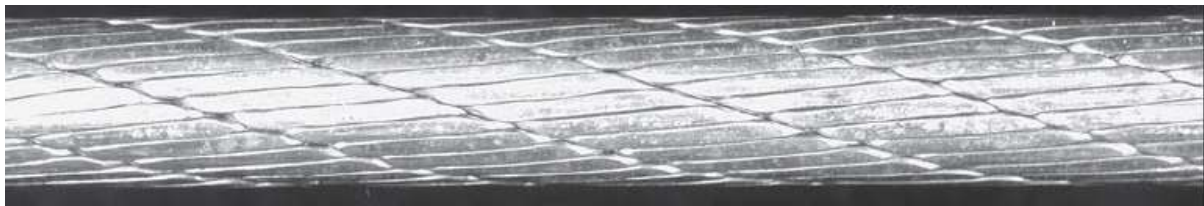


Figura 1.17 Exemplu de uzură cu reducerea secțiunii cablului.



Figura 1.18 Exemplu de toron rupt la interfața cu inima.



Figura 1.19 Exemplu de ruptură la nivelul unui toron extern.



Figura 1.20 Exemplu toron-inimă rupt și toroane exterioare intacte, reprodus din [22].



Figura 1.21 Exemplu de cedare a unui toron de tip inimă.



Figura 1.22 Exemplu de deformare locala a cablului, reprodus din [17].



Figura 1.23 Exemplu de deformare a cablului de tip colivie, reprodus din [17].



Figura 1.24 Cablu cu inima ieșită spre exterior, reprodus din [8].

1.7.2 Cedare totală

Degradările locale la nivelul cablurilor metalice, în marea lor majoritate, sunt foarte periculoase pentru siguranța structurală. În situațiile în care cablurile nu beneficiază de sisteme de monitorizare permanente sau periodice, sau când inspecțiile vizuale sau de altă natură a stării cablurilor sunt efectuate la intervale prea îndelungate, poate apărea fenomenul nedorit de cedare totală a cablului. Cedarea totală presupune ruperea tuturor firelor și toroanelor componente ale acestuia și echivalează cu dispariția elementului structural pe care îl echivala cablul. În cazul în care cablul era de tip portant, colapsul lui conduce la colapsul structurii din care acesta face parte [10]. Un exemplu de degradare locală, care în 4 faze produce cedarea totală a cablului, este prezentat astfel: în prima fază apar deformații locale reduse; faza a doua constă în apariția unor fire individuale rupte în urma uzurii premature cauzate de deformațiile locale și având ca efect direct diminuarea rezistenței cablului; faza a treia este înmulțirea rapidă a numărului de fire rupte urmată de faza a patra, cea a cedării totale a cablului.

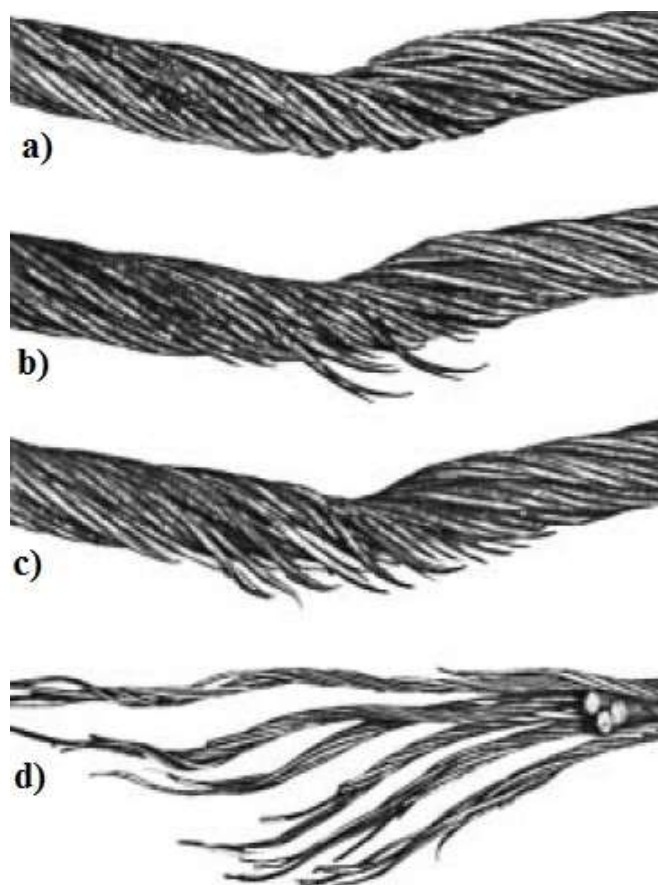


Figura 1.25 Fazele premergătoare și cedarea totală a unui cablu, reprodus din [23].

1.8 Surse generatoare ale deteriorărilor și degradărilor cablurilor

Exercițiul determinării surselor de degradare și de deteriorare a stării cablurilor presupune identificarea lor pornind de la degradările și deteriorările constatate la cablurile studiate în literatura de specialitate și prezentate în subcapitolul 1.7.

Coroziunea firelor și a cablului

Coroziunea este fenomenul de oxidare a materialului din componența firelor cablului în contact cu umezeala, săruri, acizi în prezența oxigenului. În ceea ce privește apariția coroziunii la nivel extern, în cele mai multe cazuri sursa este strâns legată de mediul în care operează cablul metalic (Figura 1.12). Majoritatea mediilor în care pot fi utilizate cablurile metalice provoacă un anumit nivel de coroziune și este destul de dificil de prevăzut cât de avansată este degradarea cablului. Din [24] rezultă că fenomenul de coroziune apare datorită prezenței în mediul cablului a substanțelor precum sărurile, acizii sau apa în diferite stări de agregare. Acestea duc la apariția unor reacții chimice cu materialul din care este construit cablul. Substanțele chimice care apar la suprafața sau în interiorul cablurilor în urma coroziunii sunt oxizii care acționează sub forma unor particule mici abrazive ducând la uzura firelor cablului și în final la ruperea lor [25].

Coroziunea internă apare în cazul cablurilor care sunt supuse răsucirilor repetate sau altor forțe de torsiune permițând astfel pătrunderea în interior a substanțelor corozive. Conform [26] coroziunea internă este, pe de-o parte mai periculoasă pentru integritatea structurală a cablului decât cea externă și, pe de altă parte mai dificil de detectat. Coroziunea are efecte mult mai accelerate asupra cablurilor metalice având în vedere că suprafața expusă la coroziune este de aproximativ 16 ori mai mare decât suprafața unei bare metalice având diametrul egal cu cel al cablului [27].

Abraziunea la nivelul cablului

Abraziunea este fenomenul de uzură a cablului în urma frecării firelor/toroanelor componente, unele de celelalte sau de elemente externe. Una dintre cauzele des întâlnite ale abraziunii interne a cablurilor (ilustrate în Figura 1.12a) este tocmai apariția coroziunii în interiorul cablului, particulele rezultate în urma reacțiilor de oxidare devenind niște mici elemente de șlefuire.

În medii cu multe particule în atmosferă, cum este mineritul, în timpul utilizării și mișcării cablurilor sunt antrenate în structura internă a cablului particule de nisip, sau fragmente mici de rocă care produc și accelerează abraziunea internă dar și cea externă [23]. O altă sursă de abraziune internă este numărul de fire din cadrul toroanelor. Cablurile care au rezistență mai ridicată la fenomenul de oboseală sunt de obicei compuse la exterior dintr-un număr mai mare de toroane cu diametru mai mic care, în timpul utilizării, vor avea o frecare mai ridicată la suprafața de contact cu firele din interiorul cablului. Rezultatul este o abraziune internă mai ridicată [28], [17]

Abraziunea externă, având un exemplu prezentat în Figura 1.13, apare în special la cablurile de transport din cauza contactului suprafeței exterioare a cablului cu sistemul complicat de ghidaj format din rolele de ghidaj și, în timpul operațiilor de stocare/înfășurare a cablurilor pe tamburi, abraziunea prin contactul cu spirele bobinate adiacente.

Conform [23], în cazul sistemelor de ridicare a sarcinilor bazate pe cabluri în industria minieră, uzura prin abraziune apare din cauza contactului exterior dintre cabluri și flanșele scripetilor în cazul unor unghiuri de atac mai ascuțite.

Alte cauze ale abraziunii externe sunt utilizarea cablurilor în suprasarcină față de specificațiile producătorului, sau greșeli în operațiunile de înfășurare pe tamburi în vederea stocării [29].

Fire individuale rupte

Firele individuale rupte sunt una dintre cele mai întâlnite deteriorări la nivelul cablurilor și numărul de fire individuale rupte sunt un indice important în decizia de înlocuire a unui cablu. Firele rupte apar cel mai adesea la suprafața exterioară a cablurilor și pot fi observate în timpul inspecțiilor vizuale. Totuși, există o categorie aparte de fire rupte „în rosturi” și care sunt fire rupte interne, între toroane, și care uneori străpung printre firele și toroanele intacte spre exteriorul sau spre interiorul cablului [18].

Principalele cauze ale ruperii firelor sunt:

1. diminuarea secțiunii firelor prin uzură (Figura 1.26a),

2. supunerea cablurilor la eforturi de întindere care depășesc limita de rezistență a cablurilor (Figura 1.26b),
3. oboseala materialului supus la cicluri repetate de încovoiere (Figura 1.26c),
4. influența coroziunii asupra elasticității materialului (Figura 1.26d),
5. uzura plastică a firelor (Figura 1.26e),
6. prezența în exces a martensitei în aliajul firului (Figura 1.26f),
7. forfecarea prin contact cu suprafețe ascuțite (Figura 1.26g),
8. deplasarea cablurilor de transport, în timpul unor încărcări ridicate, pe role cu dimensiuni ale canelurii nepotrivite diametrului cablului.

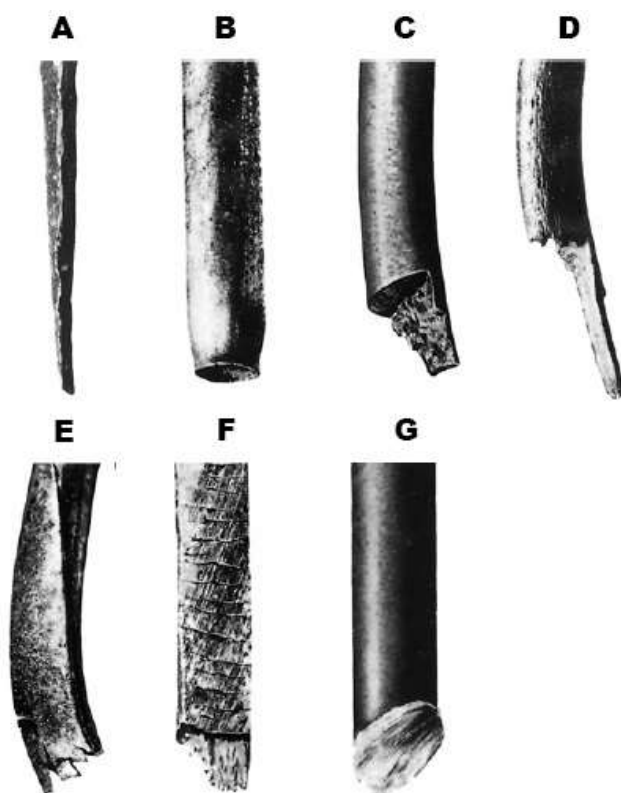


Figura 1.26 Fire individuale rupte, preluat din [30].

Reducerea secțiunii cablului

În urma folosirii îndelungate a cablurilor sau în urma folosirii acestora în condiții precare apare reducerea secțiunii cablului prin uzuri locale cauzate de abraziunea cu suprafețele de suport (Figura 1.17).

Rupturi ale toroanelor

Cauza rupturilor la nivelul toroanelor de la interfața cu inima, este pierderea suportului oferit de inimă. Inima cablului este elementul structural pe care se construiește întreaga structură a cablului. În momentul cedării inimii dispare suportul pentru celelalte toroane și rezistența cablului se diminuează datorită dispunerii tangențiale a toroanelor intacte. În urma dispunerii tangențiale apare fenomenul de sprijinire a toroanelor unul pe celălalt și efectul

acestui fenomen este faptul că firele toroanelor se întrepătrund și blochează mișcarea toroanelor în cadrul cablului. Conform [31], din cauza acestui fenomen vor apărea ruperi ale firelor în punctele de tangență ale toroanelor, din cauza obosirii acestora. Aceste fire rupte sunt în rosturi, adică în spațiile dintre toroanele exterioare, precum este ilustrat în Figura 1.27.

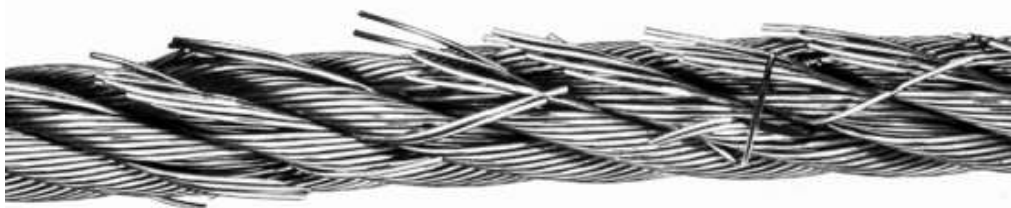


Figura 1.27 Caz de fire rupte în rosturi, reprodus din [32].

Ruperea unuia sau mai multor toroane exterioare este cauzată de începerea apariției firelor individuale rupte la nivelul toroanelor externe. Apariția firelor rupte duce în condiții de sarcină la înmulțirea firelor rupte și, ulterior, la cedarea toronului afectat. Procesul are un efect de cascadă, deoarece, dacă toronul extern cedat nu este observat, rezistența cablului fiind diminuată, vor apărea cedări la nivelul altor fire ale toroanelor exterioare și ulterior toroanele vor ceda [33].

În ceea ce privește cedarea toronului de inimă, cel mai des a celui de tip IWRC, principala cauză este supunerea cablului la eforturi de tracțiune variabile, de tip impuls. Astfel, firele exterioare ale toronului de tip inimă sunt forțate în mod continuu să pătrundă în văile dintre firele aparținând toroanelor externe, iar apoi să fie eliberate dintre acestea. Din [32] și [34] rezultă că procesul acesta este repetitiv și cauzează tensiuni de încovoiere secundare care conduc la apariția firelor rupte la nivelul inimii cablului. Ca rezultat final, inima se dezintegrează complet în bucăți de câteva zeci de centimetri.

Deformațiile cablului

Cele mai des întâlnite deformații ale cablului sunt cele locale reduse, precum cea din Figura 1.22. Una dintre cele mai dese cauze ale apariției acestui tip de deformație este manipularea, operarea sau instalarea incorectă a cablurilor metalice. Primul pas în apariția deformației este apariția unei tensiuni de răsucire în cablu, care va conduce la formarea unei bucle. Strângerea cablului prin tragere produce reducerea diametrului buclei și apariția unui nod. La apariția nodului deformația este deja instalată și, în cele mai multe cazuri, este permanentă [17].

Conform normelor ASME B30 [35], un cablu care manifestă astfel de deformații trebuie înlocuit pentru că prezintă un pericol ridicat în exploatare. Deformația permanentă apărută la nivelul firelor exterioare are forma unui cot și, de fiecare dată când în timpul funcționării încărcarea cablului variază, firele cotate se îndreaptă parțial după care își revin forma cotate. În urma unor astfel de cicluri repetitive de îndoire în același punct, firele se vor rupe din cauza oboselii și vor crea spații între ele în cadrul toroanelor care vor permite umezelii și altor factori de mediu să pătrundă în interiorul cablului, cauzând coroziune [23]. Efectele coroziunii vor conduce în mod accelerat la cedarea cablului, acesta trecând prin fazele prezentate în Figura 1.25.

Deformațiile de tip „colivie” întâlnite la cabluri, precum cea din Figura 1.23, au două cauze principale. Prima cauză ține de neechilibrarea forțelor de torsiune. Astfel, în situațiile în care cablul este răsucit în jurul axei sale, va avea tendința să se scurteze pe o parte, iar pe partea diametral opusă să se alungească. În structura internă răsucirea va determina ca, pe o parte toroanele de la exterior să se alungească, iar pe partea diametral opusă toroanele de la interior să se alungească, determinând efectul de împingere spre exteriorul cablului sub forma unei „colivii”.

A doua cauză este situația în care un cablu este tensionat în sarcină și se eliberează brusc sarcina, producându-se o destindere imediată a cablului. Această destindere are ca efect pătrunderea toroanelor din stratul/straturile interioare ale cablului spre exterior, printre toroanele din stratul de la exteriorul cablului.

În cazul cablurilor de tracțiune, apariția deformațiilor de tip colivie este în majoritatea cazurilor determinată de rolele pentru cabluri, cu diametre nepotrivite diametrului cablului pe care-l ghidează, sau de role cu defecțiuni la rulmenți, care sunt blocate sau care funcționează încetinit sau frânat. Astfel, cablurile sunt supuse unor răsuciri inadecvate, sau are loc producerea martensitei pe suprafața firelor [36].

Ieșirea inimii în exteriorul cablului

Ieșirea spre exterior a toronului de inimă de tip FC sau IWRC are ca principală cauză dispariția echilibrului de torsiune. De cele mai multe ori, fenomenul apare în cazul în care au loc încărcări de tip șoc ale cablului. Alte situații care produc această deteriorare sunt legate de dimensionarea greșită a diametrului cablului în raport cu celelalte componente ale sistemului bazat pe cabluri, sau aplicarea de tehnici de instalare greșite ale cablului. De exemplu, în cazul cablurilor cu un număr mare de fire și toroane, care se utilizează în componența sistemelor de transport pe cabluri, dacă direcția de torsadare a cablului nu corespunde canelurii rolelor de ghidaj, apare fenomenul de rulare spiralată a cablului (în locul celui de glisare pe rolă) care produce ieșirea inimii spre exterior [37].

1.9 Monitorizarea nedistructivă a cablurilor

În conformitate cu [38], din punct de vedere nedistructiv, monitorizarea vizuală a cablurilor este cea mai des utilizată, chiar dacă ea se bazează în mod considerabil pe subiectivitatea expertului uman. În cazul monitorizării vizuale a cablurilor din componența construcțiilor civile, există de cele mai multe ori obstacole în accesul la toate cablurile din componența sistemului structural. În ceea ce privește monitorizarea vizuală a cablurilor din componența sistemelor de transport pe cablu, categoria cablurilor tractoare este mai facilă de inspectat și tehnicile propuse în [39], [40] și [41] nu necesită prezența expertului uman în apropierea cablului, datorită sistemelor fixe de camere foto digitale pentru achiziția imaginilor, a sistemului de transmisie a datelor la distanță și datorită componentelor aplicației software de inferență a prezenței și gravității degradărilor.

Totuși, în ceea ce privește monitorizarea cablurilor fixe, de suport, sau a cablurilor portante din componență podurilor, este necesară utilizarea unor dispozitive mobile, a unor roboți precum cel prezentat în [42]. Principalul neajuns al monitorizării vizuale este

imposibilitatea examinării firelor și a părților din toroane care nu se află la suprafață. Acestea pot fi firele și toroanele interne ale cablului sau pot fi cele de la exterior mascate de prezența lubrifianților, vaselinei, sau a mizeriilor depuse pe cablu (ex. praf, noroi, resturi vegetale).

La nivelul International Society for Standardization (ISO), a cărei membră este și România, sunt în vigoare o serie de standarde, precum ISO4309:2010 [43], care specifică criteriile de înlocuire a cablurilor cu un singur strat în cazul detecției prin inspecție vizuală a deteriorărilor manifestate prin fire rupte. Tot în [43] sunt prevăzute criteriile de înlocuire a cablurilor la care s-a detectat diminuarea secțiunii cablului.

În S.U.A., în cazul instalațiilor de ridicare cu cabluri, grupul de standarde ale ASME (American Society of Mechanical Engineers) [35] specifică atât criteriile conform cărora se efectuează monitorizarea nedistructivă a cablurilor, cât și condițiile minimale de degradare care necesită scoaterea din uz a cablului afectat.

Un standard similar, referitor la monitorizarea și criteriile de înlocuire a cablurilor utilizate pentru transportul persoanelor și sarcinilor în industria minieră din Africa de Sud, este prezentat în [33].

Tehnicile de monitorizare vizuală sunt dezvoltate și automatizate în ultimii ani prin utilizarea de echipamente digitale de achiziție a imaginilor suprafețelor exterioare ale cablurilor și procesarea imaginilor cu ajutorul aplicațiilor bazate pe procesarea imaginilor și recunoașterea formelor, precum este experimentul prezentat în [44].

A doua categorie de metode folosite predominant în monitorizarea nedistructivă a cablurilor sunt cele bazate pe detecția scurgerilor de flux magnetic (MFL – Magnetic Flux Leakage) [45]. Prin aplicarea acestor metode se pot determina, în principal, două clase de degradări: defectele locale (LF – Local Faults), cum sunt firele rupte, și reducerea secțiunii cablului (LMA – Loss of Metallic Cross-Sectional Area). În plus, cu ajutorul senzorilor magnetici se pot măsura eforturile de întindere din cabluri.

În ceea ce privește standardizarea, în [46] se prezintă principiile monitorizării magnetice a cablurilor, aplicabilitatea acestora, echipamentele, procedurile, standardele de calibrare, criteriile de înlocuire etc., la nivelul S.U.A.

La nivelul țărilor membre ale Uniunii Europene, este în vigoare normele europene EN 12927-7 și EN 12927-8, care specifică condițiile și metodele de efectuare a monitorizării magnetice a cablurilor [47], [48].

Inspecția cablurilor prin metode electromagnetice este descrisă în detaliu și în standardul ISO 4309:2010 [43], unde este recomandată efectuarea unei monitorizării magnetice la structurile nou construite de îndată ce este tehnic posibil. Această monitorizare inițială va fi folosită ca punct de referință pentru viitoarele inspecții ale cablului, prin metode bazate pe fluxul magnetic.

Din punct de vedere al metodelor de monitorizare a cablurilor prin electromagnetism, în [49] se prezintă detaliile procesului de identificare, înregistrare și evaluare a evoluției degradărilor, cum sunt: degradările de la suprafață (coroziune, abraziune locală), defectele geometrice (reducerea diametrului cablului, modificări la nivelul torsadării), degradările sau defectele interne (coroziune, fire slăbite, fire rupte, fire deformate), sau degradările apărute la nivelul zonelor de ancorare a cablurilor.

În [50] se prezintă o metodă hibridă de detecție a deteriorărilor ce apar la cablurile cu fire paralele utilizate în structura podurilor suspendate pe cabluri.

1.10 Conținutul tezei

În următoarele paragrafe este descris pe scurt conținutul fiecărui capitol din cele 7 capitole componente ale tezei:

Capitolul 1

În cadrul primului capitol sunt definite în primul rând scopul și obiectivele cercetării apoi sunt definite comparativ conceptele de monitorizare nedistructivă și de monitorizare distructivă din punct de vedere al avantajelor și dezavantajelor. Totodată se furnizează o introducere în axiomele fundamentale ale monitorizării structurale ale unui sistem structural.

Capitolul continuă cu o clasificare a structurilor cu cabluri care pot beneficia de monitorizare nedistructivă. Pentru o descriere clară a cerințelor impuse monitorizării este ilustrată structura internă a cablurilor și diferitele criterii de clasificare a acestora. Punctul central al capitolului este detalierea degradărilor care se manifestă la cabluri și a surselor care generează aceste degradări. La final este prezentat un scurt istoric al evoluției cablurilor metalice începând cu primul cablu metalic folosit în Europa în minerit.

Capitolul 2

În cel de-al doilea capitol se prezintă stadiul actual al metodelor existente pentru monitorizarea nedistructivă a cablurilor. Prima metodă tratată este monitorizarea vizuală a cablurilor care este și din punct de vedere cronologic prima metodă utilizată pe scară largă. În continuare sunt prezentate metodele de monitorizare magnetică a cablurilor, cele bazate pe ultrasunete, cele care utilizează emisiile acustice și la final metoda de monitorizare termală prin unde infraroșii.

Pentru fiecare metodă s-a întreprins o abordare similară începând cu prezentarea istoricului dezvoltării metodei și a principiilor de bază ale acesteia, urmată de o discuție asupra tehnicilor și a echipamentelor utilizate în cadrul metodei, de evaluarea rezultatelor obținute în urma aplicării metodei, de prezentare a avantajelor și dezavantajelor metodei. La final s-au prezentat studii de caz cu aplicări ale metodelor pe structuri.

Capitolul 3

În capitolul 3 este prezentat în primul rând modul în care s-a întreprins dezvoltarea prototipului sistemului integrat de monitorizare nedistructivă a cablurilor. Dezvoltarea începe cu evaluarea cerințelor impuse de către structura cu cabluri care face obiectul monitorizării. În continuare sunt prezentate degradările și scenariile de degradare urmărite de către

monitorizare. Totodată sunt considerate atât condițiile operaționale și de mediu cât și limitările impuse achiziției de date in situ. Punctul central al capitolului este prezentarea arhitecturii propuse pentru sistemul de monitorizare.

Fiecare componentă hardware a sistemului de monitorizare este prezentată în detaliu acordându-se atenție deosebită caracteristicilor senzorilor și sistemului de comunicație a datelor.

Capitolul 4

Acest capitol este dedicat prezentării tehnicilor software utilizate pentru detecția degradărilor și deteriorărilor apărute la cabluri. Tehnicile sunt legate de procesarea imaginilor digitale ale cablurilor. În prima etapă este prezentat modelul geometric 3D de referință a cablului metalic. Descrierea parametrică a geometriei firelor și a toroanelor în cadrul cablului este fundamentul pe care sunt aplicați algoritmi de detecție a formelor în cadrul imaginilor. Totodată sunt calculate proiecțiile 2D ale modelului geometric 3D care vor fi elementele de referință utilizate în comparațiile cu imaginile cablurilor surprinse in situ.

Procesul de estimare a proprietăților fizice a cablurilor este prezentat aplicat pe proiecțiile modelului geometric. În partea finală a capitolului sunt analizate pe rând caracteristicile fiecărei degradări a cablurilor. Accentul este pus pe un set de trei clase de degradări pe care s-au efectuat cele mai multe experimente, și anume: coroziunea externă a cablului, abraziunea externă a cablului și firele individuale rupte.

Capitolul 5

În acest capitol este detaliată funcționarea subsistemului de detecție și evaluare a integrității structurale prezentat în cadrul arhitecturii sistemului de monitorizare. Metodele de recunoaștere a deteriorărilor și metodele de clasificare automată a imaginilor sunt prezentate atât din perspectiva învățării supervizate cât și din perspectiva învățării nesupervizate. Sunt dedicate subcapitole pentru prezentarea celor două metode principale testate experimental pentru învățarea supervizată.

Prima metodă prezentată descrie utilizarea rețelelor neuronale artificiale pentru procesele de învățare. Cea de-a doua metodă folosește inferența cu mulțimi vagi. Se prezintă o scurtă introducere în terminologia fuzzy urmată de modelul de inferență Sugeno, utilizat în cadrul aplicației software. La final sunt prezentate conceptele testate pentru învățarea nesupervizată. Principala metodă de detecție nesupervizată a deteriorărilor este bazată pe modelele Markov cu stări ascunse.

Capitolul 6

Acest capitol este dedicat prezentării rezultatelor calitative și cantitative ale experimentelor pe seturi de imagini cu defecte. O structură a experimentelor este prezentată împreună cu informațiile cu privire la ratele de detecție a erorilor în seturi de imagini

conținând atât eșantioane afectate de deteriorări cât și eșantioane ale unor cabluri noi sau intacte. Rezultatele detecției degradărilor sunt prezentate atât grafic cât și sub formă tabelară. Capitolul se încheie cu o discuție a cauzelor care influențează detecția fals-positivă sau fals-negativă a unor eșantioane din seturile de test.

Capitolul 7

În capitolul final sunt prezentate concluziile cercetării, contribuțiile proprii aduse prin intermediul tezei la domeniul monitorizării structurale a cablurilor, modul de valorificare a rezultatelor prin intermediul publicațiilor și direcțiile viitoare de cercetare.

2 Studiul actual al metodelor de testare nedistructivă a cablurilor

2.1 Monitorizarea vizuală a cablurilor

Monitorizarea vizuală este metoda de monitorizare structurală nedistructivă care, din punct de vedere cronologic, a fost prima metodă utilizată în procesele industriale și în monitorizarea structurală a cablurilor, dar care din punct de vedere formal a fost printre ultimele recunoscute. Monitorizarea vizuală se bazează într-o foarte mare măsură pe factorul uman și poate fi considerată subiectivă pentru că se bazează pe raționamentul individual al fiecărui expert uman [42], [51].

Un studiu efectuat printre inspectorii tehnici din Statele Unite ale Americii reflectă faptul că majoritatea acestora preferă, când forma structurii permite, ca să efectueze inspecții vizuale ale hobanelor sau ale cablurilor de suspendare. În plus, preferă ca proiectanții să dezvolte forme structurale care să permită accesul la cabluri pentru inspecția vizuală [38], [52].

2.1.1 Istoric și principii de bază

Din punct de vedere formal, metodele de monitorizare vizuală au fost standardizate în S.U.A. la începutul anilor 1980 de către Electric Power Research Institute (EPRI) prin centrul său de examinare nedistructivă (Nondestructive Examination Center – NDE). Nevoia inițială de standardizare a monitorizării vizuale a fost propusă de către Societatea Americană a Inginerilor Mecanici (ASME), pentru a fi aplicată inspecțiilor efectuate la componentele instalațiilor de energie nucleară. Societatea avea nevoie de personal tehnic specializat după un standard clar, care apoi să fie capabil ca să efectueze examinarea vizuală a condițiilor structurale generale și a condițiilor mecanice ale componentelor. Ca rezultat, a fost elaborat standardul ANSI N45.2.6. [53]. Monitorizarea vizuală are un caracter periodic, expertul uman nefiind prezent permanent în zona de monitorizare. Periodicitatea monitorizării este în general bivalentă. Pe de-o parte, sunt recomandate inspecții de rutină la intervale de cel mult 2 ani, iar pe cea de-a doua parte, au loc inspecții în detaliu la intervale de timp mai mari. Un exemplu mai restrictiv este în cazul podului Faroe care unește Sealand și Falster în Danemarca, unde este utilizat un proces de monitorizare vizuală cu 3 faze. Zilnic, controlorul podului execută o inspecție vizuală prin parcurgerea întregului pod de la nivelul căi de rulare, anual se efectuează inspecția părților componente majore ale podului (cum sunt cele alcătuite din cabluri) și, în cele din urmă, inspecții speciale detaliate (în cazul în care se detectează degradări în timpul celorlalte două tipuri de inspecții) [54].

Din punct de vedere al standardelor nord-americane, monitorizarea vizuală poate fi directă sau de la distanță. Conform [5], monitorizarea directă presupune examinarea cu ochiul liber, sau utilizând instrumente precum oglinzi, aparate de mărit optice (e.g. lupa), telescoape, microscopie, sau alte instrumente optice specifice. Distanța de la ochiul expertului uman până

la suprafața examinată, nu trebuie să fie mai mică de 150 mm sau mai mare de 610 mm, iar unghiul de vizualizare sa nu fie mai mic de 30° (după cum este ilustrat în Figura 2.1).

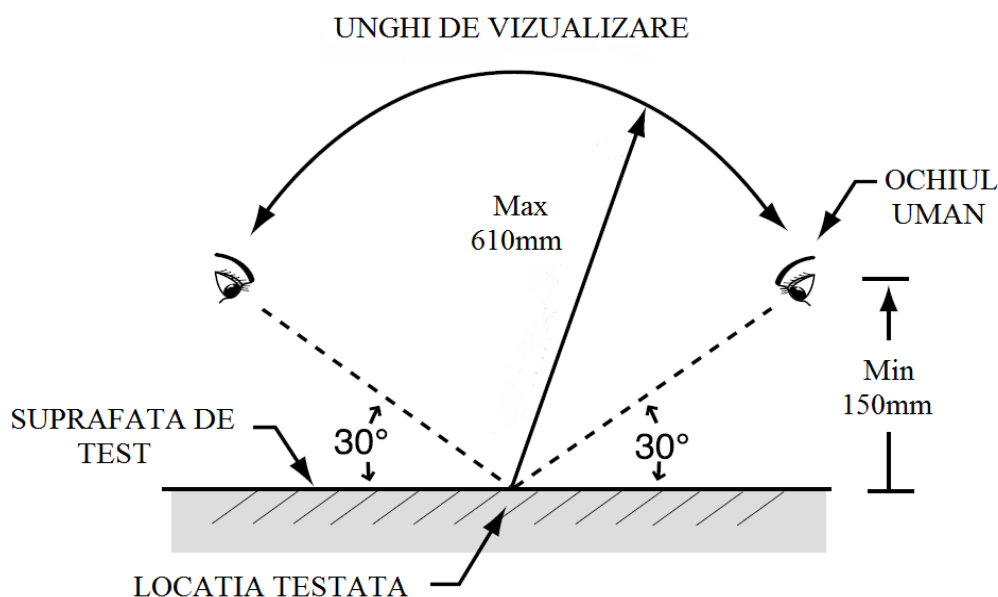


Figura 2.1 Condițiile monitorizării directe [55].

Aspectele monitorizate vizual diferă în funcție de cele două mari categorii de poduri cu cabluri: poduri cu hobane și poduri cu cabluri suspendate.

Pentru podurile cu hobane, în timpul monitorizării vizuale a cablurilor, întreaga suprafață a acestora este îndeaproape inspectată, după care se continuă cu inspecția manșoanelor din neopren și a garniturilor de neopren, urmată de inspecția părților exterioare ale cămășii din polietilenă utilizate la ghidajul cablurilor, apoi de inspecția suprafețelor și a elementelor unde are loc ancorarea. Monitorizarea vizuală a cablurilor podurilor cu hobane trebuie să implice cel puțin următoarele aspecte [5]:

- Identificarea existenței oricărui tip de fisuri longitudinale sau transversale, sau a existenței unor ridicături pronunțate ale mantalei de înfășurare a cablurilor, respectiv a oricărui tip de deteriorare a conexiunilor cu amortizoarele sau a firelor torsadate;
- Inspectarea în vederea detectării oricărui tip de neregularitate la alinierea cablurilor, în special apariția ondulației suprafețelor sau a încovoierii excesive (mărirea excesivă a săgeții). Săgeata se măsoară prin utilizarea de dispozitive optice, sau prin calcul utilizând algoritmi de procesare a imaginilor digitale. Înclinarea cablurilor se măsoară cu ajutorul unui inclinometru poziționat în puncte specifice ale structurii;
- Identificarea schimbărilor la valoarea elevației tablierului podurilor;
- Examinarea și identificarea oricăror deteriorări ale benzilor protectoare înfășurate (e.g. rupturi, crăpături sau exfolieri);
- Identificarea oricărui tip de deteriorare a mantalei protectoare, în special în zonele cu solicitări ridicate, mai ales când materialul din care este compusă mantaua nu este pe bază de fluorură de polivinil;
- Identificarea unor posibile deteriorări în punctele de conexiune dintre elementele de ancorare și mantaua cablurilor;

- Inspectarea apariției eventualelor avarii, lăsări, pierderi ale etanșeității sau deteriorări ale manșoanelor de neopren și ale colierelor de prindere;
- Identificarea, dacă este cazul, a deteriorărilor sau a dislocărilor garniturilor de neopren, sau ale garniturilor de fixare;
- Identificare existenței golurilor dintre garniturile de neopren și mantaua cablului;
- Verificarea fisurării, crăpării, sau a apariției altor tipuri de deteriorări la țevile de ghidaj, sau a unor urme ale impactului dintre componentele din cabluri și țevile de ghidaj;
- Examinarea suprafețelor mantalei dinăuntrul țevilor de ghidaj, cu ajutorul unui alezoscop sau al unui echipament similar, pentru a detecta eventualele deteriorări sau deformații ale mantalei în apropierea ancorajului;
- Examinarea suprafețelor componentelor vizibile din zona de ancoraj, incluzând piulițele inelare, capacele de închidere și plăcile de bază;
- Examinarea componentelor vizibile ale plăcii de bază în vederea detectării deteriorărilor, coroziunii sau crăpăturilor;
- Verificarea prin ridicarea capacelor de închidere a prezenței umezelii, sau a vaselinei amestecate cu apă în zona componentelor de ancorare;
- Verificarea deteriorării, a lăsării, detensionării cablurilor de susținere și a necesității de înlocuire sau de retensionare a acestora;
- Examinarea cablurilor de susținere, în vederea detecției oricăror urme de oboseală a materialului sau a celor rezultate din coroziunea prin frecare;
- Examinarea amortizoarelor conectate la cablurile transversale și eventuala înlocuire a acestora dacă nu mai funcționează.

În ceea ce privește inspecția podurilor cu cabluri suspendate, sunt recomandate inspecții vizuale de rutină ale componentelor exterioare ale cablurilor de către personalul de întreținere ori de câte ori se efectuează lucrări uzuale, cum sunt îndepărtarea stratului de gheață, a reziduurilor, sau revopsirea anumitor componente structurale metalice [56]. Cele mai potrivite perioade ale anului pentru efectuarea inspecțiilor vizuale sunt, fie după sfârșitul iernii (în lunile martie sau aprilie) când se pot observa eventualele deteriorări cauzate de îngheț și de soluțiile de dezgheț și dejivrare, fie după sfârșitul verii (în lunile septembrie sau octombrie) când se pot observa eventualele deteriorări ale stratului de protecție (e.g. vopsea), sau ale elementelor de îmbinare, cauzate de căldura extremă.

Al doilea tip de inspecție vizuală, care, cel puțin în S.U.A. este obligatorie o dată la maxim 2 ani, este inspecția vizuală detaliată și completă (de tip hands-on) a tuturor segmentelor de cablu din componența podului [57]. Monitorizarea vizuală trebuie să fie una directă, persoana care face inspecția trebuind să fie suficient de aproape de cablurile inspectate ca să le poată atinge, să le sondeze sau să le inspecteze prin intermediul unui instrument optic de mărire.

Pe lângă inspectorii autorizați care observă cablurile doar o dată la doi ani, echipele care efectuează inspecția vizuală bienală trebuie să includă și membrii din echipa de întreținere care efectuează inspecțiile vizuale din timpul operațiilor de întreținere a cablurilor în mod curent. Motivul principal pentru includerea acestora în echipa de monitorizare este dat

de faptul că acești tehnicieni vizualizează mult mai des cablurile, au informații cu privire la istoricul și la evoluția lor, și pot detecta mai rapid apariția anumitor transformări, probleme, sau deteriorări. În urma monitorizării bienale pot să iasă la iveală modificări ale stării cablurilor (e.g. coroziunea) care să fie instrumentale în efectuarea unor inspecții în structura internă a componentelor bazate pe cabluri.

Monitorizarea vizuală bienală a cablurilor podurilor suspendate trebuie să implice cel puțin următoarele aspecte [56]:

- Examinarea stării vopselelor și a altor elemente de protecție a suprafeței externe a cablurilor, în vederea detecției apariției uscării și/sau decojirii vopselei, a exfolierii straturilor de protecție, a întepării, găuririi sau ruperii protecțiilor (Figura 2.2).
- Verificarea apariției unor găuri sau crăpături la nivelul bandajelor de cablu (Figura 2.2).
- Inspectarea tuturor înfășurărilor de spire de cabluri, în vederea detectării anomaliilor de tipul tensiunilor inegale în spire (de obicei indicate prin neuniformități la suprafață), spații în înfășurare, cabluri de înfășurare corodate sau rupte (Figura 2.3).
- Verificarea existenței încrețiturilor la suprafața grupului de cabluri de bandaj, care sunt un indicator al suprapunerii unor fire și al apariției zonelor interne goale (Figura 2.4).
- Examinarea apariției străpungerilor la nivelul cablurilor portante și al ancorajelor, detecția eventualelor manșoane deteriorate sau a ondulărilor.
- Inspectarea punctelor de contact din zona ancorajelor dintre componentele metalice ale barelor de suspendare și elementele din beton, în vederea detectării apariției coroziunii.
- Examinarea la nivelul ancorajelor a apariției firelor rupte, sau a coroziunii, a pătrunderii apei în zonele etanșe, a semnelor existenței de condens.
- Inspectarea stării elementelor sistemului de mână curentă alcătuit din cabluri, pentru detecția firelor rupte, a întinderilor sau a coroziunii (dacă acesta există), cum este cazul podurilor suspendate pentru traversarea conductelor de utilități.



Figura 2.2. Crăpătură, vopsea uscată sau exfoliată [56].

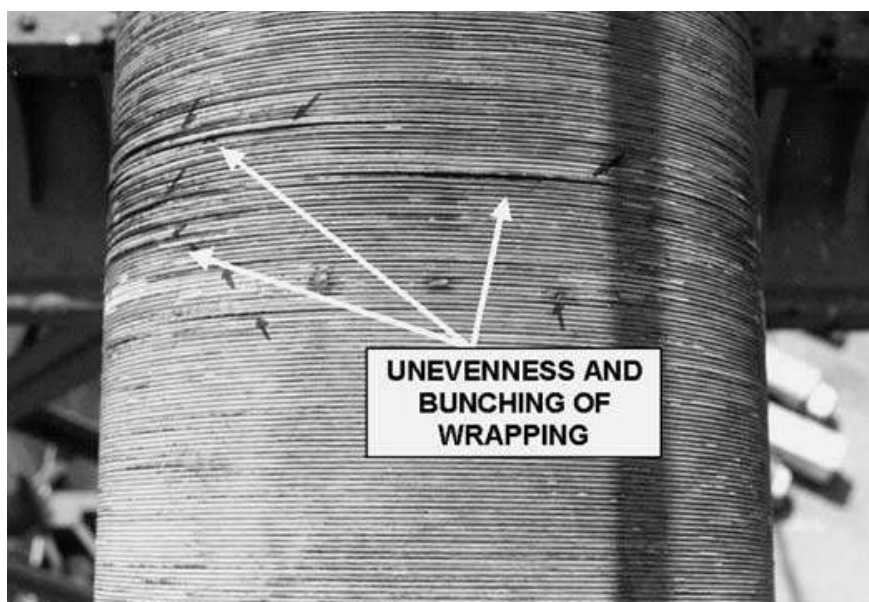


Figura 2.3. Neuniformitate a înfășurării [51].

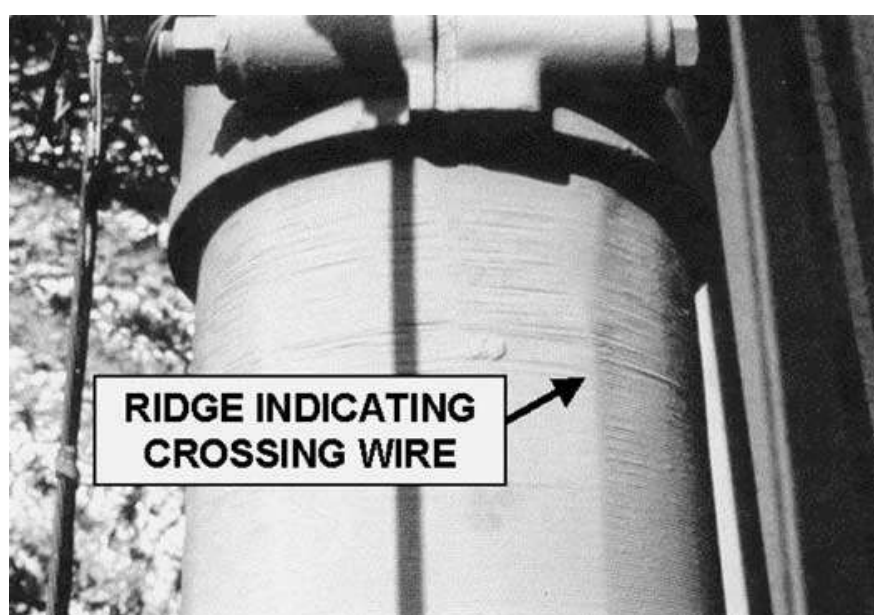


Figura 2.4. Încrețitură, fire încrucișate [56].

A treia fază a monitorizării vizuale constă din inspecțiile la nivelul structurii interne a legăturilor din cabluri. Această monitorizare se efectuează la intervale de cel puțin 10 ani în cazurile în care nu au fost constatate semne de eroziune la suprafață, și la intervale de 4-5 ani în cazurile în care s-au constatat semne de coroziune la mai mult de 10% din numărul de fire ale cablurilor [58]. Inspecțiile interne la nivelul structurii trebuie efectuate în zone ale cablurilor unde au fost detectate semne de deteriorare la suprafață. Semnele externe ale posibilelor deteriorări externe sunt: înfășurători de cabluri slăbite, prelingeri și scurgeri de apă din interiorul cablurilor, pete de rugină, sunete „goale” la testarea prin impact cu ciocanul, sau prezența unor deteriorări precum cele ilustrate în Figura 2.2, Figura 2.3 și Figura 2.4.

2.1.2 Tehnici și echipamente

Prima problemă pe care o creează monitorizarea vizuală a cablurilor, este modul de acces la acestea. Cele mai des folosite soluții sunt elevatoarele, ascensoarele, macaralele cu nacele, cărucioarele sau vagonetele. Nu toate aceste soluții se pretează la diferitele tipuri de poduri cu hobane sau cu cabluri suspendate. Pentru podurile cu cabluri suspendate utilizarea unui cărucior cu role (care să fie deplasat pe cabluri) permite menținerea în timpul monitorizării a traficului parțial pe pod. Căruciorul este format dintr-un șasiu tubular de care este atașată o nacelă. Astfel de cărucioare sunt folosite în S.U.A., de exemplu la podul cu hobane Hale Boggs Memorial Bridge din statul Louisiana [59].

Un astfel de cărucior poate fi încărcat cu o masă utilă de aproximativ 200 kg, permițând accesul a 2 inspectori și a câtorva echipamente mici. Căruciorul este tractat cu ajutorul unui alt cablu transportor și beneficiază de sistem propriu de frânare. Dezavantajul utilizării unor astfel de cărucioare pentru accesul la cabluri este că ele sunt utile doar în cazul cablurilor cu diametru mai mare și trebuie personalizate pentru fiecare tip de pod în parte. Exemple de dispozitive similare se regăsesc și în Europa, în Danemarca, unde inspectorii au dezvoltat un sistem similar de cărucior pe role [38].

Pentru monitorizarea vizuală, inspectorii trebuie să aibă la îndemână și un set de unelte și echipamente mici, pentru testarea, vizualizarea sau culegerea de probe de la suprafață. Acest set trebuie să includă cel puțin următoarele: lanternă (este utilă în special pentru iluminarea părților inferioare ale cablurilor, pentru o mai bună vizualizare sau pentru furnizarea de lumină suplimentară pentru camerele de luat vederi), ruletă și riglă metalică (pentru măsurarea distanțelor sau a zonelor), benzi metalice flexibile (pentru măsurarea diametrului înfășurărilor de cabluri), un instrument metalic similar unei șurubelnițe rotunjite la capăt (utilizat la testarea firelor slăbite sau pentru ridicarea firelor deteriorate sau corodate de la suprafață, în vederea inspectării straturilor de fire interne), micrometru (tradițional sau digital, util la măsurarea modificărilor în secțiunea firelor sau înfășurărilor de fire), cameră de fotografiat digitală cu rezoluția de minim 7 megapixeli + o mică riglă de lungime fixă (pentru înregistrarea imaginilor digitale a deteriorărilor și pentru raportarea dimensiunilor în imaginile digitale la riglă), hârtie specială pentru testarea pH-ului (utilă în determinarea acidității lichidelor, în zonele unde acestea apar pe cabluri), oglindă (de preferabil cu braț telescopic, pentru observarea porțiunilor din cablu unde pozițiile de acces sunt dificile), recipiente de dimensiuni mici (de câțiva mililitri, cu închidere ermetică, pentru luarea de probe ale lichidelor care provoacă umezeală).

2.1.3 Evaluarea rezultatelor

Pentru fiecare proprietate monitorizată vizuală trebuie să existe o scară sau un set de măsurători sau valori de referință, astfel încât să se poată realiza o clasificare a unei posibile deteriorări a cablului. Stabilirea unei discretizări a setului de valori de referință presupune acumularea prealabilă a unui set amplu de informații.

De exemplu, standardele nord-americe pentru clasificarea apariției coroziunii la cabluri și a gradului acesteia, folosesc o scară cu 6 stadii de coroziune, în următorul mod: stadiul 0, când firul este nou, izolat și nu există coroziune; stadiul 1, când apare începutul deteriorării stratului izolator de zinc (deteriorare minimă); stadiul 2, când firele devin

acoperite de rugina albă (de obicei cauzată de un mediu umed); stadiul 3, când până la 30% din suprafața unui cablu este acoperită de coroziune metalică; stadiul 4, când peste 30% din suprafața unui cablu este acoperită de coroziune metalică; și stadiul 5, când din cauza coroziunii s-a produs ruperea firului.

În urma monitorizării vizuale a cablurilor se disting o serie de avantaje. Principalul avantaj al inspecției vizuale este faptul că aceasta este întreprinsă de un expert uman, cu pregătire minuțioasă în domeniu, care poate evalua structura pe cabluri nu doar din punct de vedere al deteriorărilor locale sau a defectelor apărute la diferite secțiuni de cablu, ci și din punct de vedere general.

Deși, majoritatea informațiilor despre starea cablurilor se referă la zona exterioară a acestora, operatorul poate obține informații și despre starea interioară a cablurilor, prin dezvelirea anumitor toroane sau prin observarea efectelor deteriorărilor interne la suprafață.

Totuși, rezultatele monitorizării vizuale a cablurilor conțin în principal informații despre starea externă a cablurilor și necesită efectuarea de investigații suplimentare cu alte metode, cum sunt, de exemplu, cele magnetice sau acustice, pentru a obține rezultate complete despre starea și condiția generală a cablurilor.

Un al doilea dezavantaj al efectuării inspecției vizuale de către experții umani este faptul că inspecția necesită prezența expertului la înălțime, în zone greu accesibile sau în zone care prezintă pericole pentru siguranța acestuia. Faptul că specialiștii trebuie să aibă asupra lor echipamente de măsură, recipiente pentru colectarea probelor, cameră de fotografiat, echipamente de securitate și de protecție etc., le limitează mișcările și nivelul de siguranță. Pe lângă acesta, se mai adaugă dezavantajul că, în zonele unde se efectuează inspecția la înălțime, se amplasează în cele mai multe cazuri nacele sau echipamente similare, care necesită interzicerea parțială a accesului utilizatorilor structurii.

Nu în ultimul rând, costurile efectuării monitorizării vizuale a cablurilor sunt ridicate din cauza efortului financiar generat de asigurarea accesului personalului la înălțime și de luarea măsurilor de asigurare a securității și sănătății în muncă.

2.2 Monitorizarea magnetică a cablurilor

2.2.1 Istoric și principii de bază

Din punct de vedere al siguranței în exploatare, “primul cablu din istorie” [60] (Figura 1.3), fabricat în 1834 de către inginerul minier german Wilhelm Augustus Julius Albert, avea marele avantaj de a nu avea fire ascunse. Astfel, fiecare sârmă componentă a cablului putea fi inspectată vizual. În urma dezvoltărilor ulterioare, în zilele noastre se folosesc cabluri de oțel a căror suprafață este în mare parte ascunsă, nefiind posibilă o inspecție vizuală, “decât pentru aproximativ 20% din aria cablului” [60].

Pentru a înlătura acest neajuns, au fost dezvoltate metode de testare nedistructive (precum monitorizarea electromagnetică) încă de la începutul secolului XX. La început, aparatele concepute pentru inspecția electromagnetică a cablurilor puteau fi operate numai de către persoane foarte specializate. În zilele noastre, datorită dezvoltării masive a acestor aparate, s-a ajuns ca ele să poată fi operate de către un spectru mult mai larg de utilizatori.

Aparatele de testare magnetică a cablurilor pot detecta neregularități în așezarea sârmelor sau a toroanelor, sârme și toroane rupte, sau reduceri de secțiune cauzate de coroziune sau abraziune, pe întreaga lungime a cablului. Rezultatele testelor sunt în funcție de lungimea cablului, și permit localizarea oricărei degradări. Mai mult, înregistrările succesive pot fi comparate pentru a monitoriza comportamentul cablului în timp.

Se evidențiază două tipuri de defecte care pot fi identificate cu ajutorul aparatelor de măsură: defecte locale (LF) și reducerea secțiunii cablului (LMA). Prin LF se înțelege o discontinuitate în cablul de oțel, cum ar fi un fir rupt sau degradat, puncte de rugină sau reduceri de secțiune cauzate de abraziune. LMA este o mărime calitativă și indică raportul dintre aria de oțel dintr-un anumit punct al cablului și aria maximă a cablului măsurată într-o secțiune fără degradări. Aparatele de măsură sunt concepute în așa fel, încât să detecteze una, sau ambele tipuri de degradări (LF și LMA).

Principiile de funcționare a acestor aparate sunt următoarele [46]:

Aparatele care folosesc electromagneți (Figura 2.5) funcționează pe principiul transformatorului, având bobine principale și secundare. Cablul de oțel are rol de miez al transformatorului. Bobina principală se alimentează cu un curent alternativ de joasă frecvență, de obicei de la 10 la 30 de Hz, iar bobina secundară măsoară caracteristicile magnetice ale cablului. Orice schimbări în caracteristicile câmpului magnetic sunt reflectate prin variații de tensiune în bobina secundară. Aceste tipuri de aparate sunt folosite pentru detectarea reducerilor de arie secțională a cablurilor.

Aparatele care folosesc magneți permanenți și curent continuu (Figura 2.6 și Figura 2.7) funcționează prin generarea unui flux continuu care magnetizează o porțiune a cablului pe măsură ce acesta trece prin capul de testare. Fluxul magnetic total este măsurat cu ajutorul unei bobine, sau a unor senzori capabili să măsoare câmpul magnetic sau variații ale acestuia. Semnalele date de senzori sunt procesate, iar rezultatele indică informații referitoare la reducerile de arie secțională a cablurilor.

Aparatele care detectează scurgeri de flux magnetic (Figura 2.8 [46]) folosesc curent continuu, sau un magnet permanent. Scurgerile de flux magnetic sunt înregistrate de senzori (de exemplu, senzori de tip Hall), bobine, sau alte aparate. Aceste scurgeri de flux indică defecte locale în cablul de oțel.

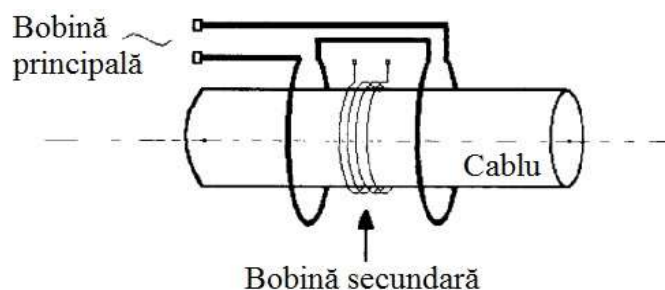


Figura 2.5. Reprezentare schematică a senzorului [46].

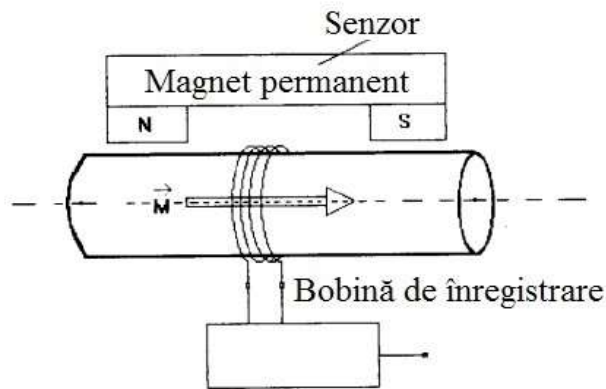


Figura 2.6. Senzor cu magnet permanent și bobină de înregistrare [46].

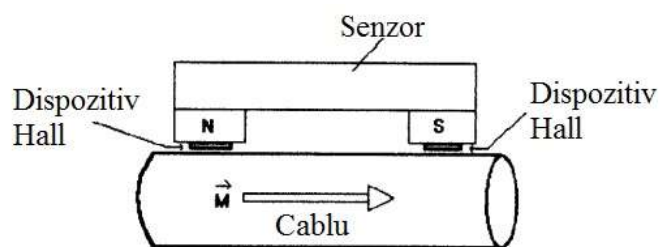


Figura 2.7. Senzor cu magnet permanent și dispozitive Hall [46].

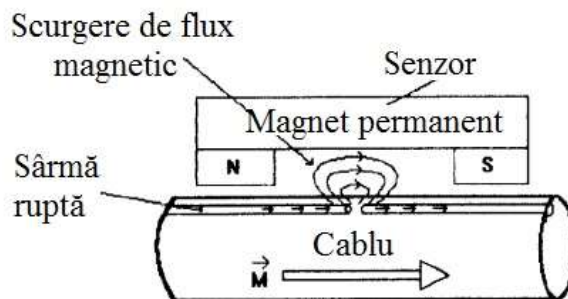


Figura 2.8. Fluxul magnetic creat de o sârmă ruptă [46].




2.2.2 Tehnici și echipamente





Modul de desfășurare a inspecției unui cablu, calibrarea aparatelor și etapele care trebuie urmate sunt reglementate de standarde.

Inspecția unui cablu de oțel este, de regulă, precedată de calibrarea aparatului. În unele situații se pot face două treceri cu aparatul de măsură peste aceleași porțiuni de cablu, pentru a valida datele înregistrate. Trebuie ținut cont de faptul că, la determinarea LMA, secțiunea de reper (de pe cablu) poate fi și ea afectată de degradări și, prin urmare, rezultatele pot să fie viciate.




Majoritatea aparatelor pentru inspecția magnetică a cablurilor au capacitatea de a detecta atât degradările locale, cât și reducerea secțiunii metalice. În prezent, pe piață există o serie de astfel de aparate, produse de firme precum Intron, sau NDT Technologies. Aceste firme oferă mai multe tipuri de aparate, în funcție de dimensiunea cablului și de aplicațiile acestuia.



Următoarele date sunt extrase și traduse din materialele de prezentare ale aparatelor Intron și NDT Technologies [61], [62].

Model:	Imagine:	Utilizare:
MB 8-24	 <p data-bbox="544 824 687 860"><i>Figura 2.9</i></p>	<p data-bbox="863 613 1347 792">Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre cuprinse între 8 - 24 mm, folosite la lifturi, macarale, sau alte sisteme de transport pe cabluri.</p>
MH 6-24	 <p data-bbox="539 1240 699 1276"><i>Figura 2.10</i></p>	<p data-bbox="863 898 1347 1077">Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre cuprinse între 6 - 24 mm, folosite la lifturi, macarale, sau alte sisteme de transport pe cabluri.</p>
MH 20-40	 <p data-bbox="539 1794 699 1830"><i>Figura 2.11</i></p>	<p data-bbox="863 1319 1378 1498">Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre cuprinse între 20 - 40 mm, folosite la utilaje miniere, macarale, sau utilaje pentru șantiere navale.</p>

MH 40-64	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.12</i></p>	<p>Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre cuprinse între 40 - 64 mm, folosite la utilaje miniere, macarale, sau utilaje pentru șantiere navale.</p>
MH 100-150	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.13</i></p>	<p>Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre cuprinse între 100 - 150 mm, folosite la poduri.</p>
MH 124, MH 233	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.14</i></p>	<p>Cabluri plate, cu lățimea de până la 124 / 233 mm, folosite în industria minieră</p>
MH 233R, MH 450R	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.15</i></p>	<p>Cabluri plate înglobate în cauciuc, cu lățimea de până la 233 / 450 mm, folosite în industria minieră.</p>

Tabel 2.1 Aparate INTRON

Model:	Imagine:	Utilizare:
LMA-75	 <p data-bbox="555 607 719 645"><i>Figura 2.16</i></p>	Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre de până la 19 mm.
LMA-125	 <p data-bbox="555 1106 719 1144"><i>Figura 2.17</i></p>	Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre de până la 32 mm.
LMA-175 L	 <p data-bbox="555 1547 719 1585"><i>Figura 2.18</i></p>	Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre de până la 45 mm.

LMA-300	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.19</i></p>	Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre de până la 83 mm.
LMA-450	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 2.20</i></p>	Cabluri cu secțiuni circulare, cu diametre de până la 120 mm.

Tabel 2.2 Aparate NDT Technologies

Aceste aparate se conectează la un dispozitiv de interpretare a datelor, care poate furniza informațiile referitoare la degradările cablurilor testate.

2.2.3 Evaluarea rezultatelor

Majoritatea aparatelor de inspecție magnetică din zilele noastre au posibilitatea de a fi conectate la un calculator pe care rulează o aplicație software de interpretare a datelor citite (acesta fiind oferit de producătorul aparatului). Astfel, rezultatele analizelor pot fi stocate și, mai târziu, comparate pentru a urmări comportamentul cablurilor în timp.

Interpretarea datelor este o muncă specializată și necesită multă experiență. Factorii care pot vicia rezultatele unei investigații cu aparate de inspecție magnetică sunt multipli. Prin urmare, firmele producătoare de aparate de testare a cablurilor oferă cursuri de pregătire pentru personalul care urmează să le folosească.

Testarea magnetică a cablurilor oferă informații extrem de importante privind starea de uzură internă a cablurilor metalice pe care inspecția vizuală nu le poate da. Însă, conform

standardelor, este recomandat ca testarea magnetică să aibă întotdeauna loc alături de testarea vizuală.

Testarea magnetică a cablurilor metalice permite evaluarea cantitativă a reducerii secțiunii transversale și evaluarea calitativă a degradărilor locale din structura elementului. Metoda are și limitări care trebuie luate în considerare.

- Testarea magnetică se pretează doar pentru cabluri din metale feroase;
- Identificarea degradărilor din zonele de ancorare și în zonele de îmbinare este dificilă sau chiar imposibilă;
- Degradările de natură fizică ale materialului (ex. oboseala) sunt greu de identificat și de cuantificat;
- Un aparat de testare poate lucra cu un interval limitat de diametre;
- Informațiile referitoare la reducerea ariei secționale sunt raportate la o secțiune în care se face calibrarea aparatului, însă aceasta, la rândul ei, poate prezenta degradări;
- Sensibilitatea metodelor de inspecție magnetică scade odată cu profunzimea degradărilor;
- Există posibilitatea de a nu fi detectate sârme rupte de diametru foarte mic, sau rupturi apropiate. De asemenea, se face greu diferența între rupturi și degradări locale cauzate de coroziune;
- Odată cu detecția sârmelor rupte, frecvența testărilor trebuie mărită pentru a se putea determina rata de degradare a cablului și astfel, durata de exploatare a acestuia.

Metoda magnetică de testare a cablurilor a fost folosită cu succes pe o serie de structuri. În lucrarea [63] autorii prezintă metodologia de lucru și unele rezultate obținute pe macaralele unor nave de transport și nave macara în Olanda și pe un sistem de ridicare a navelor situat într-un șantier naval în Malaezia. În referința [64] autorii prezintă aplicarea metodei (respectiv a aparatelor INTRON) pe 53 de cabluri ale unei platforme de foraj, inspecția rezultând în înlocuirea a 13 dintre aceste cabluri. În lucrarea [65] autorii studiază eficacitatea metodei și exemplifică un număr de aplicații ale metodei alături de avantajele financiare ale acesteia. Se arată teste făcute pe o macara din Paraburdoo Australia (Figura 2.21), la o telegondolă în Sochi Russia (Figura 2.22) și podul Yeongjong din Coreea de Sud (Figura 2.23).

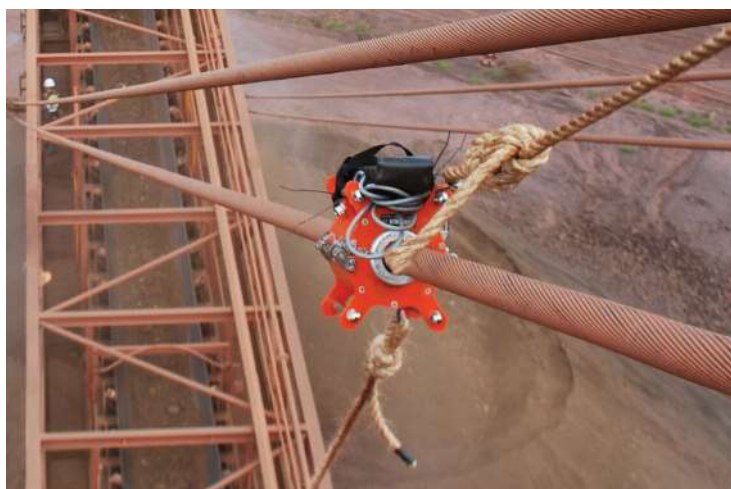


Figura 2.21



Figura 2.22



Figura 2.23

2.3 Monitorizarea bazată pe ultrasunete

Monitorizarea cu ultrasunete este o metodă nedistructivă de testare, măsurare și identificare a defectelor în diferite materiale. Metoda se bazează pe studiul propagării sunetelor de înaltă frecvență în diverse medii. În general, se folosește pentru inspectarea metalelor și a diferitelor aliaje de metal. însă poate produce rezultate bune și în cazul betonului, a lemnului sau a materialelor compozite.

2.3.1 Istoric și principii de bază

Descoperirea sonarului (primele patente pentru astfel de dispozitive fiind înregistrate în 1912 de către meteorologul englez Lewis Richardson și în 1913 de către fizicianul german

Alexander Behm) a dus la un interes crescut pentru implementarea principiului acestuia în medicină, pentru diverse investigații.

Sergey Y. Sokolov (numit de către unii, tatăl testării cu ultrasunete) a avansat în anii 1920 ideea că, folosind această metodă, ar fi posibilă detectarea degradărilor și imperfecțiunilor în metale. Însă, aparatele concepute de el nu erau destul de performante pentru a putea fi folosite în practică.

În 1931 Mulhauser a patentat o metodă de detectare a defectelor în solide, folosind doi traductori.

După al doilea război mondial, cercetătorii japonezi au început să investigheze aplicațiile ultrasunetelor în diagnoza medicală. S-au conceput aparate care depistau diferite pietre și tumori. Japonezii au fost primii care au introdus analiza cu ultrasunete de tip Doppler, care are capacitatea de a detecta mișcarea sângelui pentru analize cardiovasculare.

Începutul anilor 1970 a constituit un punct de cotitură în domeniul testării nedistructive. Avântul tehnologic a permis detectarea până și a micilor imperfecțiuni, situație care conducea la tot mai multe piese respinse în faza de control al calității produselor. Cu toate acestea, rata de cedare a acestora nu a scăzut. În acest context, s-a dezvoltat puternic disciplina numită mecanica ruperii. S-a constatat că, elementele cu mici imperfecțiuni pot fi folosite, însă era nevoie de monitorizarea acestora și de stabilirea unei relații între mărimea defectelor și rezistența pieselor. Astfel, a apărut nevoia evaluării cantitative a defectelor, și nu doar calitative. Pe această cale, s-au dezvoltat teorii referitoare la apariția și propagarea fisurilor în timp sub încărcări ciclice.

În zilele noastre, prezența computerului a ușurat mult munca de testare cu ultrasunete. Aparatele sunt din ce în ce mai mici și mai ușor de utilizat. De asemenea, datele înregistrate pot fi stocate și consultate la o dată ulterioară inspecției.

Metoda testării cu ultrasunete folosește sunete de înaltă frecvență, pentru a face investigații cu privire la defectele din anumite materiale solide. De asemenea, prin această metodă se pot face și anumite măsurători și se pot obține informații cu privire la caracteristicile fizice ale materialului inspectat.

Defectoscopia cu ultrasunete folosește două tipuri de unde ultrasonice:

- Unde longitudinale – în cazul acestora, direcția de propagare a undei și direcția pe care au loc oscilațiile sunt paralele (se formează atât în solide cât și în lichide);
- Unde transversale – în cazul acestora, direcția de propagare a undei este perpendiculară pe direcția de oscilație a particulelor (se formează numai în solide).

Un aparat tipic de investigare cu ultrasunete este format din următoarele componente: generator de înaltă frecvență, traductor și dispozitiv de afișare a rezultatelor (ecran).

Generatorul de înaltă frecvență este un dispozitiv electronic capabil să producă impulsuri electrice de tensiune ridicată. Acestea sunt transmise traductorului care le transformă în unde (vibrații) ultrasonice. Vibrațiile sunt transmise elementului testat în care se propagă sub formă de unde. La întâlnirea unui defect, o parte din aceste unde vor fi reflectate de suprafața degradată, iar apoi înregistrate și transformate în impulsuri electrice de către un traductor. Aceste impulsuri vor genera o imagine pe ecran, urmând să fie interpretate. Principul de funcționare al unui astfel de aparat este ilustrat în Figura 2.24.

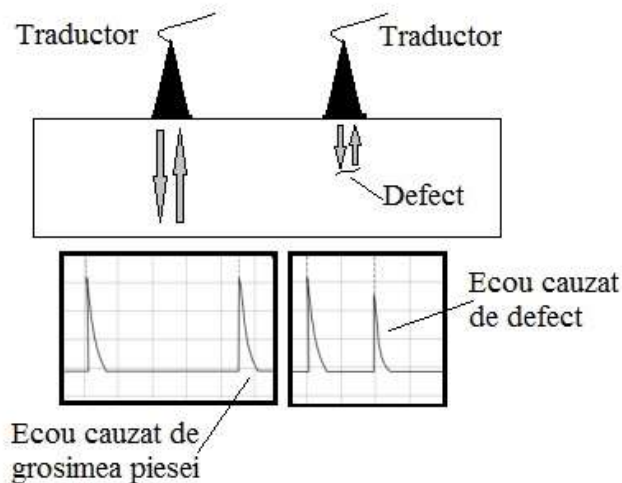


Figura 2.24 Principiul de funcționare a aparatelor de detecție cu ultrasunete.

Traductorii utilizați la aparatele de detecție cu ultrasunete sunt oscilatoare piezoelectrice. Acestea transformă impulsurile electrice în vibrații mecanice, și invers, prin fenomenul piezoelectric. Astfel, aplicând tensiune pe fețele unor anumite cristale (cuarț, titanat de bariu, tartrat dublu de sodiu etc.) acestea se contractă, sau se dilată. Dacă tensiunea este alternativă, atunci se obțin vibrații dependente de tensiunea aplicată.

Există numeroase tipuri de traductori piezoelectrice, în funcție de domeniul de aplicare (Figura 2.25).



Figura 2.25 Tipuri de traductori, reprodus din [66].

În funcție de mediul de legătură dintre traductor și elementul inspectat, se diferențiază traductori de contact și traductori pentru imersiune. Traductorii de contact vin în contact direct cu elementul inspectat și sunt manipulați de regulă cu mâna. Pentru a elimina stratul de aer dintre traductor și element, se folosesc diferite substanțe, precum vaseline sau uleiuri. Traductorii pentru imersiune nu au contact direct cu elementul inspectat. Sunt proiectați pentru a fi folosiți în medii lichide (în speță apă), fiind prin urmare impermeabili.

Pentru cabluri, metoda folosită este cea a undelor longitudinale (guided wave testing). Diferența față de metodele tradiționale de testare cu ultrasunete este că această metodă folosește ultrasunete de frecvență mai joasă (sub 200 kHz). Undele se propagă pe distanțe mari, cu viteze de peste 4 km/s. Astfel, există posibilitatea de a inspecta un număr mare de cabluri într-un interval rezonabil de timp și la costuri acceptabile.

Munca de pionierat în acest domeniu a fost făcută de Institutul SwRI (Southwest Research Institute) din Statele Unite. Aici, începând cu anii 1990, s-a propus și perfecționat

folosirea senzorilor magnetostrictivi (MsS Technology), pentru testarea nedistructivă a cablurilor podurilor suspendate [67]. Tehnologia de testare a fost extinsă și spre alte domenii, precum inspecția conductelor petroliere, inspecția ancorajelor la turnuri și stâlpi și inspecția rezervoarelor.

2.3.2 Tehnici și echipamente

SwRI a dezvoltat și echipamentul necesar pentru testarea cu ultrasunete de joasă frecvență, care a fost folosit cu succes pentru a monitoriza numeroase structuri pe cabluri. Funcționarea sistemului este ilustrată în figura Figura 2.26.

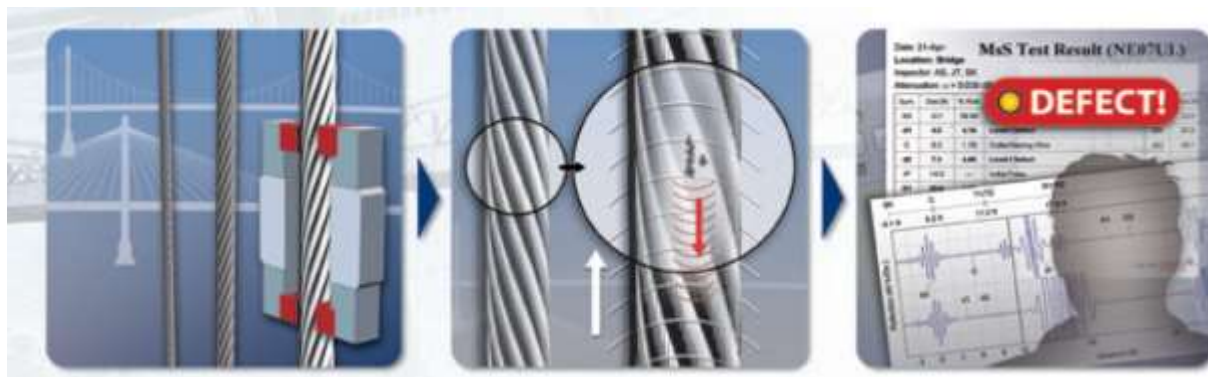


Figura 2.26 Sistemul Cable-Scan, reprodus din [61].

În Figura 2.26 sunt ilustrate cele trei faze ale funcționării sistemului *Cable-Scan*: (1) generarea undelor ultrasonice dintr-un singur punct de test (folosind tehnologia Ms), (2) defectele sau modificarea ariei secțiunii transversale provoacă unde reflectate care sunt detectate de senzorii magnetostrictivi și (3) întocmirea rapoartelor referitoare la degradările sau defectele detectate și la poziționarea acestora.

În Figura 2.27 se prezintă o imagine cu amplasarea în situ a senzorilor. Aceștia sunt legați la aparatul de măsură și apoi, la un dispozitiv de calcul mobil (ex. laptop, notebook) care afișează rezultatele testelor.

Interpretarea rezultatelor obținute în urma unor astfel de testări a cunoscut o mare dezvoltare. Ultrasunetele returnate de senzori pot fi filtrate pentru izolarea celor de interes și, prin diferiți algoritmi de recunoaștere, pentru identificarea naturii degradărilor sau defectelor prin comparație cu o bază de date. În [68] autorii propun o astfel de metodă de izolare a informației, care prezintă interes pentru a identifica degradările structurale din cabluri. Pentru o bună rată de detecție a degradărilor, este extrem de important, ca frecvența ultrasunetelor să fie corespunzătoare situației date. În [69] autorii studiază capacitatea de detecție a metodei ultrasonice a rupturilor succesive ale aceleiași sârme. Se constată că, în cazul unui cablu cu un fir rupt în 3 locuri de-a lungul acestuia, metoda folosită cu ultrasunete de 50 kHz este capabilă ca să detecteze toate cele 3 rupturi, spre deosebire de cazul în care ultrasunetele au frecvența de 320 kHz, când se detectează un singur defect. Acest studiu s-a făcut pe cabluri de pretensionare.



Figura 2.27 Amplasare în situ a sistemului Cable-Scan, reprodus din [70].

2.3.3 Evaluarea rezultatelor

Figura 2.28 prezintă rezultatul testelor pe 4 dintre cablurile unui pod din New York. Primul este un cablu nou, înlocuit chiar înainte de testare, iar următoarele 4 sunt cabluri cu defecțe aflate în uz. SK, Si, Gi reprezintă elemente de fixare ale cablurilor, iar D indică defecțe. Datele au fost culese printr-o singură amplasare a aparaturii pe fiecare cablu, sistemul fiind capabil să analizeze un cablu cu o lungime de aproximativ 100 m (în acest caz), nefiind necesară parcurgerea acestuia (ca la alte metode de testare nedistructivă).

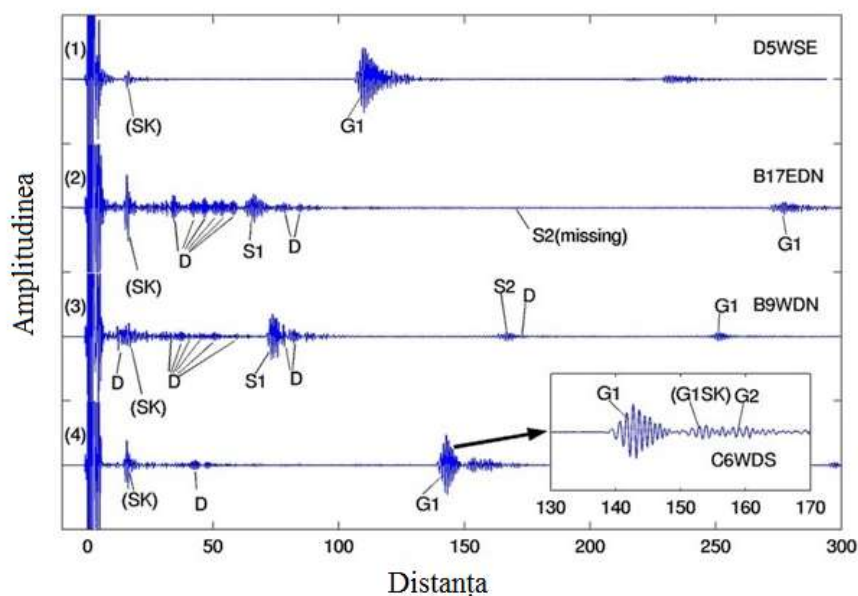


Figura 2.28 Rezultate testării pentru cablurile unui pod suspendat, reprodus din [70].

Monitorizarea cu ultrasunete este o metodă extrem de folositoare și de versatilă, având numeroase avantaje, printre care:

- Este capabilă să detecteze atât defecte de suprafață, cât și defecte în profunzime;
- Detectarea defectelor în profunzime se face cu o acuratețe mai bună decât la celelalte metode nedistructive;
- Este suficientă accesarea unei singure părți a elementului testat;
- Nu prezintă riscuri pentru operator și personalul sau echipamentele din imediata vecinătate;
- Rezultatele sunt instantanee;
- Are și alte capacități, cum ar fi măsurarea grosimilor elementelor;
- Pregătirea suprafețelor de test este minimală.

Unele dintre dezavantajele metodei sunt următoarele:

- Suprafața de test trebuie să transmită ultrasunetele;
- Pregătirea și experiența operatorului este mai importantă decât în cazul altor metode de testare;
- În general, este nevoie de un mediu de cuplare pentru a asigura transmiterea ultrasunetelor în elementul testat;
- În cazul materialelor rugoase, de formă neregulată, foarte mici, sau subțiri și neomogene, obținerea unor rezultate satisfăcătoare este dificilă;
- Degradările sau defectele liniare, așezate paralel cu direcția de deplasare a ultrasunetelor, sunt dificile de detectat;
- Elementele analizate trebuie să fie rezistente la apă în cazul în care acesta este mediul de cuplare.

Investigarea cu ultrasunete a fost folosită pe un număr mare de structuri printre care se numără: podurile George Washington [71], Bronx-Whitestone [71] și Throgs Neck din New York, podul Americilor din Panama [72], podul Walt Whitman din Pennsylvania etc. Cele mai răspândite aplicații ale metodei sunt la cabluri de poduri suspendate sau hobanate și cabluri de oțel pretensionate ale unor elemente de beton.

În cazul podului suspendat George Washington s-a făcut o investigație preliminară în care s-a constatat că rezultatele au fost mai bune decât cele obținute anterior prin alte metode de investigare. Astfel s-a trecut la o investigație amănunțită a elementelor podului dezvoltându-se un sistem de monitorizare care a fost ulterior aplicat și pe podul Bayonne din New York. În cazul podului George Washington s-au folosit unde longitudinale de 10 kHz care au permis inspectarea unui cablu de 100 de metri dintr-o singură locație

2.4 Monitorizarea bazată pe emisii acustice

Emisiile acustice sunt sunete emise la redistribuirea bruscă a eforturilor într-un anumit material supus la acțiuni externe (variație de temperatură, încărcare mecanică etc.). Aceste sunete pot fi înregistrate cu un echipament adecvat, interpretate, iar rezultatele pot da informații referitoare la starea de degradare a materialului.

2.4.1 Istoric și principii de bază

Emisiile acustice preced întotdeauna cedarea elementelor de rezistență (exemple fiind: ruperea unei crengi, sau cedarea stratului de gheață). Acest fenomen a fost observat încă din cele mai vechi timpuri. Cu mult înaintea erei noastre, olarii căutau să identifice sunete în timpul uscării vaselor din ceramică, acestea anticipând cedarea structurală a acestora. O serie de texte de la sfârșitul secolului al XIX-lea fac referire la sunetele emise de materiale precum plumbul, fierul, zincul și cadmiul.

O lucrare de referință în domeniul emisiilor acustice este teza de doctorat a cercetătorului german Joseph Kaiser, intitulată “Rezultate și Concluzii ale măsurărilor efectuate asupra unor metale supuse la eforturi de întindere” (1950).

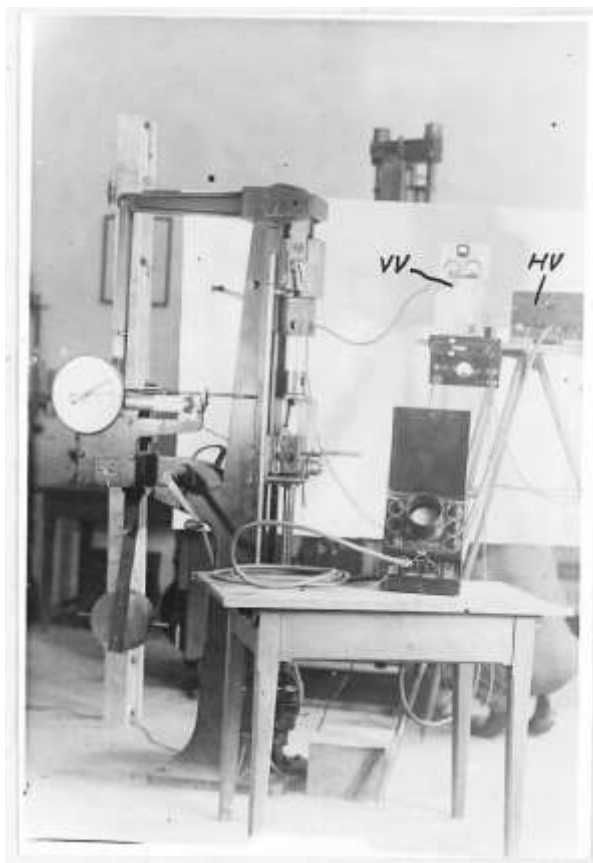


Figura 2.29 Echipamente pentru investigații ale emisiilor acustice [73].

În Figura 2.29 este prezentată aparatura improvizată din echipamente militare din cel de-al Doilea Război Mondial, care a fost folosită pentru primele experimente ale cercetătorului în 1947. Totodată, se observă o presă cu pendul, care era acționată manual, un microfon așezat la partea superioară a elementului testat, două amplificatoare, și un osciloscop.

În anii 1960, investigarea folosind emisiile acustice a captat interesul cercetătorilor. Odată cu evoluția tehnologiei, investigarea cu emisii acustice a devenit o metodă de monitorizare nedistructivă recunoscută și acceptată.

Această metodă se diferențiază de celelalte metode nedistructive de investigare, prin următoarele două aspecte. Primul, se referă la faptul că, în timpul monitorizării se identifică

sunetele emise de material fără a introduce energie în acesta. Al doilea, este faptul că, această metodă identifică procesele active (dinamice).

Emisia acustică este cauzată de inițierea și extinderea unor fisuri în material, de dislocarea sau alunecarea acestuia. Mai precis, emisia acustică este o urmare a efortului din material. Emisiile acustice cel mai ușor detectabile sunt înregistrate în cazul deformațiilor plastice ale materialului.

Testarea folosind emisiile acustice are la bază detecția sunetelor și transformarea acestora în semnale electrice. Analiza acestor semnale poate duce la informații privind originea și natura defectelor înregistrate.

În practică, elementul de test este încărcat până la un anumit nivel și, folosind senzori, emisiile acustice sunt înregistrate, iar apoi analizate. Emisiile acustice la diferite nivele de încărcare, dau informații referitoare la starea de degradare a materialului testat.

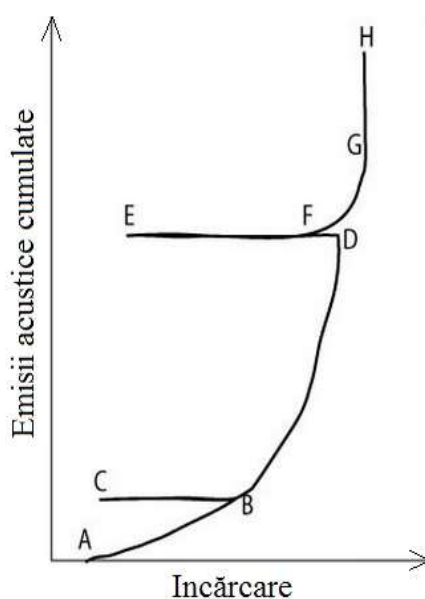


Figura 2.30 Reprezentarea grafică a efectelor Kaiser și Felicity.

În teza sa de doctorat, Joseph Kaiser a arătat că o încărcare care a fost aplicată anterior nu produce emisii acustice. Acestea apar la depășirea acestei încărcări. Altfel spus, discontinuitățile (fisurile) din material nu se extind și nici nu se mișcă, până în momentul în care nu este depășită încărcarea care le-a produs. Acest fenomen se numește efectul Kaiser, și este ilustrat în Figura 2.30:

Curba AB reprezintă evoluția emisiilor acustice, pe măsură ce elementul este încărcat. Dacă încărcarea este înlăturată și reaplicată, atunci comportamentul este descris de segmentul BC; nu apar emisii acustice. Acestea reapar la depășirea nivelului de încărcare B. Dacă se ajunge la o încărcare suficient de mare, atunci efectul Kaiser nu mai apare în totalitate. În punctul F apar emisii acustice, cu toate că nivelul de încărcare D nu a fost depășit. Acest fenomen poartă numele de Efectul Felicity. Cunoașterea (identificarea) celor două efecte într-un material de test, duce la informații despre starea de degradare a acestuia. În cazul în care o încărcare reaplicată produce emisii acustice, se poate trage concluzia că defectele structurale sunt importante.

Emisiile acustice sunt influențate de zgomotul provocat de diferite surse din apropierea senzorilor. Astfel, înregistrările pot fi viciate de vibrații mecanice cauzate de vânt, precipitații etc. Pentru a elimina acest tip de zgomot, s-au dezvoltat o serie de proceduri. Astfel, există senzori speciali, care filtrează zgomotul de fundal; s-au conceput o serie de aplicații software capabile să filtreze înregistrările senzorilor.

2.4.2 Tehnici și echipamente

Pentru detecția emisiilor acustice se folosesc în principal senzori piezoelectrice. Aceștia nu au nevoie de o sursă de alimentare, deoarece undele captate din materialul de test generează curenți care sunt înregistrați în vederea analizei. Fixarea senzorilor este crucială pentru obținerea unor rezultate satisfăcătoare. Aceștia se fixează cu ajutorul unor substanțe de cuplare care pot fi adezivi, vaseline sau alte substanțe vâscoase.

Există în literatură un mare număr de lucrări care abordează investigarea cablurilor folosind emisiile acustice. În lucrarea [74], autorii investighează cabluri încercate la oboseală și afectate de coroziune, aflate în serviciu vreme de 18 ani în structura podului Tianjin Yonghe din China. S-a constatat că, modulul de elasticitate al acestora nu este afectat de apariția coroziunii, spre deosebire de limita de curgere și de rezistența la rupere care sunt puternic afectate. S-a mai constatat faptul, că avansarea degradărilor la oboseală ale cablurilor corodate poate fi exprimată în funcție de curbele energetice de emisii acustice cumulate. În lucrarea [75], autorii au investigat necesitatea monitorizării cablurilor folosind metoda emisiilor acustice. S-a constatat faptul, că este suficientă testarea periodică, pentru a determina gradul de degradare a unui cablu nefiind nevoie de monitorizarea permanentă a acestuia. De asemenea, s-a concluzionat că energia și amplitudinea undelor emise permit o diferențiere clară între rupturi ale sârmelor și alte surse de emisii acustice. La această concluzie au ajuns și autorii lucrării [76], care au investigat comportamentul unor cabluri de lift la forțe de întindere. Un studiu care evidențiază capacitatea metodei de monitorizare cu ajutorul emisiilor acustice, de a detecta defecte ale cablurilor în zonele de ancorare, este prezentat în [77]. Autorii testează cabluri cu fire rupte în ancoraj și arată că acestea pot fi identificate cu metoda de față.

Aparatura necesară este formată din senzori, amplificatoare de semnal, dispozitive de achiziție a datelor și un calculator cu software specializat, toate interconectate. Astfel de sisteme sunt oferite de către mai multe companii. Figura 2.31, Figura 2.32, Figura 2.33 și Figura 2.34 exemplifică un astfel de sistem oferit de către compania Vallen Systeme din Germania. (senzori, aparat de achiziție a datelor, conectate la un calculator)



Figura 2.31 Senzori piezoelectrice și cabluri [78].



Figura 2.32 Senzori piezoelectrice [78].



Figura 2.33 Dispozitiv de achiziție de date, conectat la calculator [78].



Figura 2.34 Amplificator de semnal [78].

2.4.3 Evaluarea rezultatelor

Prelucrarea datelor se face în mod obișnuit cu ajutorul unui software specializat, rezultând reprezentări grafice ale semnalelor transmise de senzori. Specialistul care conduce investigația, este în măsură să interpreteze aceste rezultate.

Figura următoare exemplifică un rezultat obținut de către autorii lucrării [79]. Liniile verticale indică rupturi ale unor fire dintr-un element al unei platforme petroliere. Linia orizontală reprezintă poziția ideală a unui filtru de zgomot.

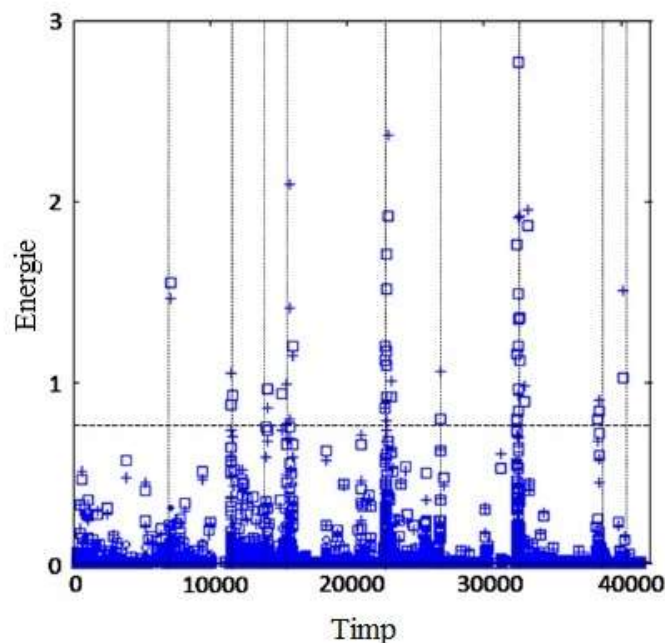


Figura 2.35 Energia acustică emisă de ruperea firelor dintr-un cablu supus la întindere [79].

Printre avantajele metodei de monitorizare folosind emisiile acustice se numără:

- Nu este sensibilă la forma elementului testat;
- Permite monitorizarea globală a unei structuri;
- Monitorizarea și evaluarea se fac în timp real;
- Permite monitorizarea de la distanță;
- Este avantajoasă din punct de vedere economic.

Unele dintre dezavantajele metodei sunt enumerate în continuare:

- Funcționează cu dificultate în medii cu mult zgomot de fundal;

- Pentru a obține informații referitoare la mărimea și locația defectelor, trebuie apelat la alte metode de testare;
- Grad redus de repetabilitate pentru încărcări similare;
- Testele au relevanță mai ales dacă se cunoaște istoricul încărcărilor anterioare;
- Atenuarea emisiilor acustice poate limita relevanța rezultatelor.

Monitorizarea folosind emisiile acustice a fost testată pe o serie de structuri printre care: podul Bronx-Whitestone din New York, Statele Unite, viaductul Milau din Franța [71], podul Forth Road din Scoția [71], podul Penang din Malaezia etc. Structurile sunt dotate cu senzori amplasați în puncte cheie care captează sunetele produse de rupturi de fire sau alte evenimente de interes. Înregistrările sunt procesate cu software specializat astfel localizându-se defectele și determinându-se amploarea acestora [72].

2.5 Monitorizare termală prin infraroșu

Monitorizarea termală prin infraroșu este o metodă de monitorizare nedistructivă, care presupune măsurarea temperaturilor de suprafață a obiectului inspectat.

2.5.1 Istoric și principii de bază

Corpul uman, deși are capacitatea de a detecta căldura, nu o poate și cuantifica. Primul termometru cu mercur, inventat de G. Fahrenheit în 1714, a fost precedat de termosculul inventat de Santorio Santorii (1612). Meritul descoperirii radiației infraroșii este atribuit astronomului William Herschel care, în 1800, a descompus lumina solară cu ajutorul unei prisme și a măsurat cea mai mare temperatură, dincolo de culoarea roșie a spectrului. Următoarea realizare remarcabilă a fost inventarea termocuplului, în 1829, de către Nobili. Legând mai multe termocupluri în serie, Melloni a creat un dispozitiv care, bazat pe efectul termoelectric, era capabil să detecteze un om de la 10 metri distanță. În timpul celui de al 2-lea Război Mondial, tehnologia detectoarelor de infraroșii a fost folosită pentru o serie de aplicații militare. Începând cu anii 1960, imagistica cu infraroșii dezvoltată pentru aplicații militare a devenit disponibilă pe piață. Primele sisteme portabile pentru testare nedistructivă au apărut în anii 1970. În 1992, ASNT (American Society for Nondestructive Testing) a adoptat metoda testării folosind radiația infraroșie, ca metodă standard de test.

Orice obiect care are temperatura peste 0 grade Kelvin, emite radiație infraroșie. Cantitatea de radiație este dependentă de temperatura obiectului și de emisivitatea acestuia.

Detectoarele (senzorii) de radiație infraroșie se împart în senzori termici și senzori cuantici (de fotoni). Senzorii termici absorb radiația infraroșie, acesta ducând la o creștere de temperatură. Această creștere de temperatură generează o diferență de potențial care este dependentă de temperatura înregistrată. Senzorii cuantici identifică fotonii din radiația infraroșie, sunt mult mai sensibili la diferențe de temperatură și necesită o răcire adecvată a aparatului în care sunt încorporați.

Sistemele de termoviziune încorporează astfel de senzori, pentru a crea hărți termice. O hartă termică reală este compusă din nuanțe de gri. Albul marchează zonele cele mai calde iar

negrul cele reci. Culorile de pe hărțile generate de aparatele de măsură sunt generate artificial, pentru a facilita interpretarea rezultatelor.

Principiul de funcționare al unui aparat de termoviziune este următorul. Radiația emisă de obiectul investigat este direcționată prin intermediul unui sistem optic spre senzorii aparatului de măsură. Aceștia produc semnale electrice care sunt preluate de dispozitivele electronice ale aparatului, și transformate în informație vizibilă pe un dispozitiv de afișare.

2.5.2 Tehnici și echipamente

Sistemele de termoviziune sunt variate ca și alcătuire, sensibilitate și scop de utilizare, însă, în toate se găsesc următoarele componente comune: lentile (sistem optic de focalizare a radiației), senzori, componente electronice de procesare, butoane de control, afișaj digital, memorie pentru stocarea informațiilor, și aplicații software pentru filtrare și generare de rapoarte.

Metodele și tehnicile de testare nedistructivă a materialelor sunt în continuă dezvoltare, impulsionate de progresul tehnologic și de nevoile industriei. În lucrarea [80], autorii propun o metodă nouă de investigare a golurilor din interiorul cordoanelor de sudură, folosind metode termografice. În lucrarea [81], metoda de detecție a defectelor propusă de autori este termoviziunea în câmp magnetic alternant de joasă frecvență.

În literatura de specialitate se poate observa un anumit interes pentru investigarea degradărilor și a defectelor în cabluri, cu ajutorul aparatelor de termoviziune. Teoretic, în punctele în care apar concentrări de eforturi, temperatura este mai ridicată, prin urmare ea putând fi detectată. Înregistrarea acestor temperaturi poate să ducă la identificarea defectelor dintr-un cablu. În lucrarea [82], autorii au studiat acest subiect, concluzionând că, metoda poate fi aplicată în anumite condiții, pentru a detecta defecte în cabluri și lanțuri, în locurile unde celelalte metode tradiționale nedistructive nu dau rezultate. De asemenea, s-a constatat că este nevoie de o aparatură foarte sensibilă și de personal calificat, pentru a ajunge la rezultate concludente. Metoda aplicată în cadrul acestui studiu are dezavantajul necesității de a tensiona cablurile de test până la 72% din forța de rupere a acestora. În lucrarea [83], autorii investighează, folosind termoviziunea, deteriorările unor cabluri în zona de ancorare. Concluzia este că, metoda se pretează la detectarea deteriorărilor din cabluri (în zona de ancorare), dar necesită aparatură foarte sensibilă. De asemenea, se propune continuarea studiului, în vederea realizării unor experimente în diferite condiții meteo, pentru facilitarea introducerii în practica curentă de monitorizare nedistructivă a cablurilor. În referința [84], autorul evidențiază aplicațiile metodei de detecție a radiațiilor infraroșii în domeniul industriei maritime. O aplicație se referă la verificarea cablurilor macaralelor instalate pe vase de transport sau pe platformele de încărcare din porturi. Procedura de verificare cuprinde ridicarea repetată a unei greutăți prestabilite, în paralel cu scanarea cablurilor cu aparate cu termoviziune. În cazul în care se identifică puncte cu temperatura mai ridicată, acestea se marchează și, ulterior, se trece la o investigație amănunțită folosind metode de inspecție vizuală, magnetică etc.

Aparatele de detectare a radiațiilor infraroșii sunt extrem de diverse, începând de la simple termodetectoare, până la sisteme complete de termoviziune, în funcție de domeniul de utilizare. Figura 2.36, Figura 2.37 și Figura 2.38 reprezintă exemple de aparatură de detecție cu infraroșii.



Figura 2.36 Detector termic [85].



Figura 2.37 Cameră termoviziune [86].



Figura 2.38 Sistem complex de termoviziune pentru inspecția fuzelajului avioanelor [66].

2.5.3 Evaluarea rezultatelor

Folosirea echipamentelor disponibile în zilele noastre, presupune cunoașterea principiilor de bază ale transferului de căldură și ale radiațiilor. Cu toate că, aparatura este extrem de avansată din punct de vedere tehnic, capacitățile acesteia pot fi puse în valoare numai de către un operator calificat.

Figura 2.39 reprezintă imaginea în infraroșu a unui cablu testat în lucrarea [83]. În Figura 2.40 se prezintă termograme, la nivele diferite de tensionare, pentru aceeași secțiune. Forța de tensionare crește de la (a) la (d).

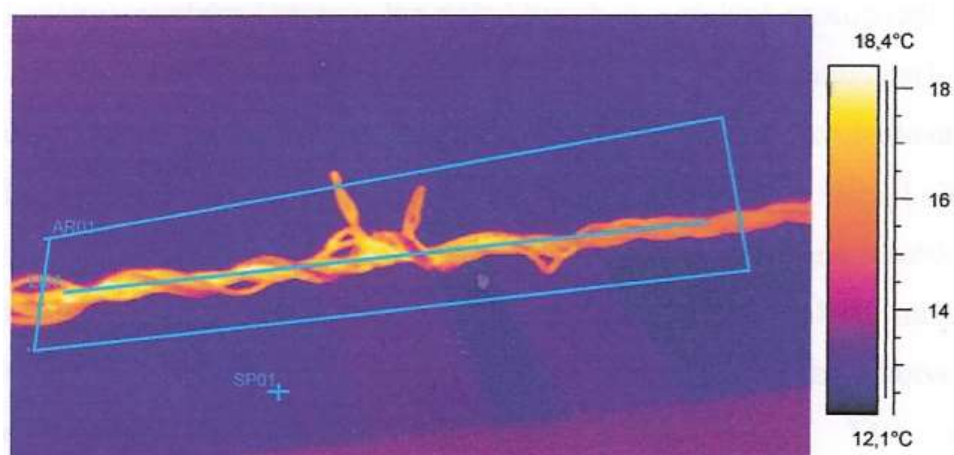


Figura 2.39 Termograma unui cablu, imediat după rupere [83].

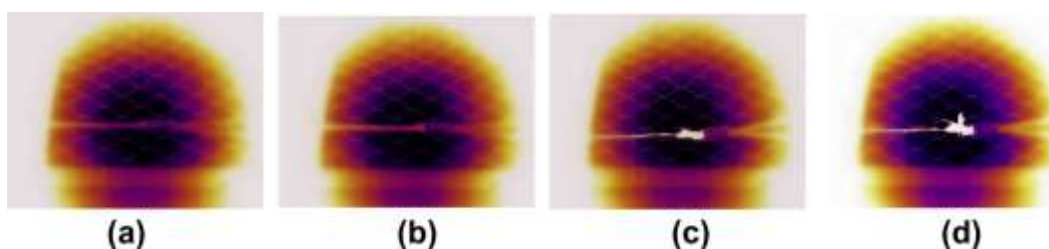


Figura 2.40 Termograme la diferite trepte de tensionare [82].

Printre avantajele metodei se numără:

- Timp scurt de testare;
- Operare facilă a aparaturii;
- Nu există contact între aparatul de măsură și suprafața testată;
- Nu este necesară pregătirea suprafeței testate;
- Rezultate cantitative.

Dezavantajele metodei constau în:

- Rezultate influențate de radiația solară, de umbră, de umiditate;
- Necesitatea calibrării aparatelor (în funcție de emisivitatea materialelor testate) pentru evaluări cantitative;
- Interpretarea rezultatelor necesită expertiză.

Monitorizarea termală în infraroșu a fost aplicată pentru inspecția cablurilor fixe de la instalațiile miniere și de la instalațiile metalurgice în Slovacia la Košice. În lucrarea [87] autorii prezintă rezultate pozitive obținute cu această metodă.

3 Modelul sistemului integrat de monitorizare nedistructivă a structurilor pe cabluri

3.1 Evaluarea cerințelor sistemului supus monitorizării și definirea obiectivelor monitorizării

Motivul principal pentru care se efectuează monitorizarea integrității structurale a cablurilor este evitarea pierderilor de vieți omenești. Totodată, există și motivații secundare, cu o importanță economică ridicată, care implică evitarea pagubelor materiale cauzate de cedarea cablurilor din cadrul structurilor.

Prin monitorizarea cablurilor se poate determina starea lor de „sănătate” și se poate prelungi perioada de utilizare a cablurilor care, chiar dacă au o anumită perioadă de serviciu și ar fi programate pentru înlocuire pe baza unor intervale de timp prestabilite, se află din punct de vedere al rezistenței în parametri siguri pentru funcționare. La polul opus prelungirii utilizării, rezultatele monitorizării pot trage semnale de alarmă cu privire la degradări premature, sau pot releva defecte apărute la unele cabluri care încă nu au ajuns la finele intervalului previzionat pentru înlocuire.

Nu în ultimul rând, monitorizarea cablurilor oferă informații care pot influența modul în care se execută operațiile de întreținere, atât din punct de vedere al momentului în timp, cât și din punct de vedere al reducerii costurilor asociate.

Având în vedere că, majoritatea structurilor pe cabluri au un caracter de unicitate, cum sunt, de exemplu, podurile suspendate/hobanate, instalațiile de transport pe cabluri, instalațiile de ridicare sau instalațiile de pe platformele marine de extracție, proiectarea sistemului de monitorizare nedistructivă diferă de fiecare dată, cel puțin la nivelul componentelor sale care sunt responsabile cu achiziția datelor și cu transmisia acestora spre componentele de procesare.

Prima fază a procesului de proiectare a sistemului de monitorizare implică efectuarea evaluării operaționale a sistemului. Conform [6], evaluarea operațională implică găsirea răspunsului la următoarele întrebări:

1. Care sunt beneficiile, din punct de vedere al siguranței oamenilor și din punct de vedere al câștigului economic, rezultate în urma instalării unui sistem de monitorizare al structurii date;
2. Care sunt degradările, sau defectele structurale monitorizate, și care sunt scenariile de degradărilor cele mai importante de detectat și de evaluat;
3. Care sunt condițiile, atât operaționale, cât și de mediu, în care operează sistemul supus monitorizării;
4. Care sunt limitările achiziției de date în situ.

Răspunsurile exacte la aceste întrebări fac diferența dintre un sistem de monitorizare utilizat doar în scopuri de cercetare-dezvoltare și un sistem de monitorizare cu o evaluare precisă a condițiilor în situ. Pentru găsirea răspunsurilor la aceste întrebări, este necesar

aportul informațional al proiectanților structurii supuse monitorizării, al operatorilor acesteia, al personalului de întreținere, al organismelor independente de control (ex. ISCIR), al experților din domeniul informațional/electric/electronic/automatizări, precum și al altor categorii de specialiști.

3.1.1 Beneficiile monitorizării

În ceea ce privește răspunsul la prima jumătate a primei întrebări, este dificil de cuantificat siguranța oamenilor sau efectele lipsei acesteia, în raport cu cuantificarea beneficiilor economice. În urma prezentării listei restrânse de tragedii de la pagina 9, interpretarea gravității din punct de vedere al numărului de vieți omenești pierdute sau a numărului de răniți, ține de fiecare individ în parte. Totuși, în majoritatea cazurilor, pierderile de vieți omenești sunt urmate de costuri ridicate rezultate din litigiile în care sunt implicați operatorul sau proprietarul structurii și victimele tragediilor.

Costurile asociate cu dezvoltarea sistemului de monitorizare depind de condițiile în care se dezvoltă acesta și, conform [88] se pot distinge două situații: sistemul de monitorizare este dezvoltat în același timp cu structura monitorizată, sau sistemul este instalat ulterior dezvoltării structurii, ca parte a procesului de întreținere a structurii.

Prima situație are avantajul economic al faptului că bugetul sistemului de monitorizare poate fi inclus în bugetul total alocat dezvoltării structurii, buget care este în majoritatea cazurilor mult mai mare decât bugetul destinat întreținerii ulterioare a structurii. În a doua situație, cheltuielile asociate cu: procurarea componentelor fizice ale sistemului de monitorizare (diferitele tipuri de senzori, amplificatoare, componentele de comunicație, filtrare a datelor, componentele de procesare și alarmare etc.), cu determinarea și simularea tipurilor de degradări și ale scenariilor de apariție ale acestora, cu dezvoltarea aplicațiilor software de procesare și de evaluare, și nu numai, pot deveni mult prea mari pentru a putea fi suportate de către un buget obișnuit de întreținere.

3.1.2 Stabilirea degradărilor și a scenariilor de degradare

Performanța sistemului de monitorizare a integrității cablurilor depinde într-o mare măsură de abilitatea proiectanților sistemului, de a defini mulțimea degradărilor care trebuie detectate de sistem și de scenariile de apariție și evoluție a acestora. În al doilea rând, depinde de capacitatea sistemului de a detecta setul de degradări stabilit în faza de proiectare. În al treilea rând, sistemul trebuie să fie proiectat în așa fel, încât să conțină o componentă software capabilă să învețe și despre alte tipuri de degradări decât cele proiectate și să-și actualizeze modelul degradărilor, cu, sau fără intervenția unor experți umani.

La nivelul sistemului de monitorizare proiectat și testat prin experimente, sunt urmărite următoarele tipuri de degradări, în conformitate cu cele prezentate în (subcapitolul 1.7 Degradările cablurilor):

1. Coroziunea externă a cablului;
2. Abraziunea externă a cablului;
3. Fire (sârme) individuale rupte;
4. Reducerea secțiunii cablului;

5. Ruptura totală a unui sau mai multor toroane exterioare;
6. Deformațiile locale reduse;
7. Deformații locale tip „colivie”;
8. Ieșirea în exterior a inimii.

În conformitate cu algoritmi prezentați în [89], degradările de la punctele 1, 2, 3 și 4 sunt încadrate în diferite clase de gravitate, începând de la o gravitate neglijabilă, până la o clasă de gravitate ridicată care necesită înlocuirea secțiunii de cablu afectat.

Pentru fiecare degradare enumerată mai sus, sistemul este responsabil cu:

1. Detectarea prezenței degradării, cu un grad de certitudine cât mai ridicat;
2. Detectarea locației (pe lungimea cablului) unde a apărut degradarea;
3. Stabilirea nivelului de gravitate;
4. Aproximarea evoluției degradării în următorul interval de timp.

În ceea ce privește degradările de la punctele 5, 6, 7 și 8, acestea sunt degradări critice care necesită în cel mai scurt timp posibil întreruperea operării cablului și înlocuirea lui. Pentru aceste tipuri de degradări, sistemul este responsabil cu:

1. Detectarea prezenței degradării, cu un grad de certitudine cât mai ridicat;
2. Detectarea locației (pe lungimea cablului) unde a apărut degradarea.

Determinarea tipurilor de degradări a fost efectuată folosind trei metode. Prima metodă este determinarea ad hoc a defectelor, bazată pe informațiile și experiențele furnizate de experții în domeniul structurilor pe cablu [16], [90]. Aceste informații au fost obținute în urma mai multor ședințe de discuții și au multiple avantaje, incluzând faptul că au fost observate în situ și au rezultat prin acumularea observațiilor cablurilor derulate pe mai multe decenii.

A doua metodă a presupus studiul literaturii de specialitate în domeniul tipurilor de degradări și deteriorări ale cablurilor din [91], [21], [31], [92], [44], [32], [22], [8] și [17]. Costurile cu această metodă sunt cuantificate în timp.

A treia metodă este determinarea degradărilor și defectelor cablurilor prin experimente efectuate sub supravegherea experților în domeniu. Această metodă presupune eforturi în următoarele direcții:

1. Analiza cablurilor scoase din uz datorită defectelor detectate în urma diferitelor tipuri de inspecții (ex. vizuale sau prin procedee magnetice);
2. Analiza cablurilor aflate în serviciu în cadrul sistemelor structurale;
3. Efectuarea de încercări la nivelul cablurilor, inducerea de deteriorări la nivelul cablurilor și încercarea lor ulterioară.

În urma stabilirii degradărilor, ținând cont de faptul că mecanismele degradărilor pot apărea în paralel și că unele degradări mai grave sunt rezultatul apariției a priori a unor degradări minore, s-au stabilit scenariile de apariție a acestora și s-a efectuat o ordonare a acestora în baza priorității pe care o are fiecare scenariu în procesul de detecție.

Stabilirea tipurilor de degradări/defecte urmărite de către sistemul de monitorizare și a scenariilor de apariție asociate acestora, furnizează cele mai importante informații cu privire la arhitectura generală a sistemului de monitorizare, la proprietățile sistemului de achiziție a

datelor, la setul de trăsături extrase din modelul fiecărui defect și la proiectarea algoritmilor de eliminare a rezultatelor fals-pozitive.

3.1.3 Condițiile operaționale și de mediu

Atât condițiile operaționale, cât și cele de mediu în care se instalează sistemul de monitorizare, influențează cerințele care trebuie îndeplinite de către componenta de achiziție a datelor și de către componenta de filtrare și de normalizare a datelor. În timpul testelor efectuate în laborator, pentru definirea tipurilor de deteriorări, a simulării scenariilor de apariție, sau pentru detecția și localizarea lor, condițiile sunt dintre cele mai blânde și permit concentrarea eforturilor pe dezvoltarea componentelor de procesare a datelor.

Totuși, condițiile de mediu în situ diferă considerabil, componenta de achiziție a datelor fiind cea mai puternic influențată de acestea [93]. Influențe negative se întâlnesc și asupra componentelor de transmisie a datelor, conform [88]. Structurile pe cabluri, a căror monitorizare se efectuează cu modelul sistemului propus în lucrare, fie că sunt sisteme de transport pe cablu sau elemente ale podurilor suspendate/hobanate, se află în condiții tipice mediului extern cu temperaturi temperat continentale. Dacă sistemul de monitorizare este proiectat ca să fie utilizat permanent, pe un interval de timp de ordinul anilor, atunci sunt necesare măsuri de protecție a senzorilor:

1. Împotriva prafului și particulelor fine;
2. Împotriva umidității;
3. Pentru controlul variațiilor de temperatură;
4. Împotriva trăsnetului;
5. Împotriva șocurilor mecanice;
6. Împotriva vibrațiilor;
7. Împotriva interferențelor electromagnetice.

Aceste măsuri determină nivelul de rezistență al sistemului de monitorizare la influența zgomotului în detecția degradărilor. Pentru primele două categorii prezentate mai sus sunt efectuate următoarele acțiuni de protecție:

1. Instalarea componentelor de achiziție a datelor, a senzorilor în cutii industriale care corespund cel puțin standardului de protecție IP66 al IEC (International Electrotechnical Commission), similar cu sistemul prezentat în [94].
2. Pentru eliminarea umidității, se folosesc componente electronice cu circuite de control al umidității. Concret, pentru camerele de luat vederi, acestea sunt dotate cu un dispozitiv anti-umiditate care, folosind procesul de electroliză, descompune celule de apă în ioni de hidrogen și oxigen. Ionii de hidrogen sunt evacuați în afara carcaselor de protecție a dispozitivelor electronice, unde, în contact cu oxigenul din aer, formează la loc molecule de apă. Ionii de oxigen ies din zona circuitelor, în urma transformării lor în oxigen molecular stabil.

3.1.4 Limitările achiziției de date în situ

Cele mai importante limitări impuse achiziției de date sunt induse de următoarele surse de natură tehnică:

1. Dimensiunea structurii monitorizate;
2. Lipsa accesul fizic al tehnicienilor la zonele critice ale structurii monitorizate în vederea montării senzorilor, în special, când sistemul de monitorizare este instalat ulterior dezvoltării structurii, cu scopul de a o menține la standarde de operare sigure;
3. Efectul montării senzorilor asupra funcționării structurii.

În urma dezvoltării modelului sistemului de monitorizare s-a constatat și o limitare de natură mai puțin obișnuită. Există multe cazuri, în care operatorul sau proprietarul structurii se teme de reacția publică, a utilizatorilor structurii, în momentul în care aceștia observă componentele hardware de achiziție a datelor, ce se montează pe structură. Aceasta se concretizează prin percepția utilizatorilor, că structura nu mai prezintă siguranță în exploatare, și pierderea încrederii în integritatea și siguranța structurii supuse monitorizării.

Nu în ultimul rând, sunt luate în considerare limitările de natură financiară. Sistemul de monitorizare, a cărui parte integrantă este componenta de achiziție a datelor, trebuie să fie profitabil, să aducă proprietarului structurii avantaje tangibile din punct de vedere economic. De exemplu, costurile asociate cu achiziția și cu instalarea senzorilor nu trebuie să dezechilibreze bugetele anuale de mentenanță a structurii.

3.2 Arhitectura sistemului de monitorizare nedistructivă

În scopul validării conceptelor de monitorizare nedistructivă prin metodele prezentate și în [39], a fost propusă construirea unui sistem bazat pe arhitectura prezentată în Figura 3.1.

Componentele de achiziție a datelor sunt compuse dintr-un sistem de senzori cablați (sau wireless) și din liniile de legătură la componentele de filtrare și de agregare a datelor. Componentele de filtrare și de agregare a datelor reprezintă primele elemente de procesare a informațiilor senzoriale și primesc informațiile de la componentele de achiziție a datelor. Ele realizează în primul rând filtrarea zgomotului, reconstrucția structurilor de date, ordonarea cronologică a datelor senzoriale. iar apoi înaintează informațiile subsistemului de transmisie a datelor. Subsistemul de transmisie a datelor este format din totalitatea componentelor hardware și software ale terminalului prezent la locul structurii de monitorizat, responsabile cu înaintarea datelor către modulele de procesare a datelor și de control al întregului sistem de monitorizare.

Componentele prezentate mai sus, sunt prezente fizic la locația structurii monitorizate, sau în imediata vecinătate a acesteia, în funcție de posibilitățile de alimentare cu energie a componentelor hardware. În ceea ce privește modulele de procesare a datelor și de control al sistemului, acestea sunt localizate la distanță, în cadrul unui laborator de cercetare, în cadrul birourilor specialiștilor care urmăresc rezultatele monitorizării, sau pe o unitate de calcul mobilă conectată la rețeaua Internet.

Modulul de procesare a datelor primește date din două direcții. Pe de o parte, sunt datele obținute de la componentele de achiziție a datelor de pe structură, iar pe de altă parte, sunt necesare datele despre degradări, defecțe și modelele de cabluri, pe care le obține de la o bază de date. Fizic, baza de date se poate afla pe aceeași gazdă ca și modulul de procesare, dar pentru a conferi generalitate sistemului de monitorizare, este mai avantajos ca aceste date să

se așteaptă la o altă locație, chiar și în „cloud”. În urma rulării algoritmilor de la nivelul modului de procesare, unele rezultate se stochează în baza de date și informațiile existente se actualizează.

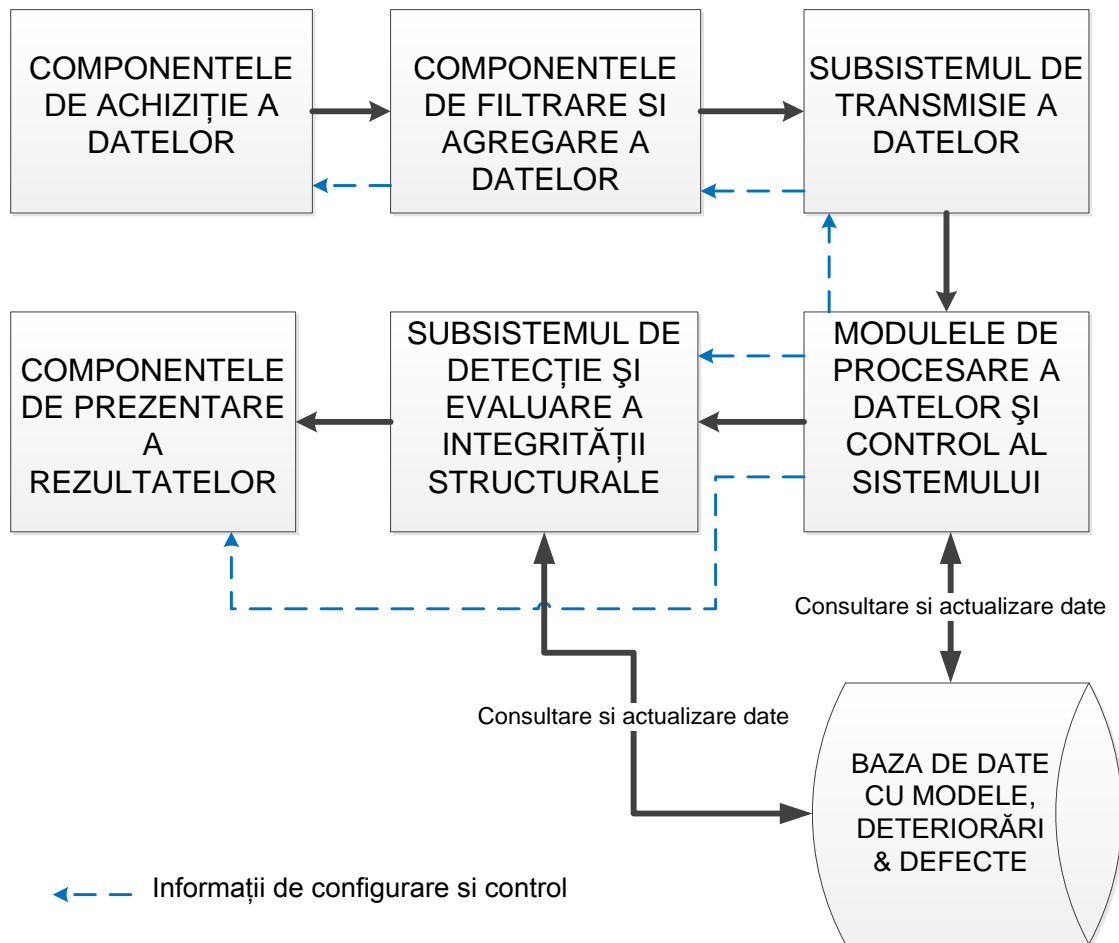


Figura 3.1 Arhitectura sistemului de monitorizare nedistructivă.

Modulul de control al sistemului este componenta responsabilă cu interpretarea cerințelor de configurare primite de la operatorii sistemului de monitorizare. Aceste configurări sunt de mai multe tipuri, incluzând posibilitatea de modificare și de recalibrare a senzorilor, modificarea setărilor componentelor de filtrare, reconfigurarea opțiunilor de transmisie a datelor. Informațiile de control sunt transportate spre componentele periferice ale sistemului de monitorizare prin intermediul componentelor intermediare, iar în Figura 3.1 fluxul de informații de control este simbolizat prin săgețile cu linii întrerupte.

Subsistemul de detecție și de evaluare a integrității structurale este compus din toate componentele software care rulează algoritmii de extragere a caracteristicilor discriminatorii, a celor de interes pentru detecția deteriorărilor și defectelor modelate în baza de date. Totodată, în urma detecției caracteristicilor unei deteriorări prezente în baza de date, conține algoritmii de inferență utilizați pentru evaluarea gravității deteriorării structurale și a modului, respectiv a nivelului la care aceasta afectează integritatea structurală a întregului cablu. Componenta se bazează în mod permanent pe comunicația cu baza de date care conține modelele cablurilor, a defectelor și a deteriorărilor acestora.

În plus, în momentul în care algoritmi de detecție produc rezultate care nu corespund nici modelului unui cablu „sănătos” (care nu prezintă modificări structurale față de model), dar care nici nu prezintă în mod concludent caracteristicile unei deteriorări sau ale unui defect, modulul de detecție și de evaluare rulează algoritmi de învățare a noilor caracteristici ale cablului. Situația prezentată necesită în majoritatea cazurilor inclusiv intervenția experților umani, în vederea clasificării precise a noilor tipuri de deteriorări sau defecte și încadrarea lor în structura informațiilor din baza de date.

Componentele de prezentare a rezultatelor sunt interfața cu utilizatorii curenți ai sistemului de monitorizare. Rezultatele sunt prezentate în formă grafică și prin rapoarte, atât la terminalele prezente fizic în incinta subsistemului de detecție și de evaluare a integrității structurale, cât și la echipamentele aflate la distanță (componentele de prezentare oferă posibilitatea transmiterii rezultatelor către dispozitive mobile sub forma de emailuri, rapoarte, imagini etc.).

Nu în ultimul rând, fiecare dintre componentele sau subsistemele din arhitectura sistemului de monitorizare, oferă o interfață de administrare care permite configurarea fizică individuală a fiecărei componente. Această facilitate există independent de modulul de control prezentat mai sus, și este necesară în situațiile de pierdere a conectivității modulelor sau subsistemelor distribuite în mai multe locații fizice.

3.3 Componentele de achiziție a datelor

Elementele principale din care este alcătuit setul de componente de achiziție a datelor sunt senzorii. Pe lângă senzori, în cadrul componentelor de achiziție a datelor se numără cel puțin următoarele: elementele de fixare sau de prindere a senzorilor de structură, carcasele de protecție și sursele de alimentare.

Senzorii sunt montați pe structură pentru a îndeplini una, sau mai multe, dintre următoarele funcții:

1. Măsurarea mărimilor fizice de interes și urmărirea evoluției acestora;
2. Detectarea deteriorărilor;
3. Furnizarea de date, pentru construirea și validarea modelelor;
4. Cuantificarea incertitudinilor.

În funcție de etapa din viața structurii la care are loc instalarea componentei de achiziție a datelor, se deosebesc două scenarii. Primul, în cazul structurilor deja existente, pe care se montează componentele de achiziție a datelor în vederea înglobării în cadrul sistemului de monitorizare a unor deteriorări sau defecte observate prin alte metode (de ex. prin inspecție vizuală). Al doilea scenariu este în cazul structurilor noi, când, încă din fazele de proiectare s-au stabilit zonele, sau elementele structurii, care prezintă un interes mai ridicat, sau care pot deveni surse ale unor degradări în timp și care trebuie monitorizate de la început. Un astfel de scenariu permite și dezvoltarea unui model inițial al structurii monitorizate, din punctul de vedere al sistemului de monitorizare. Conform [95], modelul inițial este utilizat ca element de referință, pentru comparații ulterioare ale stărilor detectate în timpul monitorizării cu starea inițială, de referință.

3.3.1 Caracteristicile senzorilor

Cea mai dificilă fază în proiectarea, achiziția și montarea componentelor de achiziție a datelor, este stabilirea caracteristicilor senzorilor din cadrul sistemului de achiziție. Conform [96], acest lucru este rezultatul direct al faptului, că mărimile fizice și proprietățile structurii urmărite de către sistemul de monitorizare, se stabilesc în faza de proiectare a acestuia și nu vor mai permite modificări semnificative, odată ce componentele de achiziție sunt montate pe structură.

Cele mai importante caracteristici ale senzorilor sunt: tipul, interfețele de interconectare, numărul lor, locația de amplasare, sensibilitatea, acuratețea, stabilitatea, funcționarea cât mai corectă și mai îndelungată, costul și, nu în ultimul rând, consumul de energie. În general, componentele de achiziție a datelor din sistemele actuale de monitorizare se bazează pe senzori și circuite generale, disponibile pe piață. Totuși, sistemele de monitorizare necesită arhitecturi ale componentelor de achiziție personalizate, de cele mai multe ori având la bază o placă electronică cu multiple porturi de extensie la care să fie montați senzori necesari aplicației curente de monitorizare.

Tipul senzorilor

În etapa de testare, senzorii furnizează informații vizuale sub forma de imagini ale cablurilor inspectate. Pentru un sistem complet de monitorizare, în cadrul componentelor de achiziție a datelor trebuie să mai existe senzori care furnizează:

1. Date despre condițiile de mediu (senzori de temperatură și umiditate);
2. Date despre condițiile dinamice ale structurii (senzori de masă);
3. Date despre comportamentul dinamic (pentru analize avansate d.p.d.v. dinamic liniar și neliniar) [97], [98] și [99].

Principalele două tehnologii de obținere a imaginilor, care au fost luate în considerare în această etapă, au fost camerele de scanare linie cu linie și camerele de achiziție directă a cadrelor (Figura 3.2).

Camerele de scanare a liniilor folosesc o tehnologie de achiziție a imaginii, care dispune de un singur rând de senzori. Imaginea obținută într-o singură expunere a cablului dat este o imagine 1D a unui singur rând de pixeli. Datele secvențiale ale fiecărei linii 1D sunt furnizate unui dispozitiv de tip „frame grabber”, care este responsabil cu asamblarea liniilor pentru a obține o imagine finală bidimensională [100], [101]. Pentru imaginile color se utilizează 2 rânduri de senzori pe care sunt dispuse elemente capabile să surprindă culorile RGB (red, green, blue) – roșu, verde și albastru, numărul senzorilor pentru culoarea verde fiind egal cu numărul senzorilor pentru culorile roșu și albastru la un loc. Această repartitie, patentată de către Bryce Bayer [102], simulează anatomia ochiului uman care are o sensibilitate mai ridicată pentru culoarea verde.

Principalele avantaje oferite de utilizarea acestei tehnologii sunt legate de condițiile operaționale ale cablului inspectat. Pentru viteze ridicate de deplasare ale cablurilor, de exemplu, în cazul cablurilor de transport, timpul de expunere al fiecărui rând de imagine este scurt. Camerele de scanare a liniilor se adaptează la aceste restricții de timp, în mod automat,

având în componență un comutator rotativ care e capabil să acționeze achiziția mai multor imagini simultan [103].

În plus, în situațiile în care condițiile de iluminare ale cablului sunt precare, camerele compensează timpii de expunere reduși, prin utilizarea iluminării concentrate și a tehnicii TDI (Time Delay Integration) – integrarea prin întârziere. Această tehnică permite creșterea timpului de expunere, utilizând mai multe linii de senzori pentru a obține imaginile 1D ale aceleiași linii, pentru un interval de timp proporțional cu numărul de linii de senzori. Conform [104], imaginile unei linii sunt deplasate la o viteză aproximativ egală cu a cablului secvențial, din linie în linie, și însumate în așa fel, încât la final se obține imaginea liniei dintr-un cablu, pentru un timp de expunere egal cu timpul necesar deplasării imaginii 1D prin liniile de senzori.

În concluzie, utilizarea camerelor de scanare a liniilor este avantajoasă în cazul aplicațiilor de inspecție a cablurilor cu viteze de deplasare ridicate, aflate în condiții de iluminare scăzută, care necesită rezoluții ridicate, la viteze de achiziție ridicate.

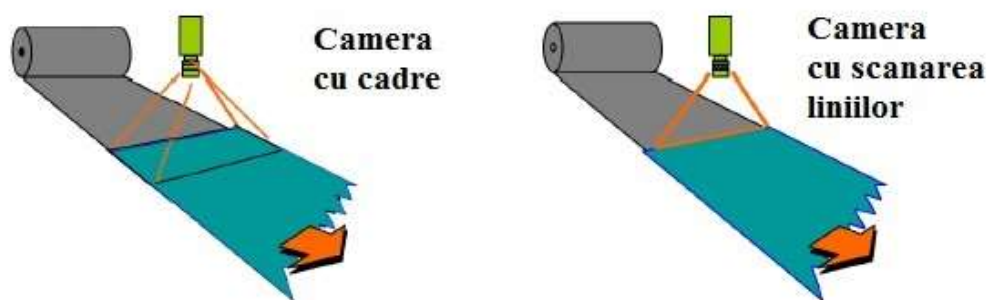


Figura 3.2 Tehnologii de achiziție a imaginilor.

În ceea ce privește camerele bazate pe achiziția cadrelor, acestea utilizează o matrice bidimensională de senzori, astfel încât o imagine completă este surprinsă în timpul unei singure expuneri. Camerele construite utilizând această tehnologie sunt capabile să producă imagini într-un ritm rapid, cu o acuratețe destul de bună a distanței dintre pixeli. Sistemul electronic din construcția camerei este mai simplu decât în cazul camerelor cu scanarea liniilor [105].

Aria de aplicabilitate a acestor camere în cazul cablurilor fixe sau a căror viteză de deplasare este redusă. Iluminarea obiectelor trebuie să fie constantă pe întreaga suprafață fotografiată și, în cazul imaginilor a căror rezoluție trebuie să fie ridicată, timpii de expunere sunt mai mari. De asemenea, conform [104], timpul necesar transferului informației de la senzor la componentele de transmisie a datelor din cadrul camerei, se situează, pentru camerele cu performanțe medii, în jurul valorii de 50 de milisecunde. Acest aspect restricționează numărul de cadre/imagini (ale cablului) care pot fi obținute în jurul valorii de 20 cadre/secundă.

Tehnologiile de producție a camerelor cu rezoluții mari prezintă un dezavantaj suplimentar. La nivelul fizic, senzorii CCD ai camerelor cu rezoluții ridicate au defecte minore ale matricei în dreptul unor pixeli. Aceste defecte sunt mascate prin preprocesarea

software ce are loc în controlerul camerei, prin interpolarea valorii pixelului, pe baza valorii pixelilor din imediata vecinătate a pixelului/pixelilor corespunzători sensorului defect. O situație delicată poate interveni aici în cazul deteriorărilor de mici dimensiuni care se găsesc în imagine chiar în dreptul pixelilor defecti aproximați de controlerul camerei la valori necorespunzătoare. Totuși, în fazele experimentale curente, s-au considerat inexistente astfel de defecte ale camerelor.

Toate aceste aspecte adaugă complexitate sistemului de achiziție a imaginilor cablului, dar întârzierile induse la nivelul sistemului hardware pot fi diminuate prin intermediul optimizării arhitecturii sistemului înglobat de procesare din cadrul camerei [106]. Totuși, în faza de încercări experimentale, avantajul principal al folosirii unor astfel de camere rămâne costul de achiziție scăzut.

Pentru achiziția imaginilor unui cablu de din cadrul unui sistem de transport pe cabluri, este necesară utilizarea unui sistem format din 2 camere plasate în așa fel, încât să permită obținerea concomitentă a imagini celor două jumătăți ale secțiunii circulare a cablului, conform modului de dispunere ilustrat în Figura 3.3.

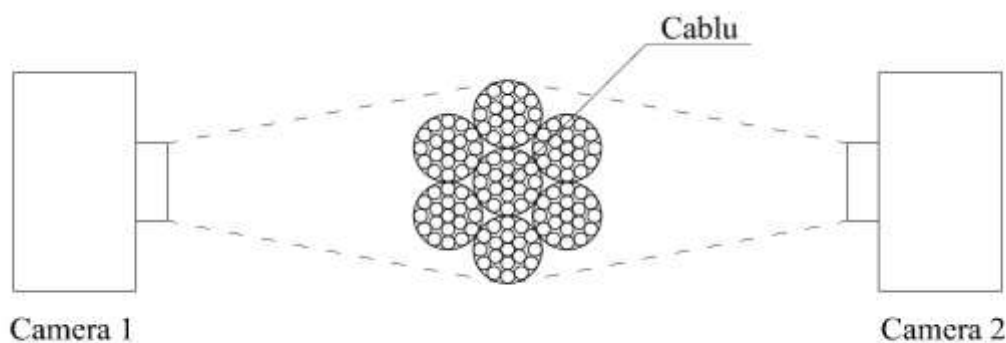


Figura 3.3 Dispunerea camerelor în raport cu cablul.

Cele două camere utilizate pentru testare au fost de tipul Gigasetix Plus2753C, produse de compania Smartek Vision. Din punct de vedere al performanțelor achiziției de date, camera prezintă următoarele caracteristici tehnice [107]:

Rezoluție (înălțime x lățime)	2752 x 2208 pixeli
Rata maximă de cadre	18/8 cadre/secundă
Adâncimea de culoare	8/16 biți/pixel
Dimensiunea pixelului (μm)	4.54 x 4.54
Consum de energie	4.8W
Tipul sensorului	CCD (Charged-Coupled Device) Dispozitiv cu cuplaj de sarcină

Tabel 3.1 Specificațiile optice ale camerei.

În ceea ce privește caracteristicile fizice ale camerei, în conformitate cu manual tehnic [108], acestea sunt :

Dimensiuni externe (î x l x L)	50 x 50 x 48 [mm]
Masa	150g
Carcasa	Aluminiu
Temperatură operațională	-30°C – +60°C
Conectori	RJ45 – 1 Gbit/s Hirose circular cu 12 pini
Intrări digitale	2 canale, opto-izolate
Ieșiri digitale	2 canale, opto-izolate
Alimentare	12V – 24V DC, inclusiv PoE

Tabel 3.2 Specificațiile mecanice și electrice ale camerei.

În Figura 3.4 este prezentată camera Smartek Vision Gigasetix Plus2753C, echipată cu carcasa standard.



Figura 3.4 Camera Smartek Vision Gigasetix Plus2753C

În ceea ce privește achiziția datelor despre condițiile de mediu, aceasta se face prin intermediul nodurilor unei rețele de senzori fără fir (o rețea de tip WSN – Wireless Sensor Network). Nodurile utilizate pentru testare au fost noduri de tip Libelium Wasmote, echipate cu senzori pentru măsurarea temperaturii ambientale, a umidității, și a accelerațiilor pe cele 3 direcții. În plus, conform documentației tehnice [108], producătorul oferă posibilitatea montării pe nod a unor senzori pentru măsurarea deplasărilor.

Datele obținute prin intermediul nodurilor sunt folosite în scopul asistării și calibrării algoritmilor de detecție a anumitor tipuri de degradări ale cablurilor, în conformitate cu [109].

Principalele caracteristici ale nodurilor Wasmote, ilustrat în Figura 3.5 sunt:

- Carcase cu protecție IP65;
- Alimentare cu energie solară prin mini-panouri externe sau interne;
- Comunicație fără fir, prin intermediul standardelor ZigBee, 802.15.4, WiFi, 900 MHz, 3G/GPRS;
- Posibilitatea de configurare de la distanță, de tip OTAP (Over the air programming);
- Interfață grafică disponibilă pentru programare.



Figura 3.5 Nod WSN dotat cu mini-panou solar intern.

Conform [110], există experimente de utilizare a unor camere digitale în cadrul rețelelor de senzori fără fir, amplasate în spitale pentru monitorizarea stării pacienților nesupravegheați de personalul medical, sau pentru aplicații de localizare a persoanelor și de urmărire a deplasării acestora într-o anumită locație [111]. Principala caracteristică a celor două aplicații este faptul că elementele detectate în imagini sunt de mari dimensiuni și nu necesită obținerea din cadrul imaginilor de informații foarte precise despre conturul obiectelor.

Deși, nodul WSN poate fi echipat și cu o cameră foto digitală, cel puțin în prezent, există următoarele dezavantaje care împiedică utilizarea ei în vederea detectării unor deteriorări, precum sărmele rupte din componență cablurilor: rezoluțiile disponibile (aprox. 640 x 480 pixeli) la modelele de pe piață sunt prea reduse pentru a furniza imagini utile pentru acuratețea necesară detectării și, consumul ridicat de energie, asociat cu obținerea imaginilor și cu transmiterea lor în vederea procesării, este prea mare pentru sistemele de alimentare ale nodurilor.

Interfețele pentru interconectarea senzorilor

Modul în care se conectează senzorii din cadrul componentei de achiziție a datelor la celelalte subsisteme și componente ale sistemului de monitorizare, trebuie stabilit încă din primele faze de dezvoltare a monitorizării. Viteza de transmisie a datelor, volumul datelor transmise și periodicitatea cu care are loc transmisia sunt principalele considerente care influențează procesul de alegere a interfețelor de interconectare.

Principala informație furnizată de achiziția datelor sunt imaginile cablului. Aceste imagini cu un nivel ridicat al detaliilor au rezoluții între 3,2 – 5 megapixeli, cu dimensiuni între 4 – 8 Megaocteți și sunt eșantioane multiple pe secundă. Numărul de eșantioane diferă în funcție de tipul de cablu inspectat și în funcție de distanța la care sunt plasate camerele față de

cablu. În plus, sistemul de achiziție este format din două camere, motiv pentru care cantitatea de informație transmisă se dublează. Viteza necesară comunicării imaginilor se încadrează într-un interval începând cu 200 Mbps (megabiți pe secundă). Aceste viteze sunt cel mai bine asigurate de prezența unei interfețe care permite viteze de 1 Gbps (gigabiți per secundă).

Din considerentele prezentate mai sus, s-a considerat necesară echiparea camerelor cu interfață de rețea cablată cu viteza de 1 Gbps. Aceasta permite transmiterea întregii cantități de date cu respectarea intervalelor de timp.

În ceea ce privește interfațarea nodurilor rețelei de senzori fără fir, interfațarea oferită de aceștia prezintă mai multe variante, toate având avantajul folosirii mediilor de comunicare fără fir. Nodurile Waspote permit conectarea în următoarele tipuri de rețele: WiFi, ZigBee (802.15.4) și GSM/GPRS.

În rețele WiFi, principalul avantaj este faptul că nodul poate comunica direct cu orice tip de router WiFi de pe piață. În plus, dacă este necesar, nodul poate comunica informația direct unui dispozitiv mobil, precum un laptop sau un Smartphone. Pe piață există și routere specializate pe obținerea și comunicarea mai departe a informațiilor obținute de la mai multe noduri ale rețelei WSN. Producătorul nodului utilizat în experimente oferă un astfel de dispozitiv router de interconectare a mai multor senzori la o rețea externă. Acesta este în detaliu prezentat în [112]. Singura restricție impusă este ca distanța în linie dreaptă între două noduri ale rețelei, sau între un nod și un router, să nu fie mai mare de 500 m în condițiile în care antenele din componența nodurilor au o putere de transmisie de cel puțin 12 dBm și nu există obstacole în linia directă de vizare.

În cazul interfețelor ZigBee/802.15.4, acestea beneficiază de sensibilitate și putere de transmisie ridicate. În plus, modulele comunică într-o bandă de frecvențe nelicențiată, mai exact în banda ISMB (Industrial Scientific Medical Band). Distanțele la care pot fi dispuse nodurile variază între 2 km – 12 km, în funcție de protocolul folosit, de obstacolele dintre nodurile de comunicație și de puterea antenei. Conform [108], antena trebuie să fie dipol cu un factor de amplificare de minim 5 dBi.

Prin adăugarea unui modul de interfață GSM (Global System for Mobile Communications) / GPRS (General Packet Radio Service) cu o cartelă SIM asociată, senzorul fără fir se poate conecta în rețeaua unui furnizor de servicii de telefonie mobilă atâta timp, cât este într-o zonă de acoperire cu semnal a unui turn, în benzile de frecvență de 950 MHz, 900 MHz, 1800 MHz sau 1900 MHz. Există și o variantă îmbunătățită a modulului, care permite conectarea la rețele UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) / GPRS cu viteze mai ridicate de transmisie a datelor.

Numărul senzorilor și amplasarea lor

Această caracteristică a componentei de achiziție a datelor depinde într-o mare măsură și de nivelul de cerințe pentru alte caracteristici. De exemplu, dacă sistemul de monitorizare trebuie să manifeste stabilitate ridicată, redundanță, funcționare cât mai corectă și mai îndelungată, și bugetul alocat nu este unul minimal, atunci numărul senzorilor va fi unul mai ridicat. Dacă există limitări impuse de cost, sau criterii mai relaxate de stabilitate și redundanță, atunci numărul lor va fi mai scăzut.

Numărul senzorilor depinde în mare măsură și de tipul de structură pe cabluri supus monitorizării. Conform [39] și [41], în scenariul de test implementat pentru monitorizarea cablurilor de tracțiune de la instalațiile de transport pe cablu, tip teleschi sau telescaun, sunt suficienți următorii senzori:

1. Două camere tip Smartek Vision Giganetix Plus2753C, amplasate pe un suport confecționat din inox, atașat la un stâlp de susținere în zona rolor de ghidaj ale cablului metalic tractor, conform ilustrației din Figura 3.3.
2. Un nod fără fir Waspnote montat pe același stâlp de susținere,
3. Un nod fără fir Waspnote montat la următorul stâlp de susținere în amonte, la o distanță mai mică de 500 m.

Pentru situațiile în care are loc monitorizarea cablurilor din componența unei structuri fixe, precum sunt podurile suspendate/hobanate, sistemele de ancorare pe cabluri a antenelor sau a altor structuri, este necesară montarea camerelor și a nodului WSN pe un dispozitiv robotic mobil, similar cu cel prezentat în [42]. În acest caz, dispozitivul este echipat cu două camere și cu un nod Waspnote.

Sensibilitatea și acuratețea senzorilor

Stabilitatea și acuratețea senzorilor, sunt două mărimi care depind de procesul de calibrare al senzorilor. Calibrarea este procesul în care se determină relația dintre mărimile măsurate în situ și datele care ajung, prin intermediul componentele de filtrare și de agregare a datelor transmise, la modulele de procesare a datelor și la subsistemul de detecție și de evaluare a integrității structurale.

Conform [113], stabilitatea senzorului este măsurată prin modul în care calibrarea senzorului variază în funcție de timp. Calibrarea este necesară pentru a putea extrage informații despre distanțe și dimensiuni în spațiul 3D din cadrul imaginilor 2D. Calibrarea include următoarele faze: poziționarea corectă a centrului imaginii în cadrul imaginii fotografiate, reglarea distanței focale, reglarea factorilor de scalare pentru pixeli pe orizontală și pe verticală, reglarea factorului de înclinare, eliminarea efectului de distorsiune indus de către sistemul de lentile.

Datorită faptului că procesarea imaginilor în vederea detectării deteriorărilor implică printre alte operații și comparații ale imaginilor aceleiași secțiuni de cablu, care au fost surprinse la diferite momente de timp, stabilitatea este o caracteristică critică a senzorilor CCD din cadrul camerei. Stabilitatea senzorului este influențată și de abilitatea acestuia de a avea erori la fotografierea aceleiași secțiuni din cablu în condiții diferite de temperatură, umiditate sau de variații rapide ale acestora.

Acuratețea este o caracteristică strâns legată de caracteristicile senzorului CCD și reprezintă precizia cu care se reflectă forma reală a cablului în imaginile acestuia obținute cu ajutorul camerei.

3.3.2 Alimentarea cu energie a senzorilor

Sursele tradiționale de energie pentru componentele de achiziție a datelor, utilizate în actualele sisteme de monitorizare a integrității structurale, sunt:

1. Conexiune la rețelele permanente ale furnizorilor de energie electrică;
2. Conectarea la baterii de acumulatori;
3. Soluții combinate, prin conectarea la rețelele permanente ale furnizorilor de energie electrică și dotarea cu sisteme auxiliare de alimentare de la baterii de acumulatori;
4. Baterii de acumulatori conectate la sisteme de regenerare (ex. energie solară, energie eoliană, vibrații);
5. Soluții de alimentare fără fir.

În cadrul scenariului de test, pentru alimentarea camerelor digitale s-a folosit funcția de PoE (Power over Ethernet) a interfeței Ethernet cu care este echipată camera. Funcția de PoE permite transmiterea de energie electrică continuă, prin același cablu prin care se face transmisia datelor de la cameră. Cablul de date este conectat la un comutator de rețea (switch) compatibil PoE, care furnizează o putere de 15,4 W, conform [114]. Datorită liniilor lungi de cablu RJ45 (de câteva zeci de metri), apare fenomenul de disipare a puterii prin cablu. Totuși, camera necesită doar 4,8 W în modul cel mai performant de operare, iar în testele efectuate de la 50-60 de metri camera funcționează corect. Soluția adoptată pentru alimentarea camerelor presupune existența în situ, în imediata apropiere a structurii monitorizate, a unei rețele fixe de furnizare a energiei electrice și a unui comutator compatibil PoE.

Pentru alimentarea nodului Waspote, se folosește un mini-panou solar intern, inclus în carcasa nodului. Acesta furnizează o tensiune între 7,2 – 12 V, la o intensitate maximă a curentului de 280 mA. Panoul este conectat la o baterie de acumulatori pe care o încarcă. Valorile operaționale ale tensiunii bateriei de acumulatori se încadrează între 3,3 V și 4,2 V, iar capacitatea de stocare a energiei este de 6600 mAh. Soluția de alimentare a nodului este una combinată (prezentată la punctul 4 de mai sus) și conferă independență energetică nodului pe intervale de timp de ordinul anilor.

3.4 Componentele de filtrare și de agregare a datelor

Componentele de filtrare a datelor sunt de două tipuri. Prima categorie sunt componentele hardware incluse în cadrul nodului senzorial fără fir, iar cea de-a doua categorie sunt cele de filtrare a imaginilor. Acestea sunt, pe de o parte, hardware (în cadrul circuitelor integrate ale camerei digitale), puse la dispoziție de către producător, iar pe cealaltă parte, sunt algoritmi de filtrare incluși în cadrul aplicațiilor de preprocesare a imaginilor.

La nivelul filtrării efectuate în aplicație, îndepărtarea zgomotului de tip pixeli albi, sau cu aspect granular, se obține prin aplicarea de filtre mediane cu medii ponderate. În urma aplicării acestui filtru imaginile devin neclare și este necesară aplicarea unor filtre de redefinire a liniilor. Conform [115], aplicarea unui filtru de tip trece-sus îmbunătățește conturul liniilor prin convoluție liniară.

Din cauza vibrațiilor elementelor structurale de care sunt atașate camerele, pot apărea distorsiuni sau neclarități suplimentare în cadrul imaginilor. Efectul acestora este îndepărtat de către algoritmi de preprocesare incluși în cadrul modulelor de procesare a datelor.

Conform [116], procesul de agregare a datelor presupune integrarea datelor provenind de la mai multe surse, cu scopul îmbunătățirii activităților de procesare a datelor. Principalele motive pentru care are loc agregarea datelor sunt:

1. Îmbunătățirea raportului semnal-zgomot;
2. Redundanța și siguranța îmbunătățită a datelor;
3. Toleranța la erori, prin posibilitatea funcționării sistemului de monitorizare chiar și în situația defectării uneia sau mai multor componente de achiziție a datelor;
4. Rezoluția îmbunătățită a datelor;
5. Creșterea siguranței și a certitudinii rezultatelor evaluării, în special în cazurile în care rezultatele procesării datelor provenite de la mai multe componente de achiziție a datelor, ce măsoară aceeași mărime sau fenomen, sunt apropiate calitativ [6];
6. O modelare mai detaliată a întregului sistem monitorizat.

La nivelul componentei de agregare a datelor, folosită în experimente, agregarea datelor are loc centralizat, la nivelul unui singur modul hardware/software, pentru toate sursele provenite de la componentele de achiziție a datelor. Aceasta este o agregare brută, potrivită sistemului experimental, datorită numărului redus de senzori din cadrul acestuia. Sistemele cu număr ridicat de componente de achiziție a datelor necesită tehnici mai elaborate care i-au în considerare agregarea la nivelul caracteristicilor modelului sistemului structural monitorizat sau la nivelul algoritmilor de recunoașterii a formelor.

3.5 Subsistemul de transmisie a datelor

Opțiunile de transmisie a datelor de la nivelul componentelor de achiziție sunt de două feluri: prin medii de transmisie cablate (cu fir) sau prin sisteme fără fir (de tip wireless). Sistemul experimental testat prezentat folosește o structură hibridă. Având în vedere, că transmisia datelor este responsabilă la nivelul unei componente de achiziție cu aproximativ 75% din consumul local de energie, pentru datele a căror volum este ridicat, a căror livrare trebuie să fie sigură și a căror viteză de transmisie trebuie să fie ridicată, s-a optat pentru soluția mediului cablat de transmisie.

Imaginile digitale se încadrează în această categorie, pentru că trebuie să respecte toate cele trei constrângeri prezentate mai sus. În ceea ce privește datele despre condițiile operaționale și de mediu furnizate de către nodul Waspote, acestea pot fi transmise prin sistemul fără fir, pentru că au un volum redus și pentru că au o variație redusă în timp. Este evident faptul, că umiditatea sau temperatura nu variază în interval de câteva secunde, pe când, în același interval de timp, camerele transmit multiple imagini ale cablului.

Pentru interconectarea celor două sisteme, cu fir și fără fir, s-a utilizat o componentă de tip gateway, care furnizează ambele posibilități de comunicare și, în plus, este capabilă să facă legătura la Internet. Echipamentul folosit în test este un gateway ZyXEL UAG5100, descris

pe larg în [117] și care permite conectarea ambelor camere digitale, și conectarea unui număr ridicat de noduri Wasmote, similar cu arhitectura de comunicație prezentată în Figura 3.6.

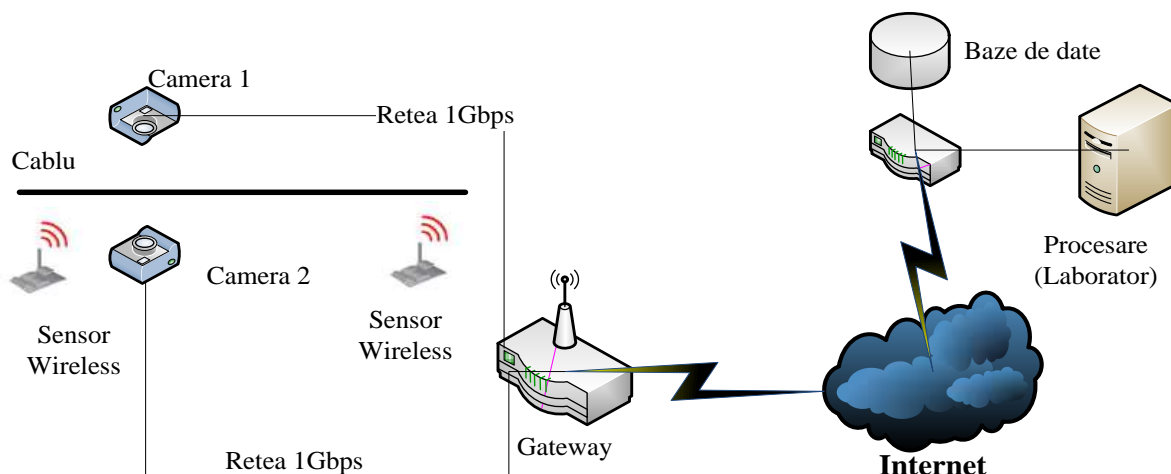


Figura 3.6 Arhitectura rețelelor de comunicație.

Transmisia datelor între camere și gateway se face la o viteză de 1 Gbps, iar dacă distanța dintre camere și gateway este mai mare de 100 m, este necesară utilizarea de repetitoare. De asemenea, gateway-ul este echipat cu interfață WiFi care permite comunicarea cu senzorii din nodurile wireless. Prin intermediul unei conexiuni în bandă largă, datele sunt retransmise de la gateway spre locația unde are loc procesarea și evaluarea integrității structurale a cablurilor. Baza de date cu modelele deteriorărilor și cu celelalte informații necesare în procesul de monitorizare, poate fi la aceeași locație fizică unde are loc procesarea datelor, cum este ilustrat în Figura 3.6, sau poate fi la altă locație fizică și conectată prin Internet la modulele de procesare a datelor.

În cazul în care sistemul supus monitorizării are în componență cabluri metalice de lungimi de ordinul mai multor mii de metri, se va utiliza o dispunere a nodurilor wireless în așa fel, încât acestea să își poată transmite informația celor mai apropiați vecini, care o vor retransmite împreună cu informația achiziționată de ei mai departe, spre alt nod, sau spre un echipament de agregare, de tipul unui router sau gateway. În situația în care nodurile sunt poziționate la distanțe prea mari unul de celălalt sau nu pot comunica direct cu vecinii, se va folosi modulul de 3G/GPRS pentru conectarea în rețelele de telefonie mobilă, pentru transmisia datelor spre echipamentele de procesare. Un astfel de scenariu este prezentat în Figura 3.7.

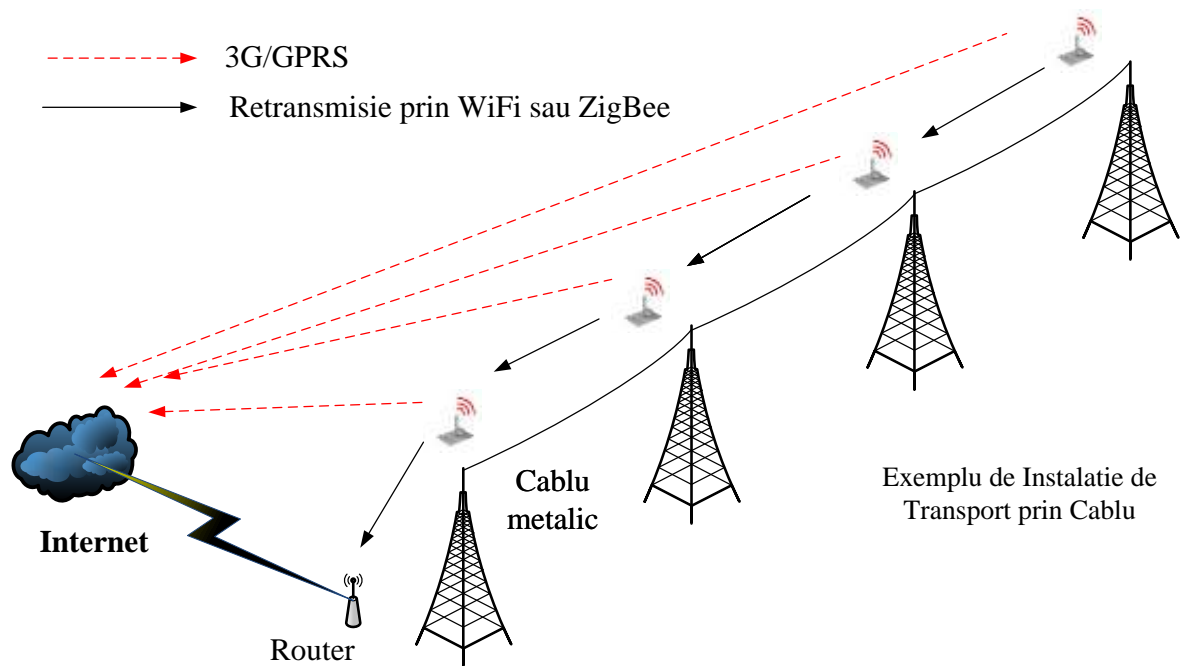


Figura 3.7 Scenariul comunicației prin retransmisii WiFi și/sau rețele UMTS.

În prezent, sistemele de transmisie fără fir a datelor sunt preferate sistemelor cu cabluri, din mai multe motive. În primul rând, sunt mult mai ușor de instalat, costurile cu liniile de comunicație sunt practic inexistente, preluarea și transmiterea semnalului la distanțe mari se poate face prin intermediul nodurilor vecine și, nu în ultimul rând, impactul vizual și posibilitățile de întrerupere a comunicației sunt dramatic reduse [118]. Însă, când cantitatea de informații transmise este ridicată și există restricții importante în ceea ce privește timpul de transmisie și siguranța transmisiei, rețelele de comunicație cablate sunt soluția. Dacă se consideră și faptul că alimentarea și datele pot fi transmise pe aceleași cabluri, varianta cablată devine acceptabilă.

4 Tehnici de detecție a degradărilor și a defectelor cablurilor

În cadrul modulelor de procesare a datelor, în primul rând este întreprinsă construcția modelului 3D al unui cablu, pentru a putea analiza secvența de imagini 2D ale cablului. Imaginile 2D ajung de la componentele de achiziție a datelor, prin intermediul subsistemului de transmisie a datelor. Construcția modelului 3D al cablului este strâns legată de obținerea de imagini ale unui cablu metalic nou, fără degradări sau defecte, care să permită construirea unui model de referință corect.

În cazul experimentelor efectuate în cadrul studiului, s-au folosit segmente de cablu din oțel galvanizat de înaltă rezistență, cu diametre de 12 mm și construcție 6 x 19 + FC și de 16 mm cu construcție 6 x 37 + FC. Cablul de 12 mm este compus din 6 toroane externe (a câte 19 fire fiecare) și cu o inimă din fibre (Figura 4.1), iar cablul de 16 mm este compus din 6 toroane externe (a câte 37 de fire fiecare) și inima din fibre.

Principala problemă în construcția modelului este lipsa contextului geometric din imagini, acestea conținând preponderent informații despre aspectul exterior al cablului și despre textura acestuia. Datorită gradului ridicat al incertitudinii din imagini, s-a folosit o abordare compusă. Aceasta este obținută prin agregarea unui model structural geometric cu un model statistic bazat pe aspectul cablului. În acest fel, s-a putut obține o rată mai bună de diferențiere între o degradare, sau un defect real și variații ale aspectului cablului, cauzat de factorii externi. Sunt considerați și factori externi, și alte componente ale structurii pe cabluri, cum sunt, de exemplu, rolele de la sistemele de ghidaj ale cablurilor de transport, care pot afecta aranjarea toroanelor în cadrul cablului provocând astfel variații ale ariei secțiunii cablului.

Factorii externi de mediu, care diminuează calitatea imaginilor, sunt murdăria de pe cablu, vaselinele, apa, sau pot fi cauzați de condiții nefavorabile de iluminare. Iluminare joacă un rol foarte important în imaginile cablurilor, deoarece acestea au suprafețe care reflectă puternic lumina, și un grad ridicat de strălucire.



Figura 4.1 Secțiune de cablu din oțel, tip 6 x 19 + FC, utilizat în experimente.

4.1 Modelarea geometrică a cablului

Soluții pentru problema modelării cablului pe baza informațiilor din imagini 2D au fost căutate și de echipe de cercetare din Germania. În [119] se prezintă un exemplu de construire a modelului cablului, utilizând metoda analizei prin sinteză. Metoda obține un model 3D parametrizat, pe baza adaptării imaginilor 2D ale cablurilor, prin minimizarea diferențelor dintre ele și generând o proiecție sintetică pentru modelul 3D. Autorii se bazează pe două considerente în utilizarea acestei metode: pe de o parte, pentru ei, problema identificării defectelor cablurilor este interpretată ca o acțiune de estimare a parametrilor cablurilor, iar pe cealaltă parte, compararea imaginilor de intrare cu un model 3D al unui cablu perfect ușurează detecția, localizarea și cuantificarea gravității degradărilor, în raport cu proprietățile cablului.

4.1.1 Modelul 3D al cablului metalic

Pentru măsurarea caracteristicilor cablului, în vederea identificării deteriorărilor și a localizării acestora, în cadrul tezei s-a folosit un model parametric 3D, similar cu cel din studiile întreprinse în [120] și [121]. Modelul cablului este construit conform structurii interne a cablurilor metalice (prezentată în subcapitolul 1.4.1 în Figura 1.2) și conform tipului de cablu ($6 \times 19 + FC$) utilizat în cadrul experimentelor din laborator.

Cablul este compus din 6 toroane a câte 19 fire individuale (modelul este prezentat în secțiune în Figura 4.2). Inima este din fibre și nu este modelată ca atare. Toroanele sunt grupate în jurul inimii și sunt compuse dintr-un număr fix de fire. În model, atât toroanele cât și firele, sunt modelate sub forma unor curbe spațiale elicoidale înfășurate în jurul inimii cablului în cazul toroanelor, sau în jurul axei fiecărui toron în cazul firelor individuale.

În baza acestor ipoteze s-a determinat geometric poziția centrului fiecărui fir în raport cu centrul camerei, centrul camerei fiind considerat punctiform, plasat în centrul lentilei camerei.

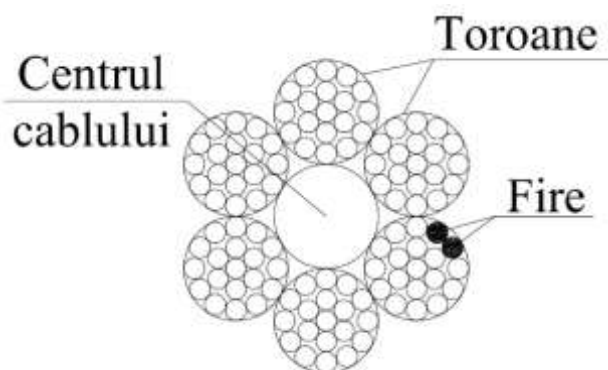


Figura 4.2 Secțiunea modelului 3D al cablului.

Dispunerea geometrică a toroanelor în raport cu centrul inimii FC a cablului este ilustrată în Figura 4.3, iar dispunerea geometrică a firelor în cadrul unui toron în raport cu centrul toronului este ilustrată în Figura 4.4. Linia centrală a oricărui fir $F_{i,j}$, unde i este firul din toronul j , se descrie prin intermediul a două curbe elicoidale întrepesute. Se notează prima curbă cu T_j , care descrie curba spațială a toronului j , și a doua cu F_i , care descrie curba spațială a firului i .

Din punct de vedere parametric, firul i din cadrul toronului j , în raport cu timpul se descrie conform ecuației 4.1, validate și în alte experimente, cum este cazul celui din [119].

$$F_{i,j}(p_T, p_{F_j}, t) = \begin{bmatrix} r_T \cdot \sin\left(t \frac{2\pi}{L_T} + jk_T + o_T\right) \\ -r_T \cdot \cos\left(t \frac{2\pi}{L_T} + jk_T + o_T\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_F \cdot \sin\left(t \frac{2\pi}{L_{F_j}} + ik_F + o_{F_j}\right) \\ -r_F \cdot \cos\left(t \frac{2\pi}{L_{F_j}} + ik_F + o_{F_j}\right) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

unde:

- r_T - distanța de la centrul inimii cablului la centrul unui toron extern,
- r_F - distanța de la centrul toronului la centrul unui fir exterior al toronului,
- jk_T - defazajul toronului j în cadrul cablului,
- ik_F - defazajul firului i în cadrul fiecărui toron,
- $p_T = (L_T, o_T)$ - vectorul parametric al toronului,
- $p_{F_j} = (L_{F_j}, o_{F_j})$ - vectorul parametric al firului în cadrul toronului j ,
- L_T - lungimea înfășurării toronului,
- L_{F_j} - lungimea înfășurării firului în toronul j ,
- o_T - poziția toronului în raport cu defazajul său,
- o_{F_j} - poziția firului în cadrul toronului j , în raport cu defazajul său,
- t - timpul.

Distanța de la centrul inimii FC a cablului la centrul unui toron extern - r_T (ilustrată și în Figura 4.3) s-a calculat pentru fiecare tip de cablu de test, în funcție de specificațiile producătorului și în funcție de măsurătorile cablurilor noi, nefolosite. Măsurătorile efectuate conțin valorile diametrului unui fir - ϕ_F , diametrul unui toron - ϕ_T și diametrul cablului - ϕ_C .

În ceea ce privește defazajul toronului j în cadrul cablului, formula de calcul este prezentată în ecuația de mai jos:

$$jk_T = j \frac{2\pi}{\text{numărul de toroane}} \quad (4.2)$$

Pentru experimentele întreprinse, cablurile au avut un număr de 6 toroane, conform geometriei din Figura 4.2. În Figura 4.3 se prezintă geometria toroanelor în raport cu inima cablului și în raport cu punctul C care reprezintă modelul punctiform al camerei digitale. În plus, sunt ilustrate distanțele și unghiurile de interes în calculele trigonometrice.

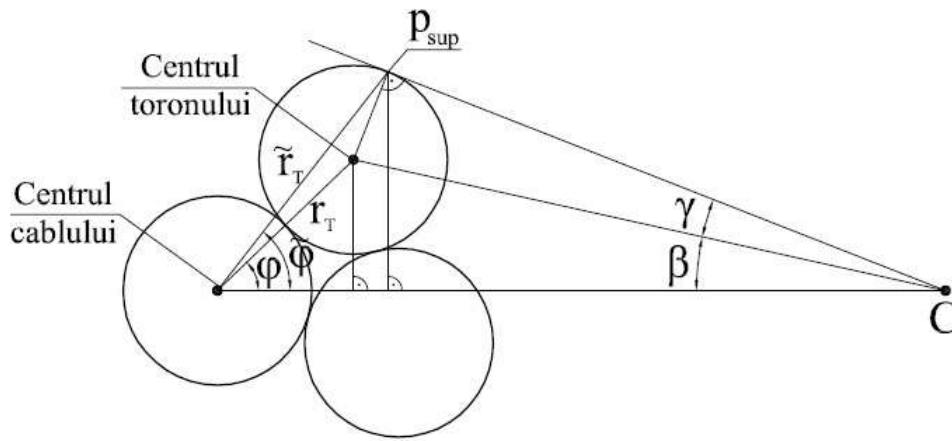


Figura 4.3 Geometria toroanelor în raport cu centrul inimii cablului.

Distanța de la centrul toronului la centrul unui fir de pe suprafața exterioară a unui toron r_F ilustrată în Figura 4.4, s-a calculat pentru fiecare tip de cablu de test în funcție de specificațiile producătorului și în funcție de măsurătorile cablurilor noi de același tip. Defazajul firului individual i în cadrul toronului - ik_F este calculat pe baza formulei din ecuația 4.3.

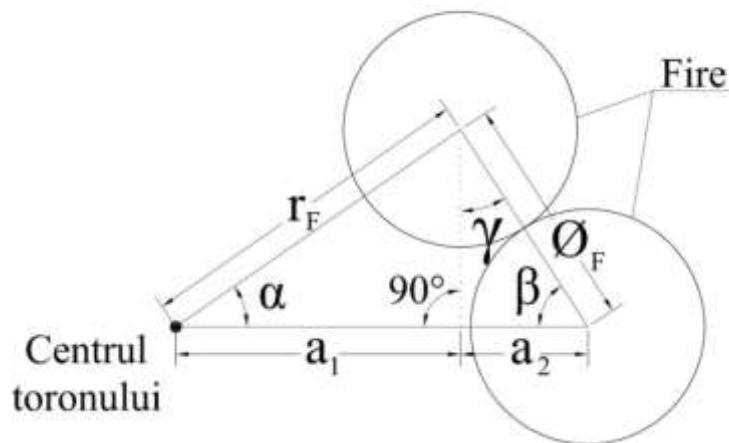


Figura 4.4 Geometria firelor în cadrul unui toron, în raport cu centrul toronului,

$$ik_F = i \frac{2\pi}{\text{numărul de fire}} \quad (4.3)$$

Experimentele efectuate au folosit valori de 19, respectiv 37 de fire în toron. Conform mărimilor ilustrate în Figura 4.4 și prin aplicarea formulelor trigonometrice, se obține ecuația distanței de la centrul toronului la centrul unui fir de pe suprafața exterioară a unui toron r_F . Ecuația 4.4 este descrisă astfel:

$$r_F = \frac{\sin(\beta) \phi_F}{\sin(\alpha)} \quad (4.4)$$

4.1.2 Calculul proiecțiilor 2D ale modelului 3D

Datele achiziționate de camerele digitale sunt 2D și pe baza lor trebuie efectuată comparația cu modelul unui cablu neavariat. Din acest motiv, a fost necesară determinarea

proiecțiilor modelului 3D în plan 2D, pentru a putea fi aplicați algoritmi de detecție a degradărilor. Este foarte important ca să se hotărască tehnologia de achiziție la nivelul fizic a imaginilor, înainte de etapa de stabilire a modului în care se execută operațiile de investigare a imaginilor cablului în raport cu modelul matematic.

Indiferent de tipul de tehnologie de surprindere a imaginilor, în timpul procedurii de achiziție a imaginilor s-a considerat că are loc una dintre următoarele ipoteze:

1. deplasarea cu viteză constantă a cablului într-o direcție perpendiculară pe axa optică principală a sistemului de lentile a camerei, sau
2. deplasarea cu viteză constantă a unui sistem de camere cu orientarea axei optice principale perpendicular pe axul cablului, montate pe un dispozitiv mobil atașat prin intermediul unui sistem de role de cablul inspectat (un exemplu testat pentru cablurile de la podurile suspendate se regăsește în [42]).

În [51], autorul prezintă un experiment de obținere a imaginilor cablului cu ajutorul unei camere digitale dotate cu senzori de tip linie. Acest tip de cameră produce proiecții 1D ale cablului. Tehnica poate fi adaptată imaginilor 2D, prin considerarea liniilor din cadrul unui imagini de sus în jos în corelație cronologică cu momentul achiziției.

În condițiile unei deplasări cu viteză constantă a cablului sau al sistemului de camere și considerând studiile derivate din [100], proiecția punctului - $F_{i,j}(p_T, p_{F_j}, t)$ din modelul 3D al cablului pentru un punct 2D (u, v) se descrie cu ecuația:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} u \\ wv \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f & p_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{V_x} & 0 & 1 \\ \frac{-V_y}{V_x} & 1 & 0 \\ \frac{-V_z}{V_x} & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(F_{i,j}(p_T, p_{F_j}, t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{pmatrix} \right) \quad (4.5)$$

unde:

- f - distanța focală,
- p_v - centrul proiecției pe direcția de deplasare,
- V_x - viteza pe axa x a proiecției,
- V_y - viteza pe axa y a proiecției,
- V_z - viteza pe axa z a proiecției,
- d - distanța fixă de la cameră la cablu.

Datorită faptului că deplasarea cablului, sau a camerei, se produce în lungul axei cablului, rezultă că $V_x = 1$, iar $V_y = 0$ și $V_z = 0$. În plus, punctul din modelul 3D este proiectat cu o distanță focală $f = 1$ și un centrul al proiecției $p_v = 0$. Distanța d de la cameră la cablu se calculează la fiecare experiment în funcție de pozițiile fizice ale camerelor, conform modelului „pushbroom” prezentat în [122].

Din ecuațiile (4.1) și (4.5), proiecția unui punct este sintetizată cu următoarea ecuație:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \\ \frac{r_T \cdot \sin\left(t \frac{2\pi}{L_T} + jk_T + o_T\right) + r_F \cdot \sin\left(t \frac{2\pi}{L_{F_j}} + ik_F + o_{F_j}\right)}{-\left(r_T \cdot \cos\left(t \frac{2\pi}{L_T} + jk_T + o_T\right) + r_F \cdot \cos\left(t \frac{2\pi}{L_{F_j}} + ik_F + o_{F_j}\right)\right) + d} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

4.1.3 Estimarea proprietăților fizice ale cablurilor

Estimarea proprietăților fizice ale cablurilor s-a efectuat în două faze. În prima fază, toroanele din cadrul modelului 3D și proiecțiile lor sunt aliniată prin optimizarea parametrilor din cadrul vectorului parametric al unui toron - p_T . În a doua fază, firele individuale ale fiecărui toron sunt aliniată, conducând astfel la estimarea parametrilor vectorului parametric al firului - p_{F_j} în cadrul toronului j .

Conform studiului modelării din [123], cea mai potrivită strategie pentru o aliniere combinată a tuturor toroanelor este cea bazată pe conturul cablului, pentru că acesta conține toate informațiile necesare. Conturul superior al cablului în raport cu timpul - $c_{sup}^r(t)$ și conturul inferior al cablului în raport cu timpul $c_{inf}^r(t)$ sunt extrase din imaginile de intrare. Pentru contururile superioare și inferioare din cadrul proiecțiilor 2D ale cablului s-a determinat pe cale analitică o descriere. Ilustrația geometrică este prezentată în Figura 4.3.

În cadrul imaginii, centrul toronului este definit prin unghiul φ_T și raza r_T a curbei spațiale a toronului, conducând la determinarea punctului de contur din cadrul proiecției 2D, conform ecuației:

$$\varphi_T = t \frac{2\pi}{L_T} + jk_T + o_T \quad (4.7)$$

Pentru descrierea punctelor din modelul 3D de pe suprafața toroanelor, cum este p_{sup} , se definesc pe Figura 4.3 două noi mărimi: unghiul $\tilde{\varphi}_T$ și distanța \tilde{r}_T . Pe baza acestora se calculează trigonometric poziția punctului de contur în proiecția 2D volumetrică.

În urma calculelor, proiecția curbei T_j descrise în spațiu de toronul j , notată cu \tilde{T}_j , este descrisă prin următoarea ecuație:

$$\tilde{T}_j^{2d}(p_T, t) = \begin{pmatrix} t \\ \frac{\tilde{r}_T \sin(\tilde{\varphi}_T)}{-(\tilde{r}_T \cos(\tilde{\varphi}_T)) + d} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Efectuarea operațiilor de minim/maxim pe coordonata y a proiecției $\tilde{T}_{y_j}^{2d}$ din ecuația de mai sus într-un interval de timp $T = [T_1, T_2]$, furnizează ecuațiile conturului pentru modelul volumetric, prezentate mai jos:

$$c_{sup}^m(p_T, t) = \min_j \tilde{T}_{y_j}^{2d}(p_T, t), \quad \forall t \in T \quad (4.9)$$

și

$$c_{inf}^m(p_T, t) = \max_j \tilde{T}_{y_j}^{2d}(p_T, t), \quad \forall t \in T \quad (4.10)$$

Pentru optimizarea vectorului parametric al toronului p_T , se utilizează coeficientul de intercorelare a două semnale (prezentat pe larg în [124]). Coeficientul notat NCC_{Timp} se

aplică ambelor contururi pentru obținerea vectorului parametric optimizat \hat{p}_T descris în ecuația de mai jos:

$$\hat{p}_T = \arg \max_{p_T} NCC_{Timp} [c_{sup}^r(t), c_{sup}^m(p_T, t)] + NCC_{Timp} [c_{inf}^r(t), c_{inf}^m(p_T, t)] \quad (4.11)$$

Estimarea vectorului parametric p_{F_j} al unui fir oarecare din toronul j , se obține prin calcule similare. Procesul de optimizare a parametrilor are loc separat pentru fiecare fir din cadrul unui toron, deoarece nu toate firele sunt identice. În cazul firelor, coeficientul normalizat de intercorelare este folosit pentru alinierea proiecțiilor reale și sintetice I_{real} , $I_{sintetic}$, pentru intervalul de timp T . Vectorul parametric optimizat al unui fir din cadrul unui toron j este descris prin ecuația de mai jos:

$$\hat{p}_{F_j} = \arg \max_{p_{F_j}} NCC_{Timp} [I_{real}, I_{sintetic} (\hat{p}_T, p_{F_j}, t)] \quad (4.12)$$

În ceea ce privește proprietățile fizice ale cablului, sunt măsurate și interpolate valori pentru pasul de înfășurare al fiecărui toron și pentru pasul de înfășurare al firelor individuale, dar pentru alte proprietăți și distanțe, sunt necesare estimări fixe din punct de vedere temporal, care depinde de fiecare tip de cablu în parte.

4.2 Determinarea caracteristicilor deteriorărilor cablului

Având în vedere că monitorizarea cablurilor are loc la sisteme în funcțiune, majoritatea deteriorărilor detectate vor fi deteriorări de mici dimensiuni și cu efect imediat redus în micșorarea nivelului de siguranță în utilizarea cablurilor, dar care vor semnaliza din timp evoluții către deteriorări cu gravitate mai ridicată care pot conduce la cedarea cablurilor.

Pe baza deteriorărilor urmărite de sistemul de monitorizare propus, a scenariilor de apariție a acestora și identificarea lor, din subcapitolul 3.1.2 se vor analiza individual caracteristicile care prezintă interes, din cadrul modelului geometric al cablului și din cadrul imaginilor cablului.

4.2.1 Caracteristicile coroziunii externe a cablului

În cazul oțelului galvanizat, aspectul suprafețelor firelor din cablu este neted. În general, efectul de coroziune a oțelului galvanizat, utilizat la fabricarea cablurilor, se manifestă prin modificarea aspectului suprafețelor afectate într-unul rugos, cu asperități. Pentru detecția acestei modificări, este necesară analiza texturii în cadrul imaginilor, pentru a putea încadra suprafața într-unul din mai multe nivele de rugozitate. Conform [125], textura este definită ca repetiția, cu un set redus de variații, a unui model, pe o regiune din cadrul unei imagini. De obicei, textura poate fi definită prin intermediul unei funcții matematice. În plus, o a doua manifestare a coroziunii este modificarea culorii metalului în zonele afectate. Aceste modificări presupun efectuarea unei analize din punct de vedere cromatic a imaginilor cablului, pentru detecția coroziunii.

Conform [126], detecția coroziunii cablurilor este îngreunată de prezența pe cabluri a murdăriei fluide, prafului, vaselinelor, sau a apei, și de condițiile de iluminare schimbătoare,

precare, sau variabile în timp. În plus, textura în zonele corodate are aspect aleatoriu, datorită variației modelului texturii în ceea ce privește mărimea, forma, orientarea sau alte proprietăți.

Din studiile prezentate în [127] rezultă că există 4 tipuri de metode de analiză a texturilor, și anume: statistice, structurale, bazate pe model și bazate pe transformate. Metoda utilizată în cadrul detecției coroziunii externe a cablurilor este una hibridă și se bazează pe utilizarea nivelurilor de gri („grey levels”) din cadrul unei imagini. Analiza distribuției intensității nivelurilor de gri din cadrul unei imagini a cablului este fondată pe ipoteza că informația despre textură este conținută de relația în spațiu dintre intensitatea de gri a unui pixel și a vecinilor lui [128]. Informațiile despre textură sunt conținute în matricea de co-ocurență a nivelurilor de gri (GLCM – Gray Level Co-occurrence Matrix).

În cadrul GLCM, distribuția nivelurilor de gri este specificată printr-o matrice de frecvențe relative, în care două elemente de textură etichetate i și j , aflate la o distanță d unul de celălalt și având o orientare q , apar în cadrul imaginii – unul cu proprietatea i , iar celălalt cu proprietatea j .

Modelul matricei GLCM prezentat în [129], prezintă un set de 14 proprietăți ale texturii analizate. În cadrul algoritmilor implementați, pentru experimentele aferente sistemului de monitorizare a fost folosit un set de 5 caracteristici cuprinse în cadrul GLCM, și anume: contrastul, corelația, momentul unghiular de ordin 2, omogenitatea locală și momentul de ordin 2.

Ecuțiile de mai jos descriu formulele de calcul pentru cele 5 caracteristici:

$$\text{contrastul} = \sum_k k^2 \sum_i \sum_j M(i, j), \quad (4.13)$$

$$\text{corelația} = \sum_{i,j} \frac{ijM(i,j) - \mu_i \mu_j}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (4.14)$$

$$\text{momentul unghiular} = \sum_{i,j} M^2(i, j), \quad (4.15)$$

$$\text{omogenitatea} = \sum_{i,j} \frac{M(i,j)}{1+(i-j)^2}, \quad (4.16)$$

$$\text{momentul} = \sum_i \sum_j (i - j)^2 M(i, j). \quad (4.17)$$

unde:

k	- dimensiunea matrice GLCM – 2,
i, j	- indicele liniei, indicele coloanei din matricea GLCM,
$M(i, j)$	- matricea GLCM,
μ_i	- valoarea mediei nivelelor de gri, pe linia i din matricea GLCM,
μ_j	- valoarea mediei nivelelor de gri, pe coloana j din matricea GLCM,
σ_i	- deviația standard pe linia i din matricea GLCM,
σ_j	- deviația standard pe coloana j din matricea GLCM.

Conform definițiilor furnizate în [130], contrastul măsoară variația nivelurilor de intensitate între pixelii vecini și este opusul omogenității locale. Corelația măsoară gradul de dependență liniară a valorilor de intensitate i și j a pixelilor aflați la distanța relativă d unul de celălalt. Pixeli învecinați au o corelație mai ridicată decât cei mai îndepărtați. Momentul

unghiular de ordin 2, denumit și energie totală, reprezintă gradul de ordonare al texturii. Omogenitatea locală este măsura uniformității valorilor de intensitate, furnizând valori scăzute pentru imagini neomogene. Momentul de ordin 2 rafinează calculul omogenității [131].

Prin intermediul omogenității și a contrastului se identifică structurile organizate din cadrul imaginii. Energia și corelația caracterizează complexitatea și natura tranzițiilor nivelelor de gri. Chiar dacă aceste proprietăți conțin informații detaliate despre textură, procesul de asociere a fiecărei proprietăți la o anumită caracteristică a texturii este foarte dificil. Din această cauză, proprietățile definite în ecuațiile de mai sus sunt stocate în componenta modelului cablului din baza de date, pentru a fi utilizate în cadrul procesului de clasificare.

În următoarea fază a procesului de clasificare este necesară utilizarea atributelor de culoare. În mod tradițional, imaginile surprinse de camerele digitale folosesc sistemul cu 3 canale de culoare, de tip RGB, asociate culorilor roșu, galben și albastru. Totuși, pentru extragerea informațiilor de culoare din cadrul imaginilor cablului, este mai potrivit sistemul HSI (Hue Saturation Intensity) - (Nuanță Saturație Intensitate) adaptat modului în care ochiul uman percepe informația de culoare. Sistemul HSI permite descrierea caracteristicilor de culoare, separat de cele despre luminozitate și cromaticitate.

Transformarea informațiilor de culoare din modelul RGB în modelul HSI, se face conform formulelor de mai jos:

$$Nuan\c{a} = \frac{R+G+B}{3}, \quad (4.18)$$

$$Satura\c{t}ie = \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)], \quad (4.19)$$

$$Intensitate = \cos^{-1} \frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}}. \quad (4.20)$$

Nuanța este proporțională cu frecvența culorii, iar în cadrul culorilor care însoțesc fenomenul de coroziuni aceasta se situează între lungimea de undă aferentă culorii galben și cea aferentă culorii roșii.

Saturația se referă la nuanța dominantă în cadrul unei culori. În imaginea unui cablu afectat de coroziune externă, suprafețele firelor sau toroanelor acoperite de coroziune au o valoare a saturației mai ridicată decât în zonele neafectate. Acest lucru se datorează faptului că, cel mai adesea suprafețele firelor și ale toroanelor intacte sunt de culori deschise, strălucitoare, care tind spre culoarea oțelului galvanizat curat.

Intensitatea descrie cât de apropiată este luminozitatea suprafețelor de lumina albă pură. Cu cât valoarea intensității este mai ridicată, cu atât este apropierea mai mare. Suprafețele afectate de coroziune au intensități reduse, spre deosebire de cele neafectate care au valori mai ridicate ale acesteia.

Atributele de culoare s-au obținut prin extragerea momentelor statistice din fiecare histogramă a canalelor H, S și I. Histogramele s-au calculat pe baza unei adâncimi de culoare de 24 de biți/pixel, fiecare culoare având 256 de valori posibile și, în consecință, existând 256 de valori normalizate și pentru nuanță (H), saturație (S) și intensitate (I).

Histograma s-a definit pe fiecare canal, ca setul de frecvențe x_i , unde $i= 0..N$ (în cazul de test $N = 255$). Momentul statistic de ordinul 1 indică poziția culorii individuale în cadrul spațiului HSI. Momentul statistic de ordinul 2 conține informații despre dispersia distribuției de culoare și despre mărimea acesteia. În cazul suprafețelor de cablu corodate, mărimea acestui moment are variații ridicate. Momentul statistic de ordinul 3 indică asimetria informațiilor de culoare în jurul mediei pe imagine și indică situațiile când valorile HSI se află în zonele de început, sau de sfârșit ale scalei HSI. Momentul statistic de ordinul 4 indică zonele de planitate (de valori aproximativ monotone) și zonele de vârfuri din cadrul distribuției de culoare. Cele 4 momente sunt descrise prin ecuațiile de mai jos:

$$E(X) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n, \quad (4.21)$$

$$E\left((X - E(X))^2\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - E(X))^2, \quad (4.22)$$

$$E\left((X - E(X))^3\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - E(X))^3, \quad (4.23)$$

$$E\left((X - E(X))^4\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - E(X))^4. \quad (4.24)$$

unde:

X - variabila aleatoare corespunzătoare intervalului de frecvențe.

În concluzie, în baza de date aferentă descrierii proprietăților în imagine a coroziunii externe, s-au utilizat 3 clase de caracteristici: cele 5 caracteristici ale texturii, caracteristicile de culoare (conform modelului HSI) și caracteristici mixte de textură-culoare. Procesul de clasificare și de analiză discriminantă a acestor proprietăți s-a bazat pe logica fuzzy [89] și este descris în subcapitolul 5.1.2 al lucrării.

4.2.2 Caracteristicile abraziunii externe

Principiul aplicat pentru detecția abraziunii externe a cablului presupune efectuarea unor operații de analiză a informațiilor despre culoare, iar apoi operații de măsurare a diametrului și de calcul a ariei secțiunii cablului.

În cazul imaginilor cablurilor afectate de abraziunea externă, s-a observat că datorită aplatizării și „șlefuirii” suprafețelor exterioare ale firelor apare un fenomen de descoperire al metalului din interiorul firelor individuale. Acest fenomen determină o modificare în culoarea cablului, care este asociată cu fenomenul de abraziune externă. Spectrul de frecvențe al zonelor afectate de coroziune este în zona frecvențelor nuanțelor de gri deschis. Caracteristicile de culoare sunt cele ale modelului de culoare HSI și se calculează similar cu cele din subcapitolul 4.2.1, referitor la tratarea caracteristicilor de culoare ale coroziunii externe a cablurilor.

Pentru efectuarea operațiilor de măsurare a diametrului și pentru calculul ariei secțiunii cablului este necesară efectuarea detecției muchiilor. Detecția muchiilor este procesul prin care din imaginea 2D se extrage doar un set de curbe. Din cadrul acestor curbe se extrage informația despre linii, colțuri, schimbări de direcție etc. Această informație conținută de

muchi este mult mai compactă decât informația conținută în pixelii individuali și este folosită de algoritmi de recunoaștere a formelor, pentru a determina caracteristicile dimensionale ale elementelor din imagine.

În cadrul imaginii, muchiile sunt determinate de o varietate de factori, cei mai importanți fiind:

1. Discontinuități apărute pe suprafețe;
2. Discontinuități în percepția adâncimii în imagini;
3. Discontinuități de culoare, schimbări de culoare;
4. Discontinuități de iluminare;
5. Discontinuități în texturi.

Pentru detecția muchiilor sunt parcurse patru faze. În prima fază are loc o „netezire” a imaginii, pentru îndepărtarea zgomotului, dar fără a deteriora muchiile. A doua fază este amplificarea imaginii prin aplicarea unui filtru care să producă un efect de ascuțire a muchiilor. În a treia fază are loc detecția propriu-zisă a muchiilor, prin împărțirea pixelilor din zonele de discontinuitate ale imaginii în pixeli care aparțin muchiei și sunt păstrați și pixeli care vor fi considerați zgomot și vor fi ulterior eliminați. În a patra fază are loc procesul de localizare exactă a muchiei, prin procedee care folosesc și rezoluții la nivel de subpixel [125].

Fiecare punct al muchiei are 4 descriptori:

1. Vectorul unitate, normal la muchie - are direcția perpendiculară pe muchie și sensul spre valoarea maximă a discontinuității de intensitate.
2. Vectorul unitate de direcție a muchiei – are direcția perpendiculară pe vectorul unitate normal la muchie.
3. Poziția muchiei – locația pixelului de pe muchie în cadrul imaginii.
4. Intensitatea muchiei – valoarea locală a contrastului, pe direcția normalei la poziția pixelului muchiei.

În cadrul imaginii, o muchie separă două regiuni ale imaginii de intensitate diferită. Muchia este cel mai clar definită în zona de variație maximă a intensității. Având în vedere faptul că, din punct de vedere matematic, o imagine este o funcție $f(x, y)$, modul cel mai simplu de a calcula poziția muchiei este prin utilizarea derivatelor. Punctele de pe muchie se detectează prin calcularea valorilor maxime și minime ale derivatelor parțiale de ordinul 1 pe direcțiile x și y și prin calcularea punctelor în care derivatele parțiale de ordinul 2 sunt nule.

Din punct de vedere matematic, derivatele parțiale de ordinul 1 pe cele două direcții definesc gradientul. Gradientul indică sensul în care are loc cea mai bruscă schimbare în valoarea intensității și este definit prin ecuația de mai jos:

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right] \quad (4.25)$$

Direcția gradientului este furnizată prin intermediul unghiului θ și este întotdeauna perpendiculară pe direcția muchiei. Formula de calcul este descrisă prin ecuația următoare:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \right) \quad (4.26)$$

Intensitatea muchiei este determinată de magnitudinea gradientului, descrisă în ecuația următoare:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (4.27)$$

Deși, matematic gradientul se calculează pentru un spațiu continuu al funcției $f(x,y)$, în cadrul imaginilor digitale se folosesc diferențele finite. Datorită faptului că într-o imagine digitală diferențele minime pe direcțiile x și y sunt $h_x = 1$ și $h_y = 1$, componentele gradientului pe direcțiile x și y sunt definite prin ecuațiile de mai jos:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{h_x \rightarrow 0} \frac{f(x+h_x, y) - f(x, y)}{h_x} = f(x+1, y) - f(x, y), \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{h_y \rightarrow 0} \frac{f(x, y+h_y) - f(x, y)}{h_y} = f(x, y+1) - f(x, y) \quad (4.29)$$

Următorul pas presupune aplicarea pe matricea imaginii a operației de convoluție. Convoluția presupune scanarea fiecărui pixel dintr-o imagine, sau dintr-o porțiune dreptunghiulară a acesteia, cu ajutorul unei ferestre, iar pentru fiecare pixel se calculează o valoare de ieșire care este egală cu media ponderată a pixelilor de intrare din cadrul ferestrei. Fereastra se numește filtru sau mască de convoluție, iar fiecărui pixel din fereastră îi este atribuită o pondere. Pixelul de ieșire a cărui valoare se calculează pe baza măștii de convoluție, poartă numele de nucleu de convoluție.

Cea mai simplă aproximare a gradientului se realizează cu ajutorul filtrelor de detecție a muchiei de tip Roberts, ale căror măști de convoluție sunt descrise mai jos:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad M_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Deși, operatorul Roberts permite efectuarea cu rapiditate a calculelor în domeniul 2D, furnizează rezultate ale detecției cu acuratețe ridicată doar pentru muchiile cu o orientare de $\pm 45^\circ$ și $\pm 135^\circ$ pe cercul trigonometric [132]. În plus, calculul are loc pentru o poziție interpolată a pixelului $[x + 1/2, y + 1/2]$, aflată între pixelul curent $[x, y]$ și următorul pixel de la poziția $[x + 1, y + 1]$.

Pentru eliminarea dezavantajelor legate de poziția interpolată a punctului și de limitarea unghiurilor de orientare, pentru calculul gradientului sunt introduși operatori care folosesc o fereastră de minim 3×3 pixeli în jurul pixelului curent. Primul astfel de operator este operatorul Prewitt. Acesta este capabil să detecteze cu acuratețe 8 orientări ale muchiei, în jurul valorilor de $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$ și $\pm 135^\circ$ pe cercul trigonometric [133]. Măștile aferente filtrului Prewitt sunt descrise astfel:

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Al doilea operator care folosește o mască de 3 x 3 pixeli este operatorul Sobel. Aplicarea detecției muchiilor cu ajutorul operatorului Sobel presupune următorii 3 pași (descriși în detaliu în [134]):

1. Efectuarea operațiilor de convoluție folosind filtrele Sobel;
2. Calcularea magnitudinii gradientului pe baza pasului 1;
3. Aplicarea pragului.

Pentru primul pas, măștile aferente filtrului Sobel pe cele 2 direcții sunt descrise astfel:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Valoarea nucleului de convoluție în punctul $P(x,y)$ este calculată pe baza formulei de mai jos:

$$P(x,y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 S_x(i,j) \cdot I(x+i, y+j) \quad (4.33)$$

unde:

- x, y - poziția corespunzătoare intersecției diagonalelor filtrului S_x ,
- i - indicii liniei în filtrul S_x , (valoare -1 corespunde primei linii, 0 celei de a doua, 1 celei de a treia),
- j - indicii coloanei în filtrul S_x , (valoare -1 corespunde primei coloane, ș.a.m.d.),
- $I(x,y)$ - valoarea pixelului din imaginea sursă,
- $P(x,y)$ - valoarea pixelului de ieșire, corespunzător nucleului de convoluție.

În practică, valoarea de ieșire a pixelului $P(x,y)$ se normalizează prin împărțirea rezultatului aplicării formulei de mai sus la valorile $4 \cdot \sqrt{2}$ sau 8. Principala deosebire a operatorului Sobel față de operatorul Prewitt este faptul că acesta pune accent, prin intermediul valorilor ponderilor, pe pixelii vecini orientați pe direcțiile 0° , $\pm 90^\circ$ și 180° față de poziția nucleului de convoluție pe cercul trigonometric.

Deși, pe parcursul etapelor de documentare au fost testați operatorii de detecție a muchiilor descriși mai sus, pentru detecția conturului cablurilor metalice a fost utilizată metoda Canny, descrisă pe larg în [135] și sintetizată în paragrafele de mai jos.

Soluția propusă de Canny [135] este axată pe trei probleme majore pe care le au majoritatea tehnicilor de detecție a muchiilor. Prima, este rata ridicată de eroare a tehnicilor de detecție a muchiilor care, fie nu identifică toate muchiile din zona de interese a imaginii, fie furnizează muchii duble. A doua problemă este legată de localizarea muchiilor și constă în existența unor diferențe de poziție între poziția pixelilor de pe muchie returnată de majoritatea algoritmilor de detecție și poziția reală a acestora pe imagine. Aceste diferențe scad gradul de acuratețe a măsurătorilor efectuate în imagine pe baza pozițiilor determinate pentru muchii. Aceasta problemă a fost și principalul motiv pentru care, în cadrul experimentelor pentru determinarea performanțelor sistemului de monitorizare structurală a cablurilor, s-a decis utilizarea metodei Canny pentru detecția muchiilor. A treia problemă este existența răspunsurilor multiple în timpul detecției muchiilor, adică, a liniilor multiple pentru aceeași muchie detectată [136].

Aplicarea metodei Canny pentru detecția muchiilor presupune 4 etape, prezentate mai jos:

1. Filtrarea sau „netezirea” imaginii cu ajutorul unui filtru Gaussian, în vederea eliminării zgomotelor [137].
2. Efectuarea calculelor de magnitudine și de direcție a gradientului.
3. Aplicarea suprimării non-maximelor pe magnitudinea gradientului.
4. Efectuarea operațiilor de binarizare adaptivă cu două praguri a punctelor de pe muchie și de prelungire a acestora prin operația de histereză.

Apariția zgomotului în imaginile digitale este un proces inerent procesului de achiziție a imaginilor. Zgomotul care trebuie filtrat în prima etapă, se manifestă ca o informație cu frecvență înaltă, care se suprapune peste imaginea originală. Acest zgomot produce apariția unor puncte de muchie false și are un model Gaussian [137]. Zgomotul Gaussian modelează cel mai bine procesele naturale care induc zgomot în imagini, cum ar fi: natura discretă a radiației, procesul de conversie al semnalului optic în semnal electric la nivelul CCD, amplificarea etc.

Zgomotul Gaussian are o funcție a densității de probabilitate descrisă prin ecuația de mai jos:

$$FDP_{Gaussian} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(g-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.34)$$

unde:

- g - nivelul de gri,
- μ - media,
- σ - deviația standard.

Proiectarea dimensiunii w a filtrului Gaussian se face în funcție de dimensiunea deviației standard σ a zgomotului Gaussian care afectează imaginea și are de obicei valori de ordinul $6 \times \sigma$. Pentru a obține timpi de execuție scurți, în experimente s-au folosit valori $w = 5$ sau $w = 7$, care corespund unor deviații standard $\sigma = 0,83$ și $\sigma = 1,16$.

De exemplu, pentru filtrul Gaussian cu dimensiunea măștii de convoluție de 5×5 , cu deviația standard de $\sigma = 0,83$ și cu nucleul măștii de convoluție situat la intersecția diagonalelor măștii în poziția $G(x_c, y_c) = (3, 3)$, formula de calcul pentru mască de convoluție este:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.35)$$

unde:

- x, y - au valori cuprinse între 1 și 5.

În etapa a doua se calculează cele două proprietăți ale gradientului, magnitudinea bazată pe formula din ecuația (4.27) și orientarea bazată pe unghiul θ , calculat cu ajutorul formulei din ecuația (4.26).

Etapa a treia constă în suprimarea non-maximelor din mărimea gradientului, care are ca efect subțierea muchiilor prin păstrarea doar a acelor puncte de pe muchie care au magnitudinea maximă a gradientului pe direcția de variație a intensității de-a lungul direcției gradientului.

Pentru dimensiunea $w = 5$ a filtrului Gaussian, pe cercul trigonometric se obțin 16 intervale de câte $22^{\circ}30'$ (în conformitate cu Figura 4.5). Astfel, fragmentele de muchie pot avea 16 orientări, începând de la 0° și continuând cu incrementuri de $22^{\circ}30'$. Cele 16 zone de aproximare la valoarea unghiului din mijlocul intervalului sunt numerotate de la 1 la 16.

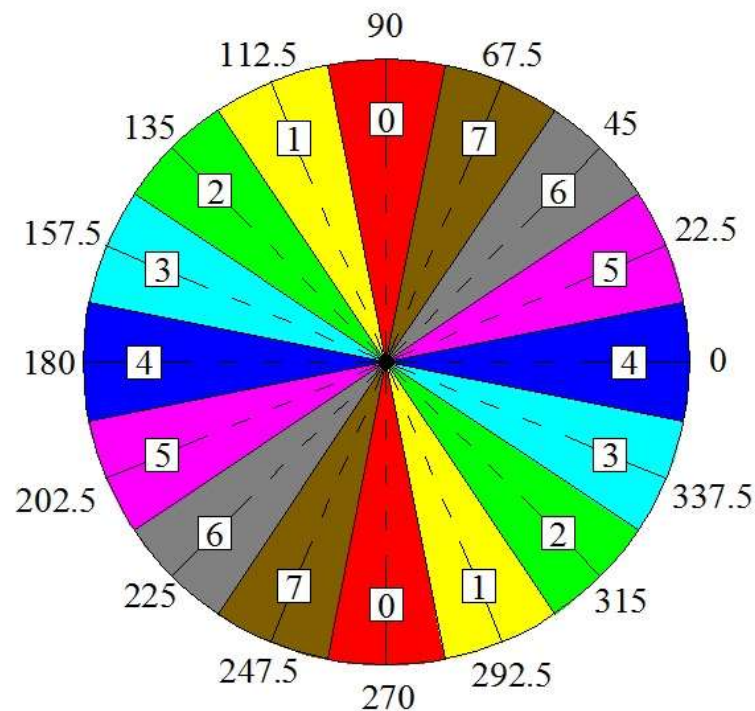


Figura 4.5 Cuantificarea direcțiilor gradientului pentru $w = 5$.

Pentru creșterea preciziei orientării muchiilor, s-au efectuat și experimente utilizând un filtru Gaussian cu dimensiunea $w = 7$ care a furnizat 32 de intervale a câte $11^{\circ}15'$ pe cercul trigonometric. Conform repartiției din Figura 4.6, rezultă 32 de zone de aproximare, corespunzătoare fragmentelor de muchii cu orientări începând de la 0° și continuând cu incrementuri de $11^{\circ}15'$.

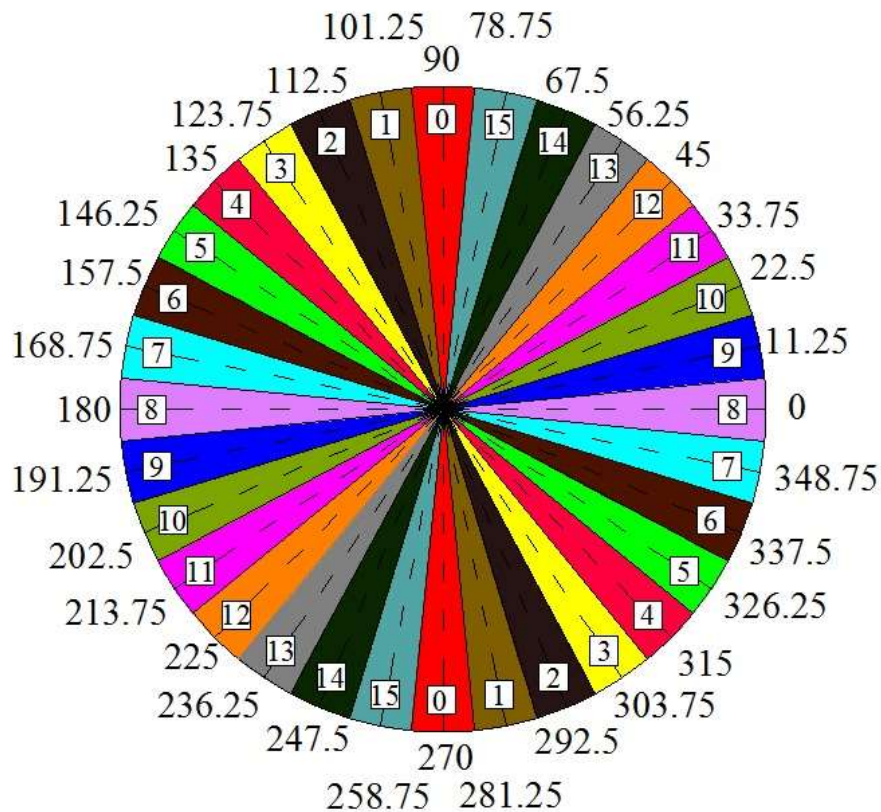


Figura 4.6 Cuantificarea direcțiilor gradientului pentru $w = 7$.

Imaginea rezultată în urma parcurgerii celei de a treia etape este o imagine în care intensitatea pixelilor este egală cu valoarea magnitudinii gradientului în fiecare punct. În plus, în mod ideal, grosimea liniilor de muchie trebuie să fie de doar 1 pixel. Pentru restul pixelilor care nu sunt pe muchii, magnitudinea calculată a gradientului trebuie să fie zero.

A patra etapă presupune mai întâi efectuarea operațiilor de binarizare adaptivă cu două praguri, care are ca rezultat unirea punctelor de muchie de pe contur. Binarizarea adaptivă are ca scop extragerea unui număr relativ constant de puncte de muchie pentru o dimensiune dată a imaginii. În acest fel, se compensează iluminarea și contrastul diferit între imagini, prin intermediul a două praguri a căror valoare se calculează în așa manieră, încât să se evite un număr prea ridicat de muchii sau lipsa totală a acestora.

Algoritmul de binarizare adaptivă execută următorii pași [137]:

1. Se stabilesc mai întâi două praguri P_{Jos} și P_{Sus} ,
2. Se parcurge fiecare pixel din imagine și, dacă:
 - a. magnitudinea gradientului său $< P_{Jos}$, se etichetează pixelul ca fiind *ÎN_AFARA_MUCHIEI*,
 - b. magnitudinea gradientului este situată între P_{Jos} și P_{Sus} , se etichetează ca fiind *PUNCT_SLAB_DE_MUCHIE*,
 - c. magnitudinea gradientului $> P_{Sus}$, se etichetează cu *PUNCT_TARE_DE_MUCHIE*.
3. Se aplică un algoritm similar celui de etichetare, pentru marcarea punctelor etichetate *PUNCT_SLAB_DE_MUCHIE* în situația în care acestea sunt conexe

cu puncte etichetate *PUNCT_TARE_DE_MUCHIE* și eliminarea punctelor care nu sunt conexe cu cele etichetate *PUNCT_TARE_DE_MUCHIE*.

Ultima operație a acestei etape este extinderea muchiilor prin histereză. Aceasta este necesară datorită faptului că, în urma binarizării adaptive nu este garantată completitudinea muchiilor. Rezultatul operației de binarizare adaptivă este o imagine cu foarte multe muchii fragmentate. Scopul operației este prelungirea fragmentelor de muchii bine definite, cu fragmente de muchii mai puțin clare sau mai umbrite, care nu sunt etichetate de operația de binarizare ca fiind *PUNCT_TARE_DE_MUCHIE*.

Un fragment de muchie, compusă din puncte etichetate ca fiind *PUNCT_TARE_DE_MUCHIE*, se extinde cu un fragment de muchie compus din puncte etichetate ca *PUNCT_SLAB_DE_MUCHIE*, dacă unul dintre primele puncte este vecin cu unul din punctele din a doua categorie. Operația de vecinătate se aplică pe vecinătăți de 24 de pixeli, sau pe vecinătăți de 48 de pixeli. În cazul vecinătăților mai mari, sunt tolerate distanțe de 1-2 pixeli, deoarece din cauza fenomenului de zgomot, muchiile pot fi întrerupte de distanțe mici [125].

În urma efectuării operațiilor de detecție a muchiilor, se efectuează operații de analiză a conturului cablurilor metalice. Conturul cablurilor depinde într-o mare măsură și de unghiul de incidență al camerei asupra cablului. În cazul ideal, când axa focală a camerei este perpendiculară pe axa cablului, conturul unui cablu neafectat de abraziune este format din arce eliptice simetrice, atât în partea superioară cât și în partea inferioară. În condiții diferite de cele ideale, conturul este format tot din arce eliptice, dar cu diferite raze și orientări.

În cazul cablurilor deteriorate prin abraziune externă, în forma conturului se constată o aplatizare care se manifestă prin mărirea razelor arcelor eliptice și reducerea raportului dintre lungimea arcului eliptic și coarda cuprinsă. În cazurile de abraziune avansată, se ajunge la situația în care conturul proiecției 2D a cablului poate fi aproximat cu o curbă rectilinie.

În Figura 4.7 este ilustrat cu culoarea verde conturul (îngroșat) rezultat în urma aplicării algoritmilor de extragere pe o secțiune de cablu neafectat de abraziune. În Figura 4.8 este îndepărtată porțiunea de cablu și se poate observa forma conturului în condițiile în care unghiul camerei la achiziția imaginii este diferit de condiția ideală.



Figura 4.7 Conturul unui cablu neafectat de abraziune.

Pentru efectuarea operațiilor de clasificare a cablului pe baza conturului extras este necesară efectuarea operației de calcul a lungimii arcelor eliptice pe segmentul de contur analizat. Pentru calcul s-a folosit formula prezentată în [138], care utilizează dimensiunea coardei pentru determinarea lungimii arcului.

$$L = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} * L_C \quad (\text{Ecuatie 4.36})$$

unde:

L_C - lungimea coardei.

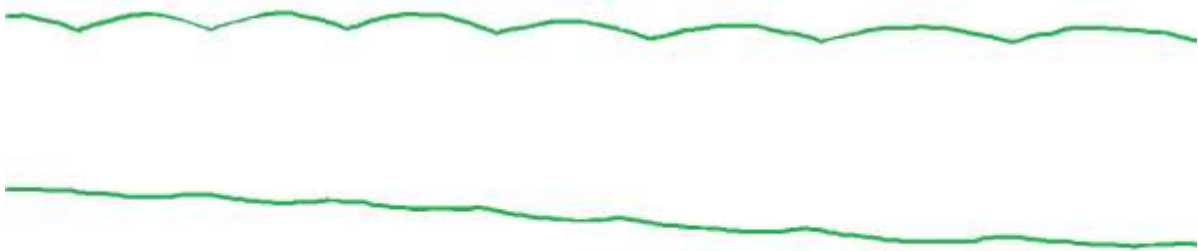


Figura 4.8 Conturul extras al cablului.

4.2.3 Caracteristicile firelor individuale rupte

Din punct de vedere al firelor individuale rupte în sistemele cu cabluri, acest tip de degradare se manifestă în principal în două moduri. În primul mod, firul rupt rămâne atașat la structura toronului din care face parte, iar în al doilea mod, acesta se desprinde de toronul din care face parte și iese în exteriorul cablului (după cum se poate observa în Figura 1.14).

Primul mod de manifestare este ilustrat în Figura 4.9 și se întâlnește, în general, la cablurile tractoare ale instalațiilor de transport pe cablu. La aceste instalații cablurile sunt ghidate în zonele de retur pe roți cu diametre de ordinul metrilor și nu sunt supuse la curbare sub unghiuri ascuțite, situație care previne desprinderea firelor rupte de pe toronul din care fac parte.



Figura 4.9 Fir individual rupt, atasat la toron.

Pentru detecția firelor rupte, rămase atașate toronului, este necesară determinarea relației implicite dintre textura cablului și modelul geometric al acestuia (deschis pe larg în subcapitolul 4.1). Relația este determinată prin analiza mai multor eșantioane de imagini ale unor cabluri care nu prezintă fire individuale rupte. Modelul geometric repetitiv al cablului împreună cu relația spațială fixă dintre sursa de iluminare și cameră, permit determinarea unui model probabilistic al aspectului observat al cablului. Modelul probabilistic al aspectului observat al cablului acceptă includerea în el a unor variații locale de la modelul geometric repetitiv, cauzate de impurități prezente pe suprafața cablului, cum sunt vaselina, murdăria,

urmele de coroziune etc. Modelul probabilistic al aspectului se descrie prin intermediul ecuației de rendering.

Ecuația de rendering este o ecuație integrală care descrie modul în care se propagă lumina de pe o suprafață. Ecuația este formulată în [139], încă din 1986, și cuantifică radianța într-un punct al obiectului. Radianța este suma intensității luminii emise și a luminii reflectate de către un punct sau de către suprafața unui obiect. Radianța unui punct X al suprafeței pe direcția w_0 , este descrisă prin ecuația următoare:

$$L_o(X, w_0) = L_E(X, w_0) + \int_{\Omega} f_r(X, \omega_i, \omega_0) L_I(X, \omega_i) (\omega_i \cdot n) d\omega_i \quad (4.37)$$

unde:

- $L_o(X, w_0)$ - radianța spectrală totală a unei lungimi de undă date, pe direcția w_0 , la poziția X ,
- $L_E(X, w_0)$ - cantitatea de lumină emisă de punctul X al suprafeței, pe direcția w_0 ,
- ω_0 - direcția luminii emise,
- ω_i - opusul direcției luminii incidente și reflectate,
- Ω - emisfera tuturor valorilor posibile pentru direcția ω_i ,
- $f_r(X, \omega_i, \omega_0)$ - funcția de distribuție bidirecțională a reflexiei,
- $L_I(X, \omega_i)$ - radianța spectrală a unei lungimi de undă date, primită în punctul X de pe direcția ω_i ,
- $\omega_i \cdot n$ - produsul scalar dintre ω_i și normala la suprafață în punctul X .

Datorită faptului că suprafața cablului metalic nu este o suprafață emitentă, termenul $L_E(X, w_0)$ din ecuația de mai sus este neglijat. Datorită operației de integrare, ecuația radianței este simplificată cu ajutorul tehnicilor Monte Carlo (prezentate în [140]).

Din cauza faptului că achiziția imaginilor are loc in situ, în diferite condiții de iluminare și având diferite direcții de amplasare a camerelor, este foarte dificil să se furnizeze algoritmilor de estimare a ecuației de rendering informațiile de calibrare corecte. Din acest motiv, în mod practic, w_0 și w_i sunt necunoscute. Totuși, relația dintre cameră, cablu și poziția sursei de lumină rămâne fixă pe parcursul achiziției imaginilor. Ca efect, rezultă faptul că, direcția de vizualizare, cât și unghiul de incidență al luminii, depind doar de punctul X de pe suprafață.

Ținând cont de această ipoteză, se obține descrierea parametrică a punctului X de pe suprafață, prin intermediul a două unghiuri de fază φ_T și φ_F , și prin distanța d_c (în sistemul de coordonate 3D) de la punctul X la axa optică (la dreapta care conectează centrul optic cu centrul secțiunii unui fir individual). Descrierea geometrică este ilustrată în Figura 4.10.

Ecuația descrierii parametrice a punctului X este definită mai jos:

$$X(\varphi_T(p_T), \varphi_F(p_{F_j}), d_c) = w_{i,j}(p_T, p_{F_j}) + \begin{pmatrix} 0 \\ d_c \\ -\sqrt{0.5\varphi_F^2 - d_c^2} \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

Deși d_c nu este cunoscută din cauza lipsei informației volumetrice, se efectuează o aproximare între distanța d_c și proiecția 2D, notată d'_c în Figura 4.10. Distanța d'_c este distanța de la un pixel x_i din imagine până la centrul proiecției firului. În urma acestei simplificări, fiecare punct de pe suprafața cablului se descrie parametric cu ajutorul expresiei de mai jos:

$$\theta = (\varphi_T(p_T), \varphi_F(p_{F_j}), d'_c) \quad (4.39)$$

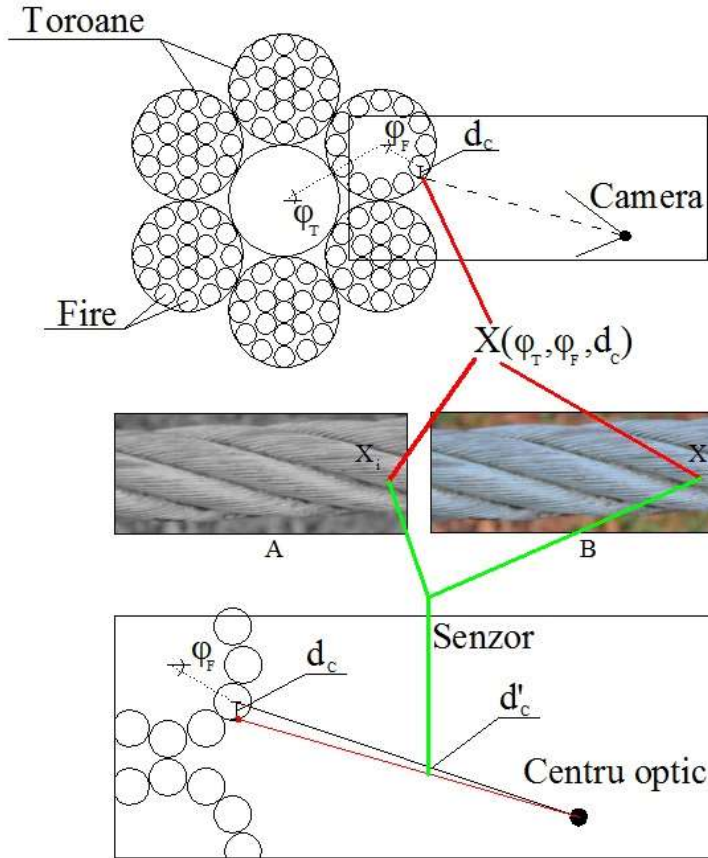


Figura 4.10 Schiță de corespondență pixeli.

Folosind notația din ecuația 4.39, ecuația 4.37 devine:

$$\tilde{L}_o(\theta) = L_o(X(\theta)) = \int_{\Omega} f_r(X(\theta), \omega_i) L_l(X(\theta), \omega_i) (\omega_i \cdot n(X(\theta))) d\omega_i \quad (4.40)$$

Această parametrizare permite exprimarea ecuației de rendering, în funcție de parametrizarea θ a punctului X de pe suprafața cablului. Datorită caracterului periodic al modelului cablului care furnizează eşantioane repetate pentru același punct al suprafeței, se poate estima un model de densitate pentru relația dintre geometrie și aspectul observat al cablului. Reprezentarea aspectului observat al cablului este efectuată prin estimarea distribuției $p(g_c, \theta)$ dintre nivelurile de gri observate în imaginea cablului (g_c) și valoarea parametrizării oricărui punct de pe suprafață (θ). Densitatea este estimată cu ajutorul unei histograme 4D, iar prin aplicarea unui operator de estimare 4D de tip Parzen [141], se obține reprezentarea densității din ecuația de mai jos (adaptată după [141]):

$$p(z = (g_C, \theta)) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^b \frac{1}{\sqrt{|2\pi\Sigma|}} e^{\left(-\frac{1}{2}(z-z_i)^T \Sigma^{-1} (z-z_i)\right) n_i} \quad (4.41)$$

unde:

- Σ - matricea de covarianță,
- n - numărul total de pixeli,
- n_i - numărul de pixeli aparținând nivelului de intensitate i ,
- b - numărul de nivele de intensitate din histogramă.

Matricea de covarianță are masca de convoluție furnizată mai jos:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_4^2 \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

Coefficienții σ_1^2 , σ_2^2 , σ_3^2 și σ_4^2 au fost aleși prin procedee de testare repetată pe eșantioane de imagini, urmate de evaluarea rezultatelor. Imaginile utilizate în testare au histograme ale nivelelor de gri cu 256 de valori. În același timp, distanțele dintre pixelii individuali x_i și centrele firelor de la suprafața toroanelor, sunt plasate într-un interval cu un ordin de mărime mai mic. Din aceste considerente, s-a efectuat o cuantificare a nivelelor de gri din histogramă, reducându-se numărul lor la aproximativ numărul distanțelor.

Detecția firelor individuale rupte este o problemă de identificare a regiunilor din imagine, care prezintă anomalii în raport cu modelul probabilistic al aspectului. Prin alinierea imaginii investigate a cablului la modelul cablului, fiecare punct din model este parametrizat cu un pixel din imagine. Se calculează o hartă de probabilitate cu ajutorul funcțiilor *likelihood*, descrisă prin ecuația:

$$p(g_C | \theta) = \frac{p(g_C, \theta)}{p(\theta)} \quad (4.43)$$

Ecuația 4.43 descrie și care este probabilitatea, ca pixelul x_C să aibă în imagine nivelul de gri g_C , dată fiind parametrizarea θ a acestuia. Probabilitatea se extrage din reprezentarea densității $p(g_C, \theta)$, din ecuația 4.41.

Există o problemă care apare la alinierea modelului matematic al cablului, atât al celui 3D, cât și a proiecției cu imaginile cablului, datorită diferenței de comportament al cablului real. Cablul real este o structură flexibilă, a cărei toroane și fire se deplasează în funcție de eforturile din cablu, sau sub influența elementelor externe de ghidaj al cablului. În schimb, modelul geometric este un model rigid, iar acest lucru cauzează erori sistematice în zonele de contact dintre toroane. În aceste zone nu se poate face o estimare cu un nivel bun de acuratețe al modelului parametric al aspectului, iar densitatea distribuției devine prea mică.

Din acest motiv, modelul parametric al aspectului este normalizat în raport cu aceste erori. Cu ajutorul unghiurilor φ_T și φ_F suprafața cablului poate fi împărțită în mai multe regiuni. Suprafața cablului este împărțită în M clase discrete de regiuni R_M , și probabilitatea fiecărei regiuni este normalizată. Normalizarea este efectuată prin calcularea probabilității

medii $\bar{p}(R_M)$, pentru fiecare regiune R_M și pentru toți pixeli N_M aparținând acestei regiuni, conform formulei de mai jos:

$$\bar{p}(R_M) = \frac{1}{N_M} \sum_{n=1}^{N_M} p(g_C^n | \theta^n) \quad (4.44)$$

În Figura 4.11 sunt prezentate cele 3 faze ale procesării unei imagini ce prezintă un fir individual rupt. În porțiunea a) este prezentată o zonă din cablu în care apare firul rupt, în porțiunea b) se prezintă rezultatul determinării claselor de regiuni și a regiunilor pe fiecare toron, iar în porțiunea c) este identificată incluziunea unei regiuni mai mici într-o regiune a toronului, cu altă densitate de probabilitate, care semnalizează prezența firului individual rupt.

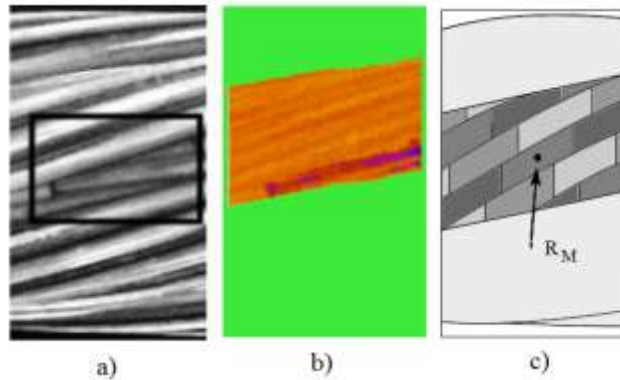


Figura 4.11 Fazele detecției firului rupt.

Pentru cel de-al doilea mod de manifestare a firelor individuale rupte, și anume, firele desprinse de pe suprafața toronului, se utilizează tehnica de detecție a muchiilor. În acest caz sunt urmărite neregularitățile ce apar pe conturul cablului. Dacă considerăm profilul conturului unui cablu care nu este afectat de fire individuale rupte, acesta arată precum cel din Figura 4.7, de la pagina 104. În cazul apariției firelor individuale rupte, pe contur vor apărea muchii suplimentare (cum sunt cele din Figura 4.12).

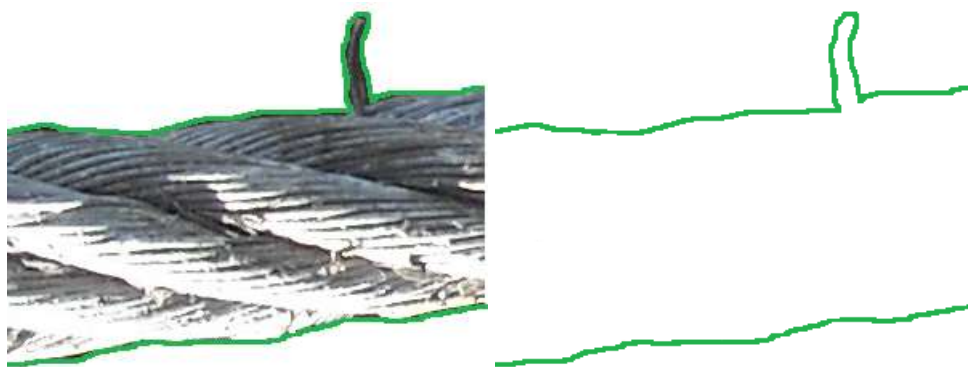


Figura 4.12 Fire individuale rupte desprinse de pe toron

Muchiile suplimentare semnalizează apariția anomaliilor în contur, anomalii care necesită analize suplimentare pentru a determina gravitatea deteriorării. Primul nivel de gravitate îl reprezintă chiar situația firelor individuale rupte. Când anomaliile conturului se manifestă prin muchii multiple, zimțat, algoritmi identifică cu multiple niveluri de

aproximare degradarea, începând de la 2 fire individuale rupte, multiple fire individuale rupte, până la detecția unui întreg toron rupt.

5 Recunoașterea degradărilor și clasificarea automată a imaginilor

În urma procesării imaginilor și a identificării caracteristicilor tipice fiecărui tip de degradare a cablului, au loc procesele de evaluare a gravității stării de degradare. De aceste procese este responsabil subsistemul de detecție și de evaluare a integrității structurale, componentă al arhitecturii prezentate în Figura 3.1 de la pagina 75. Subsistemul de detecție este proiectat sub forma unor module inteligente, capabile să efectueze detecția degradărilor observate *a priori* și, în plus, capabile să învețe caracteristicile unor noi forme de manifestare ale degradărilor deja cunoscute.

Problema identificării deteriorărilor și a evaluării gravității degradărilor presupune efectuarea ierarhică a următoarelor faze:

1. Faza 1: detectarea caracteristicilor deteriorării;
2. Faza 2: localizarea deteriorării, prin determinarea poziției acesteia în cadrul cablului;
3. Faza 3: clasificarea deteriorării, conform definiției claselor;
4. Faza 4: evaluarea deteriorării, prin estimarea efectelor deteriorării asupra sănătății/ condiției structurii;
5. Faza 5: efectuarea prognozei evoluției degradărilor și a efectelor acestora asupra structurii.

Din perspectiva fluxului de informații, fiecare fază are nevoie de informația furnizată din faza anterioară. Din punct de vedere al modulelor de procesare a datelor prezentate în subcapitolul 4.2, acestea realizează operațiile specifice fazelor 1 și 2. Informațiile furnizate de către aceste module sunt folosite ca intrare pentru faza 3. Informațiile rezultate din această fază sunt vitale pentru evaluarea efectivă a defectelor din fazele 4 și 5. În ceea ce privește faza 3, efectuarea acesteia este bazată pe algoritmi de recunoaștere a formelor (pattern recognition –PR). Algoritmii de PR primesc ca date de intrare imagini cu eșantioane de cabluri și, în urma procesării acestora, le atribuie o clasă de apartenență dintr-un set finit de clase definit *a priori*.

Subsistemul de detecție trebuie să manifeste capacitatea de învățare și de detectare a elementelor de noutate. Această caracteristică se datorează faptului că tot setul de degradări poate apărea într-o multitudine de scenarii, începând de la forma de manifestare a degradării, continuând cu poziția în care aceasta apare pe cablu și până la gravitatea manifestării acesteia.

Inteligența artificială oferă în prezent două categorii de metode prin care un sistem inteligent poate să „învețe”. Primele metode sunt cele de învățare supervizată, iar celelalte metode presupun învățarea nesupervizată sau detectarea elementelor de noutate (din expresia în limba engleză: novelty detection).

În cadrul dezvoltării sistemului de monitorizare structurală a cablurilor, a fost necesară o abordare hibridă compusă, atât din metode de învățare nesupervizată, cât și din metode de învățare supervizată. Această decizie a fost luată ținând cont de aspectele prezentate în continuare. Existența unui set redus de imagini cu scenariile de manifestare a deteriorărilor împiedică evaluarea rezultatelor doar pe baza cunoștințelor rezultate în urma învățării

supervizate. Fazele 4 și 5, prezentate anterior, pot fi efectuate doar pe baza unor informații învățate în prealabil, și doar pe baza unor modele de predicție modelate și stocate în bazele de date.

În subcapitolele următoare sunt analizate metodele folosite în cadrul dezvoltării subsistemul de detecție și de evaluare a integrității structurale, prin prisma celor două posibilități de învățare și a modului în care acestea relaționează în implementarea sistemului de monitorizare structurală a cablurilor.

5.1 Clasificarea deteriorărilor prin învățare supervizată

Clasificarea deteriorărilor prin tehnici de învățare supervizată presupune disponibilitatea informațiilor detaliate cu privire la fiecare tip de deteriorare. Din punct de vedere al descrierii teoretice și a modelelor de deteriorări, informația a fost prezentată în detaliu în subcapitolul 1.7. Pornind de la aceste informații și coroborat cu o vastă experiență în domeniu, o echipă de specialiști din cadrul Departamentului de Mecanica Construcțiilor din Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca a realizat suportul teoretic pentru ierarhizarea fiecărui tip de deteriorare, în mai multe clase de gravitate [89], [141], [142], [16].

Pentru a realiza detecții ale degradărilor cu grade ridicate de acuratețe este necesară existența mai multor eșantioane de imagini specifice fiecărui tip de degradare și fiecărei clase de gravitate asociate cu acesta. Pentru a putea recunoaște o degradare, algoritmi trebuie să poată accesa o bază de date unde, pe baza expertizei specialiștilor, au fost clasificate și stocate imagini specifice claselor de deteriorări definite. Toate aceste imagini și informațiile asociate sunt stocate în baza de date cu modele, deteriorări și defecțe (ilustrată în Figura 3.1). În structura de date specifică fiecărei clase se regăsesc implicit informații despre tipul deteriorării, nivelul său de gravitate și locația acesteia.

Pentru ca algoritmi de PR să returneze rezultate mulțumitoare, aceștia trebuie să aibă capacitatea de adaptare la variațiile în modurile de manifestare a defectelor din cadrul datelor de intrare. Dacă subsistemului de detecție și de evaluare a integrității structurale i se pot furniza un număr ridicat de imagini, cu cât mai multe instanțe ale deteriorărilor, a modurilor de apariție a acestora, a localizării acestora etc., atunci algoritmi pot produce rezultate bune în urma învățării supervizate.

O problemă ridicată de acest tip de învățare, este cea a disponibilității imaginilor care surprind toate manifestările posibile a degradărilor și a nivelelor de gravitate. Mai mult decât atât, ar trebui să fie disponibil câte un set de imagini specifice fiecărui tip de construcție a cablului. Obținerea acestora în faza de proiectare a sistemului de monitorizare structurală a fost dificilă și rezultatul a fost un număr scăzut de imagini cu scenarii de deteriorare. În cadrul activității de obținere a imaginilor cu deteriorări, nu au fost puține cazurile, când reprezentanții unor societăți care dispuneau de mostre ale unor cabluri deteriorate, utilizate în cadrul instalațiilor de transport pe cablu, sau de ridicare a sarcinilor, au fost foarte reticenti la solicitarea doctorandului, de a pune la dispoziția lui a acestor cabluri, în vederea utilizării lor în scop de cercetare. Pentru a compensa acest neajuns, s-a recurs la includerea informațiilor despre degradări și despre manifestările acestora în modelul cablului, care este descris pe larg în capitolul 4.1

5.1.1 Utilizarea rețelelor neuronale

În ceea ce privește metodele luate în considerare pentru algoritmi de învățare supervizată, prima categorie de algoritmi studiați a fost cea bazată pe rețele neuronale artificiale (RNA). Cele mai simple model de RNA sunt proiectate pe principiul utilizării unor componente de bază cu structură similară, denumite neuroni artificiali. Acești neuroni primesc la intrare un set de semnale, în cazul de față informațiile grafice din imagini, și furnizează un singur răspuns la ieșire. Intrările acestor neuroni sunt binare, inspirate din comportamentul neuronilor biologici. Valorilor intrărilor le sunt atribuite un set de ponderi, înainte de a fi furnizate ca intrări unui bloc de însumare care generează un semnal de activare.

Structura unui astfel de neuron se numește structură McCulloch-Pitts [143] și este ilustrată în Figura 5.1, unde $x_1, x_2 \dots x_n$ sunt intrările neuronului, $p_1, p_2 \dots p_n$ sunt ponderile asociate acestora, iar y este răspunsul de ieșire.

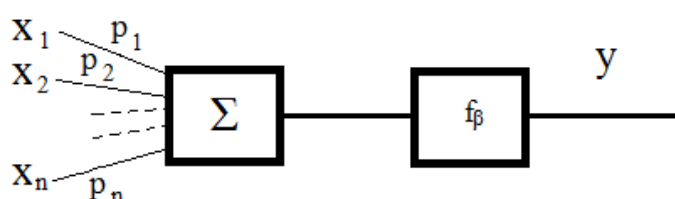


Figura 5.1 Neuron McCulloch-Pitts.

Răspunsul la ieșire depinde, în general, de un factor constant k , și este binar, menținându-și valoarea de ieșire nulă, atât timp, cât funcția de transfer f_β nu a returnat o valoare mai mare, decât un prag prestabilit β . Odată pragul atins și depășit, neuronul se activează, furnizând un rezultat ne-nul. Următoarea ecuație descrie funcția de activare a neuronului:

$$y = k \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (5.1)$$

Neuronul prezentat mai sus are capacitate computațională extrem de redusă și este integrat într-o structură stratificată, denumită perceptron. Perceptronul este deja o rețea de neuroni neomogenă, prezentând spre exterior doar două straturi de neuroni, un strat de input și un strat de output. Perceptronul prezintă în interior cel puțin un strat de neuroni, denumit asociativ responsabil cu procesarea datelor. Dacă între cele două straturi responsabile cu primirea datelor de intrare și furnizarea rezultatelor există un număr de n straturi intermediare ascunse care execută procesarea datelor, atunci perceptronul este de tip MLP (multilayer perceptron) [144].

Perceptronul MLP este o rețea neuronală cu reacție pozitivă, în care datele de intrare sunt furnizate stratului de input, după care acestea avansează prin straturile ascunse ale rețelei de procesare și sunt furnizate rezultatele de către stratul i (conform ilustrației din Figura 5.2). Fiecare nod i este conectat la un nod j din stratul anterior și din stratul posterior, prin intermediul unei conexiuni cu pondere p_{ij} . Semnalele avansează prin noduri în felul următor: în stratul k se calculează o sumă ponderată pentru fiecare nod i , bazată pe toate semnalele $x_j^{(k-1)}$ provenite de la stratul anterior $k-1$. Rezultatul calculului furnizează excitația $z_i^{(k)}$ a nodului. Rezultatul funcției este folosit ca intrare pentru funcția de activare f , pentru a

furnizare ieșirea finală a nodului $x_i^{(k)}$, care va fi, la rândul ei, furnizată mai departe stratului $k+1$, conform ecuației de mai jos:

$$x_i^{(k)} = f(z_i^{(k)}) = f\left(\sum_j p_{ij}^{(k)} x_j^{(k-1)}\right) \quad (5.2)$$

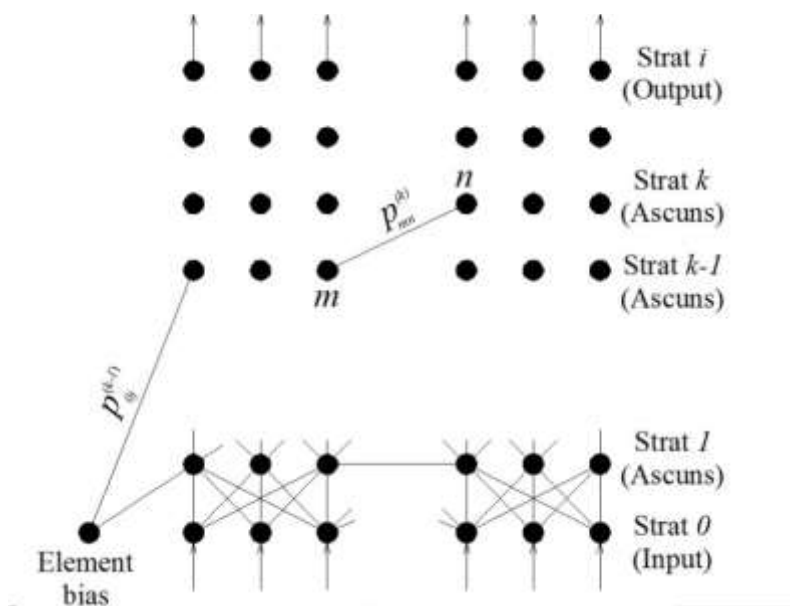


Figura 5.2 Perceptronul MLP.

Unul dintre avantajele folosirii perceptronului MLP este faptul că neuronii nu vor mai furniza doar rezultate binare, ci vor putea furniza orice valoare din intervalul continuu $[-1, 1]$. Al doilea avantaj este faptul că nu mai există praguri prestabilite asociate neuronilor. Un nod din rețea este special, acesta este elementul bias care este conectat la toate straturile ascunse și la stratul de output. Ieșirea acestui element de control este menținută fixă, pentru a furniza ponderi constante în excitație fiecărui nod.

Principala dificultate în utilizarea RNA bazate pe perceptronul MLP pentru a efectua clasificarea defectelor, corespunde fazei de calibrare a ponderilor p_{ij} a fiecărei conexiuni dintre noduri. Aceasta fază presupune furnizarea către RNA a unor imagini de calibrare care sunt considerate semnale bidimensionale. Pentru fiecare dintre aceste imagini, rezultatul detecției și al clasificării sunt cunoscute prin prisma determinării anterioare a acestora de către specialiști. Pe baza metodei aproximărilor succesive (trial and error) informația avansează de la input, prin straturile ascunse ale rețelei, și furnizează rezultatele încercării. Aceste rezultate sunt comparate cu rezultatele corecte, stabilite anterior. Se calculează erorile din rezultatele de detecție și de clasificare și din rezultate corecte. Aceste erori sunt introduse, la rândul lor, prin intermediul unui algoritm de tip „backpropagation” în RNA, pentru a ajusta valorile ponderilor.

Rezultatele experimentale obținute prin testarea RNA pe imaginile cablurilor au generat în primul rând întârzieri mari în timp de execuție, fapt care nu face potrivită folosirea RNA pentru monitorizarea cablurilor în timp real. Aceste întârzieri au fost generate din cauza unei utilizări ample a memoriei și a unității centrale de procesare. Totuși, pentru sisteme de monitorizare offline, o soluție bazată pe RNA poate fi ulterior îmbunătățită. În al

doilea rând, erorile calculate în timpul operației de calibrare au avut procentaje cu până la 50% diferite de rezultatele considerate clasificate corect de către experții umani.

O alternativă la învățarea supervizată cu RNA este folosirea unei abordări bazate pe logica vagă (fuzzy), care reduce considerabil cerințele de memorie și de putere de procesare.

5.1.2 Metode bazate pe logica fuzzy

Logica fuzzy prezintă proprietățile necesare modelării în subsistemul de detecție și de evaluare a integrității structurale a unor procese de clasificare, similare modului uman de clasificare a unei colecții de date de intrare. Cu ajutorul acestui tip de logică se pot trata seturi de date aproximative, pentru probleme de detecție clar definite. Un avantaj suplimentar, este posibilitatea procesării în paralel a unui set voluminos de date, cum sunt imaginile cablurilor.

Logica fuzzy a fost formulată teoretic de către matematicianul Loffi A. Zadeh în [145]. Aceasta este o logică care operează cu multiple valori de ieșire, distribuite între cele două valori de ieșire (0 și 1) asociate cu logica clasică sau binară. Conform [145], o mulțime vagă (fuzzy) A din cadrul unui univers de discurs X , conține elemente notate cu x . Mulțimea A utilizează pentru definire suportul unei funcții de apartenență: $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$. Astfel, o mulțime A este complet definită de mulțimea tupletelor:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (5.3)$$

Pentru o submulțime vagă a universului de discurs A , se numește *suportul* lui A submulțimea strictă a lui X ale cărei elemente au grade de apartenență nenule pozitive în A . Suportul este definit astfel:

$$\text{supp}(A) = \{x \in A \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (5.4)$$

Înălțimea submulțimii A este definită, ca fiind cea mai mare valoare a funcției de apartenență, astfel: $h(A) = \max_{x \in \bar{X}} \mu_A(x)$. Submulțimea A a lui X este normală, dacă $\exists x \in X$ a. î. $\mu_A(x) = 1$. În caz contrar, submulțimea A este subnormală. *Nucleul* lui A este submulțimea strictă a lui X ale cărei elemente au grade de apartenență unitare în A .

Din punct de vedere al operațiilor cu mulțimi vagi, acestea sunt o extensie a celor din logica clasică. Dacă mulțimile fuzzy au grade de apartenență egale 0 sau 1, atunci semnificația operațiilor este aceeași ca în teoria clasică a mulțimilor. Operațiile cu mulțimi vagi se definesc cu ajutorul a două funcții, numite *t-normă* (T) și *t-conormă* (S), definite mai jos. O funcție $T : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ se numește *t-normă*, dacă, și numai dacă respectă următoarele 4 condiții:

1. Dacă $x \leq u, y \leq v \Rightarrow T(x, y) \leq T(u, v)$ (este monotonă);
2. $T(x, y) = T(y, x)$ (este comutativă);
3. $T(T(x, y), z) = T(x, T(y, z))$ (este asociativă);
4. $T(0,0) = 0$ și $T(x, 1) = x$ (respectă condițiile de limită).

O funcție $S : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ se numește *t-conormă*, dacă, și numai dacă este comutativă, asociativă, monoton nedescrescătoare în raport cu ambele argumente și satisface

condițiile de limită $S(x,0) = x$ și $S(1,1) = 1$. Funcția $S(x,y) = 1 - T(1 - x, 1 - y)$ se numește *t-conorma duală* a lui T .

Intersecția și reuniunea a două mulțimi vagi se calculează conform expresiilor de mai jos:

$$\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min \{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (5.5)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max \{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (5.6)$$

Reprezentarea cunoștințelor despre modelul cablului, a deteriorărilor și, în general, a cunoștințelor furnizate de către experții umani, se face prin intermediul regulilor de inferență fuzzy. Aceste reguli se bazează pe variabile lingvistice. De exemplu, pentru două variabile lingvistice x și y și două valori lingvistice A și B , o regulă fuzzy poate avea forma simplificată de mai jos:

IF x este A THEN y este B

În cadrul regulii de mai sus, "*x este A*" poartă denumirea de antecedent, iar "*y este B*" poartă denumirea de consecvent. Aceștia pot fi expresii logice de complexitate ridicată care să implice folosirea mai multor operatori logici.

Trei dintre tipurile de inferență care produc rezultate bune sunt inferența Mamdani, inferența Sugeno și inferența Larsen [146]. Inferența Mamdani utilizează pentru implicație operatorul *minimum*, adică $r_{ij} = \min(a_i, b_j)$ [147]. În cazul inferenței Sugeno sunt utilizate diferite funcții matematice. Inferența Larsen utilizează pentru implicație operatorul *produs*, adică $r_{ij} = a_i \cdot b_j$.

În procesul de învățare supervizată prin aplicarea raționării fuzzy, au fost urmați următorii pași:

1. Definirea variabilelor lingvistice și a valorilor lingvistice ale acestora;
2. Determinarea mulțimilor vagi;
3. Construirea regulilor fuzzy;
4. Codificarea mulțimilor vagi, a regulilor și a procedurilor de inferență;
5. Evaluarea prin intermediul inferenței Sugeno.

Pentru modelarea deteriorărilor au fost alese următoarele variabile lingvistice: *Coroziune externă*, *Abraziune externă*, *Fire rupte*, *Reducere secțiune*, *Ruptură toron*, *Deformații locale*, *Deformație de tip „colivie”*, *Gravitate fire rupte* etc. În următoarele paragrafe se vor prezenta în detaliu doar primele trei variabile lingvistice. Celelalte variabile lingvistice se definesc similar, pe baza descrierilor teoretice a degradărilor.

Descrierea variabilei lingvistice *Coroziune externă* cu valorile lingvistice, notația și intervalele numerice asociate sunt prezentate în Tabel 5.1.

Variabila lingvistică: Coroziune externă		
Valori lingvistice	Notație	Interval numeric normalizat
Inexistentă	IN	[0.0, 0.1]
Puncte izolate	PI	[0.0, 0.2]

Suprafețe mai mici de 1 cm ²	S1	[0.05, 0.25]
Suprafețe > 1cm ² și < 5 cm ²	S5	[0.1, 0.4]
Suprafețe > 5cm ² și < 25 cm ²	S25	[0.15, 0.65]
Suprafețe > 25cm ² și < 100 cm ²	S100	[0.35, 0.85]
Suprafețe continue	SC	[0.65, 1.0]

Tabel 5.1 Descrierea variabilei lingvistice "Coroziune externă".

Descrierea variabilei lingvistice *Abraziune externă* cu valorile lingvistice, notația și intervalele numerice asociate sunt prezentate în Tabel 5.2

Variabila lingvistică: Abraziune externă		
Valori lingvistice	Notație	Interval numeric normalizat
Inexistență	INE	[0, 0.1]
Abraziune locală	AL	[0.05, 0.25]
Secțiune redusă cu mai puțin de 2%	S2	[0.15, 0.40]
Secțiune redusă > 2% și < 5%	S2_5	[0.3, 0.7]
Secțiune redusă > 5% și < 10%	S5_10	[0.45, 0.85]
Secțiune redusă cu mai mult de 10%	S10	[0.8, 1.0]

Tabel 5.2 Descrierea variabilei lingvistice "Abraziune externă".

Descrierea variabilei lingvistice *Fire rupte* pentru cablul de tip 6 x 19 + FC (utilizat în experimente), împreună cu valorile lingvistice, notația și intervalele numerice asociate sunt prezentate în Tabel 5.3

Variabila lingvistică: Fire rupte		
Valori lingvistice	Notație	Interval numeric normalizat
Niciunul	NC	[0, 0.04]
Un fir rupt/toron pe o înfășurare completă	1FT	[0.02, 0.1]
Maxim 2 fire rupte /toron pe o înfășurare completă	2FT	[0.05, 0.30]
Maxim 3 fire rupte /toron pe o înfășurare completă	3FT	[0.2, 0.6]
Maxim 4 fire rupte /toron pe o înfășurare completă	4FT	[0.3, 0.8]
Maxim 6 fire rupte pe o înfășurare completă	6F	[0.65, 1.0]

Tabel 5.3 Descrierea variabilei lingvistice "Fire rupte".

Pentru variabila lingvistică *Gravitate fire rupte* care descrie efectul degradării asupra integrității structurale a cablului, valorile lingvistice notația și intervalele numerice asociate sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Variabila lingvistică: Gravitate fire rupte		
Valori lingvistice	Notație	Interval numeric normalizat
Zero	ZE	[0, 0.1]
Neglijabilă	NEG	[0.05, 0.2]
Mică	MI	[0.15, 0.45]
Medie	ME	[0.4, 0.6]
Mare	MA	[0.5, 0.8]
Maximă	MX	[0.8, 1.0]

Tabel 5.4 Descrierea variabilei lingvistice "Gravitate fire rupte".

Fiecare variabilă lingvistică este considerată o familie de clase specifice aceluiași tip de degradare. Pentru determinarea mulțimilor vagi sunt folosite numere fuzzy triunghiulare care simplifică procesul de calcul pentru determinarea gradului de apartenență. În Figura 5.3 sunt prezentate sub formă de numere fuzzy triunghiulare gradele de apartenență ale valorilor lingvistice specificate pentru coroziunea externă, conform datelor din Tabel 5.1., iar în Figura 5.4 gradele de apartenență pentru abraziunea externă, conform datelor din Tabel 5.2.

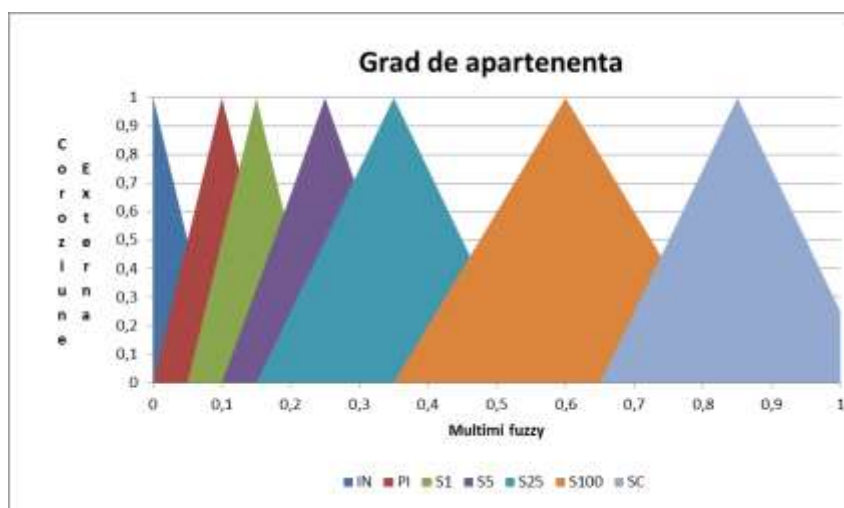


Figura 5.3 Gradele de apartenență pentru coroziunea externă.

Regulile fuzzy se construiesc pe baza informațiilor specificate de specialiști și de prescripțiile tehnice în vigoare, cum sunt cele din [47] sau [48], pentru fiecare construcție a cablului.

Un exemplu de regulă marginală inclusă în baza de reguli este următorul:

IF Fire rupte este 6F THEN Gravitate fire rupte este MX

Pentru rapiditatea execuției, baza de reguli fuzzy este încărcată în memorie sub forma unei structuri de date de tip *hash table*. Această structură asociază unor chei (notațiile valorilor lingvistice) valorile din intervalul numeric asociat. Pentru execuția rapidă s-au folosit valori unice ale cheilor. În faza de implementare s-au testat și alte opțiuni, cum sunt arborii de căutare, sau tabelele LUT (Lookup table), dar timpii de execuție s-au dovedit, cel puțin pentru computerul de test, prea ridicați pentru procesarea în timp real.

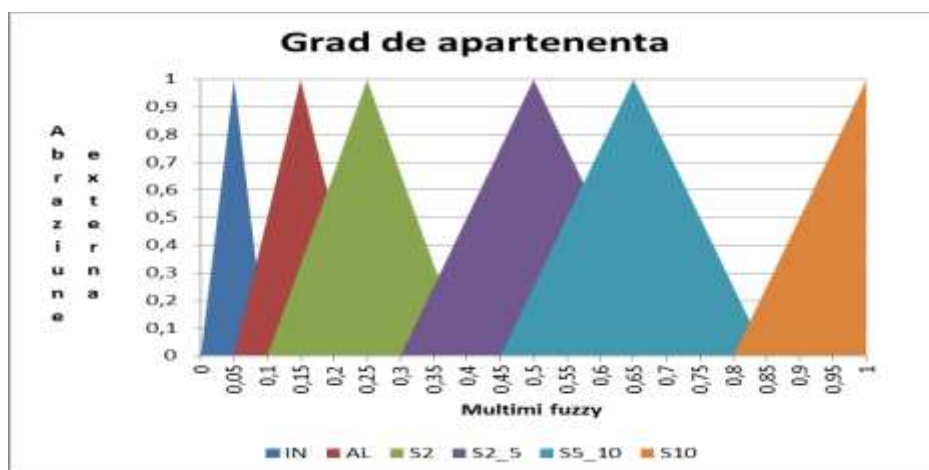


Figura 5.4 Gradele de apartenență pentru abraziunea externă.

Procesul de inferență Sugeno pe imaginile cablurilor, presupune parcurgerea următoarelor etape:

1. Fuzzificarea datelor de intrare;
2. Definierea și evaluarea regulilor de inferență;
3. Agregarea ieșirilor regulilor de inferență;
4. Defuzzificarea.

În prima etapă, fuzzificarea se efectuează astfel: pentru fiecare imagine a defectelor cunoscute și clasificate de experții umani, se determină gradele de apartenență la mulțimile fuzzy corespunzătoare. Rezultatul acestei etape este determinarea caracteristicilor fuzzificate.

În a doua etapă se aplică caracteristicile fuzzificate, pe post de input la antecedentii regulilor fuzzy. Pentru regulile cu antecedenti multipli s-au folosit operatorii fuzzy de intersecție, reuniune, t-norma și t-conorma. Ieșirile determinate în această etapă sunt consecvenții fuzzy.

În etapa de agregare a rezultatelor produse anterior, se execută reuniunea tuturor consecvențelor regulilor fuzzy, rezultând câte o mulțime vagă pentru fiecare variabilă de ieșire.

În ultima etapă, cea a defuzzificării, are loc transformarea valorilor mulțimilor vagi agregate, în valori concrete, utilizând metoda centrului de greutate (prezentată pe larg în [148]).

5.2 Clasificarea deteriorărilor prin învățare nesupervizată

În cazul sistemului prezentat în teză, seturile de imagini cu fiecare clasă de deteriorări sunt reduse. Alternativa existenței unui set cuprinzător de imagini ale deteriorărilor este modelarea teoretică a acestora. Anticiparea tuturor formelor de manifestare a unor deteriorări minore, precum este abraziunea externă este aproape imposibil de modelat. Din acest motiv, în cadrul subsistemului de detecție și evaluare a integrității structurale s-a optat pentru

utilizarea unui alt model de învățare pentru fazele 1 și 2 prezentate mai sus, și anume învățarea nesupervizată.

Idea de bază în cazul învățării nesupervizate este că pentru antrenarea algoritmilor se folosesc doar imagini corespunzătoare tipurilor de cabluri noi, într-o stare tehnică neafectată de nici un tip de degradare. Acest lucru este realizabil cu costuri acceptabile în termeni materiali, de timp și de muncă datorită disponibilității mostrelor de cablu de diferite tipuri. În plus, la efectuarea monitorizării unor tipuri de cabluri care nu au mai fost monitorizate, este posibilă introducerea în baza de date cu modele, a unor seturi de imagini ale unor cabluri noi.

Prin folosirea imaginilor de cabluri noi, neafectate de deteriorări se construiește modelul 3D, modelul parametric al proiecțiilor și modelul parametric al aspectului pentru un anumit tip de cablu. Mai târziu, în timpul operațiilor de procesare a imaginilor, informațiile extrase din imagini sunt utilizate pentru a detecta deviații semnificative de la modelele construite în faza de *training* a algoritmilor. Aceste deviații reprezintă elementele de noutate apărute în contradicție cu modelul și semnifică prezența unor degradări în cadrul modelului cablului.

Principalul avantaj al folosirii acestui tip de învățare este faptul că setul de imagini și informații necesare înaintea efectuării monitorizării este bazat pe eșantioane de cablu noi, care sunt mai ușor de obținut. Din punct de vedere al conceptului general de monitorizare nedistructivă, nu este necesară introducerea artificială de defecte în structura cablului.

Dezavantajul folosirii doar a învățării nesupervizate este faptul că pentru fiecare tip de degradare identificată în subcapitolul 3.1.2 la pagina 71, nu pot exista decât două clase de încadrare a degradării. Prima clasă este clasa corespunzătoare prezenței degradării, fără a exista posibilități de cuantificare a gravității acesteia, iar cea de a doua este clasa corespunzătoare lipsei degradării. Pentru degradări de tipul: rupturii totale a unuia sau mai multe toroane exterioare, deformații locale reduse, deformații locale tip „colivie” sau ieșirea în exterior a inimii este suficientă această posibilitate de clasificare cu doar două clase. Pentru aceste defecte clasificarea în clasa de prezență a defectului și localizarea acestuia sunt suficiente pentru a proceda la oprirea utilizării cablului și înlocuirea acestuia deoarece nivelul de pericol cauzat de apariția degradării este foarte grav.

5.3 Detecția prin intermediul modelelor Markov cu stări ascunse

Pentru clasificarea automată a degradărilor s-au întreprins cercetări pe modelele Markov cu stări ascunse (Hidden Markov Models - HMM). Un model Markov cu stări ascunse este un model grafic probabilistic al unui proces aleatoriu. În contextul analizei recunoașterii deteriorărilor din imaginile cablului, imaginile sunt tratate ca și secvențe temporale ale secțiunilor de cablu surprinse cu ajutorul camerei. Stările ascunse sunt modelate prin intermediul poziției degradărilor în cadrul modelului cablului.

6 Rezultate experimentale

Experimentele întreprinse în cadrul evaluării performanțelor sistemului de monitorizare a integrității structurale a cablurilor au avut ca scop determinarea nivelului capacității de identificare vizuală automată a degradărilor din imagini.

În cadrul fazei de testare a algoritmilor de detecție a degradărilor s-a procedat la testarea offline a unor seturi de imagini. Imaginile au provenit din două surse: mai întâi de la cabluri fotografiate in situ și apoi imagini ale unor cabluri fotografiate în laborator. Pentru fiecare clasă de degradări s-au alcătuit colecții de imagini formate din imagini ale unor cabluri care conțin tipul de degradare identificat în prealabil de experții umani și imagini care prezintă cabluri intacte, fără degradări. Imaginile cablurilor intacte s-au obținut la rândul lor din două surse astfel: fie s-au folosit imagini ale unor porțiuni din cablurile monitorizate care nu erau afectate de degradare, fie s-au folosit imagini ale unor cabluri noi.

În ceea ce privește metodologia de testare, pentru fiecare tip de degradare au fost parcurși următorii pași:

1. Stabilirea seturilor de imagini de *training*. Acest set este compus din imagini cu și fără degradări care sunt furnizate ca input modulelor de procesare a datelor și subsistemului de detecție și evaluare a integrității structurale. Pentru fiecare imagine din set, expertul uman a stabilit în prealabil, prezența degradării, localizarea acesteia și gravitatea ei. Acest set de imagini este setul de *training*.
2. Rularea algoritmilor de procesare a imaginilor și de detecție a degradărilor pe setul de imagini de *training*. Rezultatul acestui pas este configurarea parametrilor modelului algoritmic al cablului.
3. Stabilirea seturilor de imagini de test. Acest pas presupune modificarea setului de imagini de *training* prin eliminarea a aproximativ 75% din aceste imagini și introducerea unor imagini noi. Pentru fiecare imagine din set, expertul uman a stabilit în prealabil, prezența degradării, localizarea acesteia și gravitatea ei. Acest set de imagini este setul de test.
4. Rularea algoritmilor de procesare a imaginilor și de detecție a degradărilor pe seturile de imagini de test și salvarea rezultatelor. În evaluarea rezultatelor s-au urmărit următoarele aspecte
 - a. Rata de detecție a prezenței degradării în imagini, prin cuantificarea numărului de imagini în care prezența degradării a fost identificată.
 - b. Precizia localizării prezenței degradării.
 - c. Acuratețea determinării nivelului de gravitate a degradării.

Datorită lipsei unei aplicații similare de referință, metodologia de evaluare a rezultatelor folosește comparațiile între detecția efectuată de experții umani și detecția automată efectuată de aplicația software. Ca urmare ,evaluarea rezultatelor s-a efectuat prin compararea rezultatelor evaluării vizuale a imaginilor de către experții umani cu rezultatele furnizate de aplicația software.

În secțiunile următoare sunt analizate pe rând scenariile de test pentru trei exemple de degradări ale cablurilor.

6.1 Analiza rezultatelor detecției coroziunii externe

Pentru detecția coroziunii externe sunt urmați cei patru pași specificați mai sus. La pasul 1 s-a stabilit un set de imagini de *training* format din 50 de imagini, din care 35 de imagini prezintă coroziune externă distribuită în 6 nivele de gravitate și 15 imagini nu prezintă semne de coroziune. Aceste 50 de imagini conțin toate nivele de gravitate implementate și în raționarea bazată pe logica fuzzy descrise în Tabelul 5.1.

Imaginile de test au fost obținute de la 2 poduri suspendate pe cabluri utilizate pentru traversarea conductelor de utilități peste râul Someșul Mic pe strada Porțelanului din Municipiul Cluj-Napoca. Unul dintre podurile de test este prezentat în Figura 6.1:



Figura 6.1 Pod suspendat cu cabluri afectate de coroziune

Structura cablului testat a fost de 6 x 19 WSC. Pentru testare au fost folosite 4 seturi a câte 30 de imagini de test fiecare. Structura seturilor de imagini este prezentată în Tabel 6.1

Nr. crt.	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având cabluri corodate	Nr. de imagini cu cabluri intacte
Set 1	30	25	5
Set 2	30	20	10
Set 3	30	15	15
Set 4	30	10	20

Tabel 6.1

Descrierea rezultatele obținute în urma rulării aplicației de detecție sunt prezentate în Tabel 6.2. Metricile de evaluare au fost următoarele:

1. Numărul de imagini în care s-a detectat prezența cablurilor corodate în raport cu numărul de imagini din setul de test în care este certificată existența coroziunii;
2. Numărul de imagini clasificate în mod fals ca fiind afectate de coroziune raportat la numărul total de imagini din set;
3. Numărul de imagini clasificate în mod fals ca nefiind afectate de coroziune raportat la numărul total de imagini din set;
4. Valoarea procentuală a acurateței absolute a detecției coroziunii în imagini.

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu coroziune / Nr. real de img. cu coroziune	Nr. de img. clasificat în mod fals ca fiind afectat de coroziune	Nr. de img. clasificat în mod fals ca nefiind afectat de coroziune	Acuratețea absolută a detecției coroziunii (%)
Set 1	21/25	2/30	6/30	76%
Set 2	17/20	3/30	6/30	70%
Set 3	13/15	2/30	4/30	73,33%
Set 4	8/10	0/30	2/30	80%

Tabel 6.2

Analiza rezultatelor relevă în primul rând faptul că există o tendință de deteriorare în acuratețea absolută a detecției coroziunii proporțională cu creșterea numărului de imagini din setul de test în care sunt prezente cabluri afectate de coroziune. Totuși, această tendință manifestă o excepție pentru rularea pe setul nr. 1. În al doilea rând se poate observa că numărul de imagini în care există coroziune dar sunt clasificate în mod fals ca fiind intacte are valori care cresc proporțional cu numărul de imagini din setul de test în care sunt prezente cabluri afectate de coroziune.

În figura de mai jos este prezentat modul în care sunt localizate zonele afectate de coroziune în cadrul imaginilor de ieșire ale sistemului de detecție. Peste imaginea originală surprinsă de sistemul de detecție sunt suprapuse cu culoarea verde locațiile zonelor afectate de coroziune. Acesta este modul în care componentele de raportare a rezultatelor din cadrul sistemului de monitorizare a cablurilor prezintă vizual detecția coroziunii.

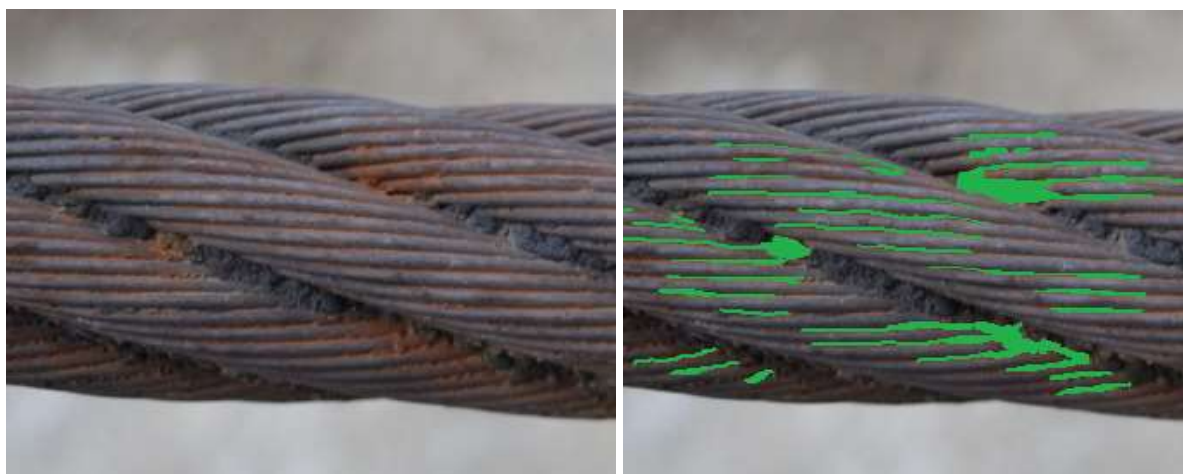


Figura 6.2 Rezultatele grafice ale experimentului

6.2 Analiza detecției abraziunii externe

În cazul testării existenței abraziunii externe a cablurilor s-a folosit în prima fază experimentală un set de 40 de imagini de *training*. Imaginile au fost obținute prin fotografierea la sol a unor secțiuni de cabluri scoase din uz, care au fost în prealabil utilizate la instalații de tip de teleschi în stațiunea Arieșeni din județul Alba. În cadrul laboratorului s-au încercat și inducerea artificială a abraziunii externe la mai multe segmente de cablu noi dar nu s-au obținut rezultate similare cu cele din situ și nu s-au putut folosi imagini ale mostrelor rezultate în experimente.

În tabelul Tabel 6.3 este prezentată structura setului imaginilor de *training*:

Nr. crt.	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini cu cabluri afectate de abraziune	Nr. de imagini cu cabluri intacte
Set 1	40	20	20
Set 2	40	15	25
Set 3	40	10	30
Set 4	40	5	35

Tabel 6.3

Setul de imagini de test utilizate pentru detecția abraziunii a fost compus din 30 de imagini, s-au refolosit 15 imagini din setului de *training*. Abraziunea externă a fost prezentă în 5 dintre ele iar 10 au fost ale unor cabluri intacte. În cadrul celor 15 imagini noi au existat pe rând: 0 imagini cu cabluri afectate de abraziune + 15 intacte, apoi 5 imagini cu cabluri afectate de abraziune + 10 intacte, apoi 10 imagini cu cabluri afectate de abraziune + 5 intacte și în final 15 imagini cu cabluri afectate de abraziune + 0 intacte.

Metricile de evaluare a rezultatelor au fost următoarele:

1. Numărul de imagini în care s-a detectat prezența cablurilor cu abraziune în raport cu numărul de imagini din setul de test în care este confirmată existența abraziunii externe;
2. Numărul de imagini clasificate în mod fals ca fiind afectate de abraziune externă raportat la numărul total de imagini din set;
3. Numărul de imagini clasificate în mod fals ca nefiind afectate de abraziune externă raportat la numărul total de imagini din set;
4. Valoarea procentuală a acurateții absolute a detecției abraziunii în imagini.

Rezultatele rulării algoritmilor de detecție pe setul de imagini de test sunt prezentate în Tabel 6.4

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu abraziune / Nr. real de img. cu abraziune externă	Nr. de img. clasificate în mod fals ca fiind afectat de abraziune ext.	Nr. de img. clasificate în mod fals ca nefiind afectat de abraziune externă	Acuratețea absolută a detecției abraziunii (%)
Set 1	19/20	3/30	4/30	80%

Set 2	14/15	2/30	3/30	80%
Set 3	9/10	1/30	2/30	80%
Set 4	4/5	0/30	1/30	80%

Tabel 6.4

Rezultatele obținute scot în evidență o acuratețe constantă a detecției pe seturile de imagini de test. În urma analizei individuale a fiecărei imagini din set s-a constatat că algoritmi de detecție clasifică eronat aproximativ aceleași imagini de fiecare dată. Această manifestare poate avea surse multiple. În imaginile clasificate greșit s-au constatat fie condiții nefavorabile de orientare a camerei față de cablul fotografiat, fie prezență impurităților pe suprafața cablurilor.

6.3 Analiza detecției firelor individuale rupte

Pentru detecția firelor individuale rupte s-au stabilit mai multe seturi de imagini de *training* formate fiecare din câte 30 de imagini. Ținând cont de nivelele de gravitate stabilite conform tabelului 5.3. Au fost construite 5 categorii de seturi de test prezentate mai jos.

Maxim 1 fir rupt/toron /înfașurare completă	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având 1 fir rupt	Nr. de imagini cu toate firele intacte
Subset 1.1	30	25	5
Subset 1.2	30	20	10
Subset 1.3	30	15	15
Subset 1.4	30	10	20

Tabel 6.5

Maxim 2 fire rupte/ toron/înfașurare completă	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având 2 fire rupte	Nr. de imagini cu toate firele intacte
Subset 2.1	30	25	5
Subset 2.2	30	20	10
Subset 2.3	30	15	15
Subset 2.4	30	10	20

Tabel 6.6

Maxim 3 fire rupte/ toron/înfașurare completă	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având 3 fire rupte	Nr. de imagini cu toate firele intacte
Subset 3.1	30	25	5
Subset 3.2	30	20	10
Subset 3.3	30	15	15
Subset 3.4	30	10	20

Tabel 6.7

Maxim 4 fire rupte/ toron/înfășurare completă	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având 4 fire rupte	Nr. de imagini cu toate firele intacte
Subset 4.1	30	25	5
Subset 4.2	30	20	10
Subset 4.3	30	15	15
Subset 4.4	30	10	20

Tabel 6.8

Maxim 6 fire rupte/ toron/înfășurare completă	Nr. de imagini din set	Nr. de imagini având 6 fire rupte	Nr. de imagini cu toate firele intacte
Subset 6.1	30	25	5
Subset 6.2	30	20	10
Subset 6.3	30	15	15
Subset 6.4	30	10	20

Tabel 6.9

Imaginile din cadrul seturilor de *training* au fost obținute din două surse. Prima sursă sunt imagini ale unor cabluri cu structură de tip 6 x 19 + WSC folosite în cadrul instalațiilor de ridicare la poduri rulante din cadrul S.C. PREBET AIUD S.A. în perioada anilor 2011-2012. A doua sursă sunt imagini ale unor cabluri cărora li s-au cauzat degradări în laborator pentru a simula degradările apărute în condiții de operare. Acest set suplimentar a fost necesar deoarece imaginile obținute în situ au fost insuficiente și nu au acoperit complet seturile descrise în tabelele de mai sus.

Pentru fiecare dintre cele 5 nivele de gravitate prezentate mai sus s-au efectuat ulterior rulări pe seturi de imagini de test conținând 30 de imagini fiecare. Seturile de test au fost construite pe baza seturilor de *training* prin înlocuirea a aproximativ 50% din imagini cu imagini necunoscute pentru algoritmi de detecție. Noile imagini de test au provenit în proporție de 40% din prima sursă prezentată anterior iar restul au fost obținute în laborator.

Metricile de evaluare a rezultatelor detecției unui singur fir rupt/toron/înfășurare au fost următoarele:

1. Numărul de imagini din subset în care s-a detectat prezența unui singur fir rupt în raport cu numărul de imagini din subsetul de test în care este certificată existența firului rupt;
2. Numărul de imagini din subset clasificate în mod fals ca prezentând un singur fir rupt raportat la numărul total de imagini din subset;
3. Numărul de imagini din subset clasificate în mod fals ca neavând un fir rupt raportat la numărul total de imagini din set;
4. Valoarea procentuală a acurateții absolute a detecției unui fir rupt.

Rezultatele obținute în urma rulării aplicației de detecție pe subseturile 1.1 – 1.4 sunt prezentate în Tabel 6.10

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu fir rupt / Nr. real de img. cu fir rupt	Nr. de img. clasificat in mod fals ca având un fir rupt	Nr. de img. clasificat in mod fals ca neavând un fir rupt	Acuratețea absolută a detecției unui fir rupt (%)
Set 1.1	24/25	3/30	4/30	84%
Set 1.2	20/20	2/30	2/30	90%
Set 1.3	14/15	1/30	2/30	86,66%
Set 1.4	10/10	1/30	1/30	90%

Tabel 6.10

Metricile de evaluare a rezultatelor detecției a 2 fire rupte/toron/înfașurare au fost următoarele:

1. Numărul de imagini din subset în care s-a detectat prezența a 2 fire rupte în raport cu numărul de imagini din subsetul de test în care este certificată existența a 2 fire rupte;
2. Numărul de imagini din subset clasificate în mod fals ca prezentând 2 fire rupte raportat la numărul total de imagini din subset;
3. Numărul de imagini din subset clasificate în mod fals ca neavând 2 fire rupte raportat la numărul total de imagini din set;
4. Numărul de imagini în care s-a detectat doar un fir rupt sau mai mult de 2 fire rupte raportat la numărul de imagini din subsetul de test în care este certificată existența a 2 fire rupte (obs. acest număr este inclus în nr. de la pct. anterior);
5. Valoarea procentuală a acurateței absolute a detecției a 2 fire rupte.

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu 2 fire rupte / Nr. real de img. cu 2 fire rupte	Nr. img. clasificat in mod fals ca având 2 fire rupte /nr. total img. subset	Nr. img. clasificat in mod fals ca neavând 2 fire rupte	Nr. img. detectate având 1 fir sau > 2 fire rupte	Acuratețea absolută a detecției a 2 fire rupte (%)
Set 2.1	22/25	2/30	5/30	3/25	80%
Set 2.2	18/20	1/30	3/30	3/20	85%
Set 2.3	13/15	0/30	2/30	1/15	86,66%
Set 2.4	9/10	0/30	1/30	1/10	90%

Tabel 6.11

Analiza rezultatelor relevă faptul că acuratețea detecției a două fire rupte este similară cu acuratețea detecției unui singur fir rupt pentru seturile care conțin imagini afectate de degradare într-un procent de până la 50% din totalul setului. Pentru un număr mai ridicat de imagini cu degradări în cadrul setului de test, acuratețea scade, dar trebuie avute în vedere informațiile furnizate de metrica nr.4 descrisă mai sus. Aceasta indică faptul că totuși se detectează prezența unui număr mai redus sau mai mare de fire rupte care va fi inclus în cadrul rapoartelor finale furnizare de către componentele de prezentare a rezultatelor.

Metricile de evaluare a rezultatelor detecției a 3, 4 sau 6 fire rupte/toron/înfășurare sunt similare metricilor pentru evaluarea a 2 fire rupte/toron/înfășurare. Rezultatele pentru subseturile 3.1 – 3.4, 4.1 – 4.4 și 6.1 – 6.4 sunt prezentate în următoarele 3 tabele.

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu 3 fire rupte / Nr. real de img. cu 3 fire rupte	Nr. img. clasificat in mod fals ca având 3 fire rupte /nr. total img. subset	Nr. img. clasificat in mod fals ca neavând 3 fire rupte	Nr. img. detectate având < 3 fire sau > 3 fire rupte	Acuratețea absolută a detecției a 3 fire rupte (%)
Set 3.1	21/25	2/30	6/30	5/25	76%
Set 3.2	16/20	1/30	5/30	3/20	75%
Set 3.3	12/15	0/30	3/30	3/15	80,00%
Set 3.4	8/10	0/30	2/30	2/10	80%

Tabel 6.12

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu 4 fire rupte / Nr. real de img. cu 4 fire rupte	Nr. img. clasificat in mod fals ca având 4 fire rupte /nr. total img. subset	Nr. img. clasificat in mod fals ca neavând 4 fire rupte	Nr. img. detectate având < 4 fire sau > 4 fire rupte	Acuratețea absolută a detecției a 4 fire rupte (%)
Set 4.1	19/25	1/30	7/30	5/25	72%
Set 4.2	15/20	0/30	5/30	5/20	75%
Set 4.3	12/15	0/30	3/30	3/15	80,00%
Set 4.4	9/10	0/30	1/30	1/10	90%

Tabel 6.13

Nr. crt.	Nr. img. detectate cu 6 fire rupte / Nr. real de img. cu 6 fire rupte	Nr. img. clasificat in mod fals ca având 6 fire rupte /nr. total img. subset	Nr. img. clasificat in mod fals ca neavând 6 fire rupte	Nr. img. detectate având < 6 fire sau > 6 fire rupte	Acuratețea absolută a detecției a 6 fire rupte (%)
Set 6.1	16/25	2/30	9/30	6/25	56%
Set 6.2	13/20	1/30	8/30	6/20	60%
Set 6.3	10/15	0/30	5/30	4/15	66,66%
Set 6.4	7/10	0/30	3/30	3/10	70%

Tabel 6.14

Odată cu creșterea numărului de fire rupte pe înfășurare apare o scădere a performanței detecției absolute, dar situația este îmbunătățibilă. Acest fapt se datorează numărului ridicat de imaginile clasificate ca având mai puține sau mai multe fire rupte decât referința pentru setul de test (3,4 sau 6).

7 Concluzii

7.1 Concluzii generale

Rezultatele cercetării descrise în teză trebuie analizate prin prisma gradului de îndeplinire a obiectivelor propuse. În cadrul cercetării s-a reușit în primul rând proiectarea arhitecturii sistemului de monitorizare a integrității structurale a cablurilor.

Componentele de achiziție și de transmisie a datelor din cadrul arhitecturii sistemului au fost dezvoltate economic folosind echipamente hardware disponibile în comerț care și-au dovedit deja fiabilitate. Acestea au fost configurate în așa fel încât să poată folosi rețelele de comunicație cablate, de mare viteză, dar și rețele fără fir, mai lente, pentru a transmite datele obținute situ.

În ceea ce privește dezvoltarea componentelor software ale sistemului s-a recurs la implementarea algoritmilor în limbajul de programare Visual C++ cu folosirea mediului de dezvoltare Microsoft Visual Studio 2010 și apoi Visual Studio 2012. Librăriile din cadrul pachetelor Microsoft au oferit deja implementări ale unor funcționalități necesare în interfață cu utilizatorul.

Analiza rezultatelor furnizate de algoritmi de procesare a imaginilor arată că sistemul poate în prezent atinge rate de acuratețe a detectării de aproximativ 70% pe seturile de date de test. Acest procent de acuratețe nu este încă suficient pentru a permite sistemului să funcționeze automat și independent dar oferă un motiv puternic pentru a lua în considerare o soluție de monitorizare bazată pe această arhitectura acestui prototip de sistem.

Sensibilitatea algoritmilor de detecție la setul de informații de *training* trebuie redusă prin calibrarea algoritmilor conform rezultatelor obținute pe seturi de imagini de test. Orice set de imagini de test odată rulat va produce rezultate care vor permite ajustarea rezultatelor produse de sistemul de detecție. La pasul imediat următor setul de test trebuie folosit ca set de *training* pentru a mări baza de cunoștințe a sistemului.

7.2 Contribuții personale

Principalele contribuții personale originale înglobate în cadrul tezei de doctorat sunt următoarele:

1. Documentarea și sintetizarea principalelor tipuri de degradări, deteriorări și scenariile de apariție și evoluție a acestora. Degradările au fost studiate prin prisma modului în care acestea se manifestă în structura cablurilor utilizate în cadrul structurilor portante cum sunt podurile suspendate sau hobanate, instalațiile de transport pe cablu sau instalațiile de ridicat.
2. Studiul și sinteza metodelor și tehnologiilor disponibile în prezent pentru monitorizarea nedistructivă a cablurilor. În cadrul sintezei s-a efectuat o analiză a fiecărei metode incluzând: istoricul și principiile de bază, tehnicile și

echipamentele utilizate și modul de evaluare a rezultatelor. Pentru fiecare metodă s-au prezentat și exemple de aplicare.

3. Propunerea arhitecturii unui prototip de sistem pentru monitorizarea nedistructivă a structurilor portante pe cabluri prin intermediul inspecției vizuale automate atât din punctul de vedere al echipamentelor hardware cât și din punct de vedere al aplicațiilor software de detecție, evaluare și prezentare a rezultatelor monitorizării. Din această contribuție derivă următoarele 2 contribuții secundare.
4. Proiectarea și implementarea prin intermediul experimentelor a unui sistem de achiziție in situ a imaginilor cablurilor și configurarea unei rețele de senzori fără fir. Configurarea rețelei senzorilor fără fir pentru obținerea de informații suplimentare cu privire la condițiile operaționale și de mediu din zona structurii.
5. Configurarea și punerea în funcțiune a unui sistem de comunicație la distanță a imaginilor digitale și a datelor despre condițiile operaționale și de mediu din situ. Înglobarea în cadrul sistemului de comunicație a mai multor tehnologii de comunicație, în principal cea bazată pe legături terestre dar și modalități de rezervă prin utilizarea transmisiilor de date în rețelele de tip 3G/GPRS sau ZigBee.
6. Dezvoltarea unui model geometric al cablului atât din perspectiva 3D cât și din perspectiva proiecțiilor 2D. Scopul dezvoltării acestui model a fost stabilirea unui model de referință care să poată fi folosit în cadrul bazelor de date și în cadrul algoritmilor de procesare a imaginilor ca element de referință pentru cablurile intacte.
7. Dezvoltarea unei modelări algoritmice a caracteristicilor mai multor tipuri de degradări ale cablurilor. Modelarea a fost realizată pentru a scoate în evidență caracteristicile geometrice, de culoare sau de textură ale fiecărei degradări. Aceste caracteristici au fost principalele șabloane căutate și detectate în cadrul imaginilor.
8. Implementarea unor algoritmi eficienți de procesare a imaginilor incluzând în principal efectuarea operațiilor de filtrare a zgomotului din imagini, de calcul și analiză a diferitelor tipuri de histograme, de detecție a muchilor și de analiză a texturilor.
9. Implementarea în cadrul aplicațiilor software a metodelor de învățare supervizată a informațiilor despre noi scenarii de manifestare a setului de degradări deja detectabile de sistemul de monitorizare. Implementarea învățării prin intermediul raționării fuzzy. Efectuarea unor studii și testări suplimentare a metodei de învățare supervizată cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale.
10. Testarea unor algoritmi de învățare nesupervizată pentru situațiile în care în imagini apar manifestări ale unor degradări ale căror caracteristici nu au fost încă modelate în baza de date. Scopul acestei învățări fiind includerea în cadrul sistemului de monitorizare a unei posibilități de identificare și raportare către experții umani a apariției elementelor de noutate în imagini.

7.3 Valorificarea rezultatelor cercetării

Rezultatele obținute pe perioada cercetării s-au concretizat prin publicarea unui număr de 15 articole în reviste de specialitate sau susținerea acestora în cadrul unor conferințe internaționale:

- [1] **D. F. Lișman** și G. Kopenetz, „Monitoring The Safety of Cable Bearing Structures,” în *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering and Materials ICCEM 2012*, Paris, Franța, 7-8 Iulie 2012.
- [2] **D. F. Lișman** și D. Kopenetz, „Cable Monitoring Technique Using Sound Propagation,” în *Proceedings of C60 International Conference*, Cluj-Napoca, Romania, 7-9 Noiembrie 2013.
- [3] **D. F. Lișman**, „Wireless sensor network used for structural health monitoring of civil infrastructure,” în *Proceedings of the International Scientific Conference CIBv 2014*, Brașov, Romania, 7-8 Noiembrie 2014.
- [4] **D. F. Lișman** și L. Kopenetz, „Nondestructive SHM of wire rope in situ,” în *Proceedings of the 2nd International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture*, Cluj-Napoca, 10-13 Decembrie 2014.
- [5] **D. F. Lișman** și L. G. Kopenetz, „Intelligent Sensor Networks Used for the Assessment of Structural Health,” în *Proceedings of the 10th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 25 Mai 2012.
- [6] **D. F. Lișman** și G. L. Kopenetz, „Advanced in situ monitoring techniques for the behavior of heritage structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2, nr. 15, pp. 55-58, 2012.
- [7] L. Kopenetz și **D. F. Lișman**, „Realtime Behavioral Monitoring of Cable Transport Structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2(15), nr. 1, pp. 49-64, 2012.
- [8] L. Kopenetz și **D. F. Lișman**, „Aspects concerning complex bearing structures monitoring,” *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, vol. 52, pp. 05-94, 2009.
- [9] G. Kopenetz, A. Cătărig și **D. F. Lișman**, „Siguranța podurilor suspendate/hobanate,” în *Proceedings of the 14th Romanian Congress of Roads and Bridges*, Cluj-Napoca, Romania, 10-13.09.2014.
- [10] G. L. Kopenetz și **D. F. Lișman**, „Monitoring Steel Bearing Cables Using a Sound Scanning Technique,” în *Proceedings of the 10th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 25 Mai 2012.
- [11] G. L. Kopenetz și **D. F. Lișman**, „Implementation of Intelligent Control Systems for Bearing Structure Assessment in Seismic Areas Using Fuzzy Logic,” *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, vol. 51, nr. 1, pp. 147-156, 2008.
- [12] A. Cătărig, G. L. Kopenetz și **D. F. Lișman**, „Problems concerning in situ behavior of complex structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2, nr. 15, pp. 43-48,

2012.

- [13] F. Lazar-Mand și **D. F. Lișman**, „Comparative aspects between linear and non - linear analysis of cable structures,” în *Proceedings of the 9th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 13 Mai 2011.
- [14] F. Lazar-Mand și **D. F. Lișman**, „Practical aspects concerning nonlinear dynamic analysis,” în *Proceedings of the 8th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 28 Mai 2010.
- [15] F. Lazar-Mand și **D. F. Lișman**, „Practical Aspects about Linear Dynamic Analysis of Cable Structures,” în *Proceedings of the 6th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 30 Mai 2008.

7.4 Direcții viitoare de cercetare

Sistemul de monitorizare nedistructivă a cablurilor prin intermediul inspecției vizuale automate tratează în detaliu doar o parte din scenariile de manifestare a degradărilor cablurilor. Principalele posibilități de îmbunătățire și extindere a capacităților sistemului de monitorizare presupun următoarele abordări:

1. Implementarea la nivelul componentelor hardware de comunicație a unor tehnologii de transmisie bazate pe noile rețele mobile 4G care să poată suporta volumul de date asociat cu transmisia fără fir la distanță a imaginilor.
2. Extinderea bazei de date cu imagini de test prin utilizarea sistemului de monitorizare pe o gamă cât mai diversă de cabluri din cadrul structurilor civile, de transport de cablu sau din cadrul instalațiilor de ridicare.
3. Diminuarea prin intermediul calibrării algoritmilor de detecție a muchiiilor a numărului de rezultate fals negative și fals pozitive obținute în urma experimentelor. Scopul final al calibrării este îmbunătățirii nivelului de acuratețe al detecției pe seturile de imagini de test.
4. Îmbunătățirea modelului de raționare vagă prin adăugarea unor noi reguli în cadrul sistemului de inferență. Aceste reguli de inferență trebuie să fie construite pe baza informațiilor obținute în urma experimentelor efectuate pe seturile de imagini de test.
5. Includerea în baza de date a modelelor aferente unor tipuri de degradări încă nedetectabile cum sunt rupturile firelor și a toroanelor la interfața cu inima sau ieșirea în exterior a toronului inimă. În plus este necesară includerea de reguli suplimentare în sistemul de inferență fuzzy.
6. Dezvoltarea algoritmilor de învățare nesupervizată bazați pe modele Markov cu stări ascunse până la un nivel de performanță acceptabil pentru a permite evaluarea corectă a elementelor de noutate din imagini.

Bibliografie

- [1] R. Bhatia, „The Emergency – Does anyone know the state of India’s bridges ?,” Caravan Journal of Politics and Culture, [Interactiv]. Available: <http://caravanmagazine.in/print/3722>. [Accesat 10 .5. 2014].
- [2] „Suspension Bridges in Vietnam Hold Potential Danger,” [Interactiv]. Available: <http://tuoitrenews.vn/features/18042/suspension-bridges-in-vietnam-hold-potential-danger>. [Accesat 06 .07. 2014].
- [3] C. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, 2nd ed., McGraw Hill Professional, 2012.
- [4] Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, „Centre de cercetare ale Facultății de Construcții din UTC-N - Laboratorul de acțiuni în construcții și structuri,” [Interactiv]. Available: <http://constructii.utcluj.ro/centre-de-cercetare.html>. [Accesat 18 September 2014].
- [5] P. E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, 2nd ed., Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [6] C. Farrar și K. Worden, Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2013.
- [7] K. Worden, C. Farrar, G. Manson și G. Park, „The fundamental axioms of structural health monitoring,” în *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 2007.
- [8] Southwest Wire Rope Inc., „Technical Data Manual Wire Rope,” 2014. [Interactiv]. Available: <http://www.southwestwirerope.com/pdf/tmwr.pdf>. [Accesat 02 .08. 2014].
- [9] A. Noble & Son LTD, „Wire rope and strand,” 2014. [Interactiv]. Available: <https://www.nobles.com.au/getattachment/2378a752-1da8-48bc-93eb-9e61d093b543/PDF.aspx>. [Accesat 08 .07. 2014].
- [10] R. Verreet, „A Short History of Wire Rope,” PR GmbH, Aachen, [Interactiv]. Available: http://www.seile.com/bro_eng/casar_history.pdf. [Accesat 23 .11. 2013].
- [11] W. Heilmann, Über Funde von Oberharzer Eisendrahtseilen aus der Zeit des Erfinders, W.A.J. Albert, Erzmetall, 1976.
- [12] I. Ridge, „The development of rope,” *O.I.P.E.E.C. Bulletin*, nr. 65, 1952.
- [13] Union WireCo, „Technical Reference - Wire rope classifications and features, Form No. 1172,” 2014. [Interactiv]. Available: www.unionrope.com/Resource_/TechnicalReference/2255/Rope%20construction-classification.pdf. [Accesat 04 .06. 2014].
- [14] E. Forestier-Walker, A History of the Wire Rope Industry of Great Britain, London: Federation of Wire Rope Manufacturers of Great Britain, 1952.
- [15] International Organization for Standardization, „Standardul ISO2532:1974 Steel wire ropes – Vocabulary,” 1974, revizuit în 2008. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:7471:en>. [Accesat 17 .07. 2013].
- [16] G. Kopenetz and F. Gobesz, "The Structural Expertise of Steel Cables," in *Proceedings of*

- „*Computational Civil Engineering 2007*” *International Symposium 25 Mai 2007*, Iași, Romania, 2007.
- [17] Union WireCo, „Wire rope User’s Handbook, Form No. 1001K,” 2014. [Interactiv]. Available: http://unionrope.com/Resource_/TechnicalReference/2243/WireCoHandbook_Form1001K_final.pdf. [Accesat 01 .06. 2014].
- [18] International Organization for Standardization, „Standardul ISO17893:2004 Steel wire ropes – Vocabulary, designation and classification,” 2004, revizuit în 2012. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17893:ed-1:v1:en>. [Accesat 14 .12. 2013].
- [19] International Organization for Standardization, „Standardul ISO4345:1988 Steel wire ropes – Fiber main cores -- Specification,” 1988, revizuit în 2004. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4345:ed-2:v1:en>. [Accesat 19 .01. 2014].
- [20] International Organization for Standardization, „Standardul ISO2408:2004 Steel wire ropes for general purposes – Minimum requirements,” 2004. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2408:ed-3:v1:en>. [Accesat 14 .01. 2014].
- [21] R. Verreet, „New wire rope designs for multi layer drums,” *Wire Rope Technology Aachen*, Aachen, Germania, 2003.
- [22] Matron Rope & Wire Engineering Ltd. Israel, „Failure Analysis,” [Interactiv]. Available: <http://www.mre-rope.com/PAGE4.asp>. [Accesat 01 .07. 2014].
- [23] Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, „Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts,” Her Majesty’s Stationary Office, Norwich, UK, 2004.
- [24] F. Stahl și C. Garnon, *Cable corrosion in bridges and other structures: causes and solutions*, New York, NY: ASCE Press, 1996.
- [25] Z. Zimmerman și H. Reemsnyder, „Axial Corrosion Fatigue of Wire Rope.,” în *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, S.U.A., 6 Mai 1985.
- [26] B. Miller, „Material selection for failure prevention.,” în *Failure Analysis and Prevention – ASM Handbook*, vol. 11, W. Becker, Ed., MetalsPark, OH, S.U.A., ASM International, 2002, pp. 24-39.
- [27] M. Mallick, S. Mitra și D. Basak, „Corrosion Behaviour of FLC Wires,” *International Journal of Science and Research*, vol. 3, nr. 8, 2014.
- [28] Y. Shuto, Y. Tokunaga, T. Mriya, T. Kagoyama, S. Hara și K. Yamakawa, „Abrasion degradation of wire rope and synthetic fiber rope,” în *OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, 2004.
- [29] C. Chaplin, I. Ridge și A. Tytko, „Measurement of abrasive wear on wire ropes using non-destructive electro-magnetic inspection,” *O.I.P.E.E.C. Bulletin*, nr. 78, pp. 67-80, 1999.
- [30] Bridon American, „North American Catalog,” 2014. [Interactiv]. Available: <http://www.bridon.com/x/downloads/BAC.pdf>. [Accesat 04 .08. 2014].
- [31] R. Verreet, „Wire rope damage due to fatigue and drum crushing,” *O.I.P.E.E.C. Bulletin*, nr. 85, Iunie, 2003.
- [32] H. Weischedel, „Crane Wire Rope Damage and Nondestructive Inspection Methods,” NDT Technologies Inc., [Interactiv]. Available: <http://www.slideshare.net/chaari/crane-wire-rope-damage-and-inspection-methods>. [Accesat 01 .02. 2014].

- [33] M. Van Zyl, „Discard criteria for mine winder ropes – Final Report,” Safety in Mines Research Advisory Committee, Project Nr. 502, 2000.
- [34] S. Mostert și P. Musgrove, „Winder rope bottom layer (back end) maintenance,” în *O.I.P.E.E.C. Conference „How to get the most out of your ropes: Rope-machine interaction, rope maintenance and lubrication”*, Johannesburg, Africa de Sud, 12-14 septembrie 2007.
- [35] American Society of Mechanical Engineers, „B30 Standards,” [Interactiv]. Available: <https://cstools.asme.org/csconnect/CommitteePages.cfm?Committee=L01200000>, [Accesat 24 .02. 2014].
- [36] Cranes Today Magazine, „Tying up the loose ends,” [Interactiv]. Available: <http://www.cranestodaymagazine.com/features/tying-up-the-loose-ends/>. [Accesat 23 .04. 2014].
- [37] Brugg Wire Rope, „Tech Tips: Rope Defects,” [Interactiv]. Available: http://bruggnorthamerica-com.securec7.ezhostingserver.com/CATALOG/15.TechTips_RopeDefects_EN.pdf. [Accesat 18 .07. 2014].
- [38] H. Tabatabai, „Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems: A Synthesis of Highway Practice,” National Research Council, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.
- [39] D. Lişman și G. Kopenetz, „Monitoring The Safety of Cable Bearing Structures,” în *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering and Materials ICCEM 2012*, Paris, Franța, 7-8.07.2012.
- [40] D. Lişman și D. Kopenetz, „Cable Monitoring Technique Using Sound Propagation,” în *Proceedings of C60 International Conference*, Cluj-Napoca, Romania, 7-9 Noiembrie 2013.
- [41] L. Kopenetz și D. Lişman, „Realtime Behavioral Monitoring of Cable Transport Structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2(15), nr. 1, pp. 49-64, 2012.
- [42] H.-B. Yun, S.-H. Kim, L. Wu și J.-J. Lee, „Development of Inspection Robots for Bridge Cables,” *The Scientific World Journal*, vol. 2013, pp. 1-17, 2013.
- [43] International Organization for Standardization, „Standardul ISO4309:2010 Cranes -- Wire ropes -- Care and maintenance, inspection and discard,” 2010. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4309:ed-4:v1:en>. [Accesat 17 .03. 2014].
- [44] H. Ho, K. Kim, Y. Park și J. Lee, „An efficient image-based damage detection for cable surface in cable-stayed bridges,” *NDT & E International*, vol. 58, pp. 18-23, 2013.
- [45] A. Mironenko, „Nondestructive inspection of steel wire ropes,” în *International NDT Conference & Exhibition*, Singapore, 3 - 4 Noiembrie 2011.
- [46] ASTM, „ASTM E1571-11, Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [47] EN12927-7:2004, „Safety requirements for cableways installations designed to carry persons. ropes.,” 2004.
- [48] EN12927-8:2004, „Safety requirements for cableways installation designed to carry persons. Ropes. Magnetic rope testing (MRT),” 2004.
- [49] G. Anderson, T. Ruff și P. Sands, „Evaluation of Nondestructive Test Instruments for Wire Rope, Report of Investigations Nr. 9511,” United States Department of the Interior, Bureau of

- Mines, Washington, D.C., 1994.
- [50] J. Xu, X. Wu, C. Cheng și A. Ben, „A Magnetic Flux Leakage and Magnetostrictive Guided Wave Hybrid Transducer for Detecting Bridge Cables,” *Sensors*, vol. 12, nr. 1, pp. 518-533, 2012.
- [51] D. Moll, „Innovative procedure for visual rope inspection. Lift Report 29.,” 2003.
- [52] H. Kim, Y. Kim, W. Chin și H. Yoon, „Development of Highly Efficient Construction Technologies for Super Long Span Bridge,” *Engineering*, vol. 5, nr. 8, pp. 629-636, 2013.
- [53] ASME International, „ANSI N45.2.6: Qualifications of Inspection, Examination & Test,” ASME, 1978.
- [54] M. Bloomstine și E. Stoltzner, „The Faroe Cable-Stayed Bridge - Maintenance Experience with Major Components,” în *Proceedings of the IABSE Conference Cable-Stayed Bridges, Past Present and Future*, Malmö, Suedia, 1999.
- [55] C. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 1st Edition, McGraw Hill Education, 2001.
- [56] R. Mayrbaurl și S. Camo, *Guidelines for Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Parallel Wire Cables*, Washington, 2004.
- [57] R. Nickerson, „Safety Appraisal of Suspension Bridge Main Cables, NCHRP Report,” Transportation Research Board Workshop, Newark, NJ, USA, 1994.
- [58] B. Chavel și B. Leshko, „Primer for the Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Cables,” 2012.
- [59] M. Elliot și E. Heymsfield, „Inspection of Luling Bridge Cable Stays: Case Study,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 129, 2003.
- [60] R. Verreet, „A new method for detecting wire rope defects,” în *OIPEEC Conference*, Athens, 2006.
- [61] „<http://www.ndttech.com>,” 2014. [Interactiv]. Available: http://www.ndttech.com/docs/Specification_USB_12-29-2012.pdf.
- [62] „<http://www.ndttechnologies.com>,” 2014. [Interactiv]. Available: http://www.ndttechnologies.com/Brochures/Flux%20Leakage/Wire%20Rope%20Testers/INTR_OS_booklet.pdf.
- [63] B. Cook, O. Gronau, V. Sukhorukov și E. Verdegaal, „STEEL ROPE NDT IN THE OFFSHORE INDUSTRY AND SHIPYARDS,” în *Proceedings of the 8-th European Conference on NDT*, Barcelona, Iunie 2002.
- [64] D. A. Slesarev, V. V. Sukhorukov și A. V. Semenov, „Application of MFL nondestructive testing for automated rope condition monitoring,” în *Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, Praga, Cehia, 6-10 Octombrie 2014.
- [65] V. V. Sukhorukov, D. A. Slesarev și A. N. Vorontsov, „Electromagnetic Inspection and Diagnostics of Steel Ropes: Technology, Effectiveness and Problems,” *Materials Evaluation*, vol. 72, nr. 8, pp. 1019-1027, 2014.
- [66] „<https://www.nde-ed.org>,” 2014. [Interactiv]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.htm>.
- [67] H. Kwun, „Waves of the future,” *Technology Today*, 2003.

- [68] R. Piervincenzo, E. Sorrivi, F. Lanza di Scalea și E. Viola, „Wavelet-based outlier analysis for guided wave structural monitoring: Application to multi-wire strands,” *Journal of Sound and Vibration*, nr. 307, pp. 52-68, 2007.
- [69] J. Xu, X. Wu și P. Sun, „Detecting broken-wire flaws at multiple locations in the same wire of prestressing strands using guided waves,” *Ultrasonics*, nr. 53, pp. 150-156, 2013.
- [70] „<http://www.gwanalysis.com>,” 2014. [Interactiv]. Available: http://www.gwanalysis.com/suspension_bridge_cable.html.
- [71] Pure Technologies, „Bridge Cable Assessment,” [Interactiv]. Available: <http://marketing.puretechltd.com/acton/attachment/4437/f-0019/0/-/-/-/-/file.pdf>. [Accesat 8 .10. 2014].
- [72] Pure Technologies, „CableScan - Cable Inspection for Bridges,” Pure Technologies, [Interactiv]. Available: http://www.puretechltd.com/services/cable_scan.shtml. [Accesat 07 .10. 2014].
- [73] H. M. Tensi, „THE KAISER-EFFECT AND ITS SCIENTIFIC BACKGROUND,” *JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION*, vol. 22, 2004.
- [74] J. Ou, H. Li și D. Li, „Monitoring and Failure Analysis of Corroded Bridge Cables under Fatigue Loading Using Acoustic Emission Sensors,” *Sensors*, nr. 12, pp. 3901-3915, 2012.
- [75] G. Drummond, J. Watson și P. Acarnley, „Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing,” *NDT&E International*, vol. 40, pp. 94-101, 2007.
- [76] W. Bai, M. Chai, L. Li, Y. Li și Q. Duan, „Acoustic Emission from Elevator Wire Ropes During Tensile Testing,” *Advances in Acoustic Emission Technology*, vol. 158, pp. 217-224, 2014.
- [77] L. GAILLET, H. ZEJLI, A. LAKSIMI, C. TESSIER, M. DRISSI-HABTI și S. BENMEDAKHENE, „Detection by acoustic emission of damage in cable anchorage,” în *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, 2009.
- [78] Vallen Systeme, „Products,” [Interactiv]. Available: <http://www.vallen.de/products/>. [Accesat 05 .06. 2014].
- [79] R. Jacques, T. Clarke, S. Morikawa și T. Strohaecker, „Monitoring the structural integrity of a flexible riser during dynamic loading with a combination of non-destructive testing methods,” *NDT&E International*, nr. 43, pp. 501-506, 2010.
- [80] T. Swiatczak, M. Tomczyk, B. Wiecek și R. Olbrycht, „Defect detection in wire welded joints using thermography investigations,” *Materials Science and Engineering B*, vol. 177, pp. 1239-1242, 2012.
- [81] S. Bagavathiappan, B. Lahiri, C. Soumya, V. Mahendran, V. Pillai, J. Philip și T. Jayakumar, „Infrared thermography based defect detection in ferromagnetic specimens using a low frequency alternating magnetic field,” *Infrared Physics & Technology*, nr. 64, pp. 125-133, 2014.
- [82] P. Peterka, J. Kresak, S. Kropuch și L. Novak, „Measurement of tight in steel ropes by a mean of thermovision,” *Measurement*, vol. 50, pp. 93-98, 2014.
- [83] P. Peterka, S. Kropuch și J. Kresak, „Testing methods of steel wire ropes at the anchor,” *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 17, pp. 174-178, 2012.
- [84] „<http://www.irinfo.org>,” [Interactiv]. Available:

- http://www.irinfo.org/articles/article_6_2004_handlin.html. [Accesat 09 .05. 2014].
- [85] „<http://www.bosch-ptd1.com/>,” [Interactiv]. Available: <http://www.bosch-ptd1.com/> .
- [86] „<http://en-us.fluke.com/>,” 2014. [Interactiv]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/visual-ir-thermometers/fluke-vt04-visual-ir-thermometer.html> .
- [87] J. Krešák, S. Kropuch și P. Peterka, „Testing methods of steel wire ropes at the anchor,” *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 17, nr. 3, pp. 174-178, 2012.
- [88] Y. Ni, K. Wong și Y. Xia, „Health Checks through Landmark Bridges to Sky-high Structures,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 14, nr. 1, pp. 103-119, Februarie 2011.
- [89] G. L. Kopenetz și D. F. Lișman, „Implementation of Intelligent Control Systems for Bearing Structure Assessment in Seismic Areas Using Fuzzy Logic,” *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, vol. 51, nr. 1, pp. 147-156, 2008.
- [90] L. G. Kopenetz, „Contribuții la calculul structurilor portante cu cabluri, Teza de doctorat,” IPC-N, Cluj-Napoca, 1989.
- [91] H. Wood, „A Survey of Publications Dealing with Corrosion in Wire Rope, Report 71-3,” Dep. Of Civil & Mechanical Engineering, The Catholic University of America, Washington, D.C., S.U.A, 1971.
- [92] G. Rebel, R. Verreet și B. Schmitz, „Degradation mechanisms of wire ropes operating on multi-layer crane and mine hoisting drums,” în *O.I.P.E.E.C. Conference Safe Use of Ropes*, College Station, TX, S.U.A., 22-24 martie 2011.
- [93] K. Wong și Y. Ni, „Modular architecture of structural health monitoring system for cable-supported bridges,” în *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, vol. 5, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2009, p. 2089–2105.
- [94] Panasonic, „Outdoor camera firmware,” [Interactiv]. Available: http://ssbu-t.psn-web.net/Library/White_paper/English/outdoor/Tough_outdoor_camera_en.pdf.. [Accesat 15 .08. 2014].
- [95] D. Zimmerman și S. Smith, „Model refinement and damage location for intelligent structures,” *Intelligent Structural Systems*, vol. VIII, pp. 403-452, 1992.
- [96] M. Bement și T. Bewley, „Optimal excitaton design for damage detection using adjoint based optimization Psrt 2. Experimental verification,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, nr. 3, pp. 794-803, 2009.
- [97] F. Lazar-Mand și D. F. Lișman, „Practical Aspects about Linear Dynamic Analysis of Cable Structures,” în *Proceedings of the 6th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 30 Mai 2008.
- [98] F. Lazar-Mand și D. F. Lișman, „Practical aspects concerning nonlinear dynamic analysis,” în *Proceedings of the 8th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 28 Mai 2010.
- [99] F. Lazar-Mand și D. F. Lișman, „Comparative aspects between linear and non - linear analysis of cable structures,” în *Proceedings of the 9th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 13 Mai 2011.
- [100] R. Gupta și R. Hartley, „Linear Pushbroom Cameras,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 19, pp. 963-975, 1997.
- [101] Basler AG, „Basler user's manual for color line cameras,” [Interactiv]. Available:

- http://www.cosyco.de/kameras/zeilenkameras/basler/xxlpdf/sprint_Color_Handbuch.pdf.
[Accesat 14 .01. 2014].
- [102] E. B. Bayer, „Color imaginig array”. S.U.A. Brevet US 3971065 A, 08 .07. 1976.
- [103] Teledyne Dalsa, „Line Scan Imaging Basics,” Teledyne Dalsa, Boston, S.U.A., 2014.
- [104] Teledyne Dalsa, „Understanding Line Scan Camera Applications,” Teledyne Dalsa, Boston, S.U.A., 2014.
- [105] Truesense imaging, „CCD Fundamentals, Revision 1.0 PS-0046,” 2012. [Interactiv]. Available: <http://www.truesenseimaging.com/support/application-notes>. [Accesat 03 .02. 2014].
- [106] T. Noergaard, Embedded Systems Architecture, Newnes, Ed., Oxford: Elsevier, 2005.
- [107] Smartek vision, „User Manual Giganetix Camera Family,” [Interactiv]. Available: https://smartek.vision/fileadmin/files/Downloads/smartekvision_giganetixusermanual_pdf.pdf. [Accesat 10 .01. 2014].
- [108] Comunicaciones Distribuidas Libelium, „Waspote Technical Guide,” [Interactiv]. Available: http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote_technical_guide.pdf. [Accesat 13 .02.].
- [109] D. F. Lişman și L. G. Kopenetz, „Intelligent Sensor Networks Used for the Assessment of Structural Health,” în *Proceedings of the 10th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 25 Mai 2012.
- [110] A. A. Marakeby, „Camera-BASed Wireless Sensor Networks for E-Health,” *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, nr. 12, December 2013.
- [111] R. J. Martinez-de Dios, A. Jimenez-Gonzales și A. Ollero, „Localization and Tracking Using Camera-Based Wireless Sensor Networks, Sensor Fusion - Foundation and Applications,” *InTECH*, 2011.
- [112] Comunicaciones Distribuidas Libelium, „Meshlium eXtreme Technical Guide,” [Interactiv]. Available: http://www.libelium.com/downloads/documentation/meshlium_technical_guide.pdf. [Accesat 25 .04. 2014].
- [113] Z. Zhang, „Camera Calibration,” în *Emerging Topics in Computer Vision*, G. Medioni și B. S. Kang, Ed., Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004, pp. 4-43.
- [114] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, „Standard 802.3af - 2003,” 18 Iunie 2003. [Interactiv]. Available: <http://www.lan-power.com/pdf/802.3af-2003.pdf>. [Accesat 22 .06. 3024].
- [115] M. Petrou și C. Petrou, Image processing: the fundamentals., West Sussex, UK.: John Wiley and Sons Ltd., 2010.
- [116] J. Esteban și A. Starr, „Building a data fusion model,” în *Proceedings of the EuroFusion 99 International Conference on Data Fusion*, Stratford-upon-Avon, UK., 1999.
- [117] ZyXEL, „UAG5100 Unified Access Gateway Users's Guide,” [Interactiv]. Available: ftp://ftp2.zyxel.com/UAG5100/user_guide/UAG5100_V4.00_Ed1.pdf. [Accesat 13 .07. 2014].
- [118] D. F. Lişman și G. L. Kopenetz, „Advanced in situ monitoring techniques for the behavior of heritage structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2, nr. 15, pp. 55-58, 2012.
- [119] E. S. Wacker și J. Denzler, „An Analysis-by-Synthesis Approach to Rope Condition

- Monitoring” în *Proceedings of the 6th International Symposium on Visual Computing (ISVC)*., Las Vegas, Nevada, S.U.A., 2010.
- [120] E. Rodner, S. E. Wacker, M. Kemmler și J. Denzler, „One-Class Classification for Anomaly Detection in Wire Ropes with Gaussian Processes in a Few Lines of Code,” în *Proceedings of the 12th IAPR Conference on MACHINE Vision*, Nara, Japonia., 2011.
- [121] D. Raupp, W. Vogel și K. H. Wehking, „Zugschwellverhalten von offenen Spiralseilen,” *Bautechnik*, vol. 84, nr. 1, pp. 41-46, 01.2007.
- [122] P. Sturm, S. Ramalingam, J.-P. Tardif, S. Gasparini și J. Barreto, „Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision,” *Journal of Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, vol. 6, nr. 1-2, pp. 1-183, Ianuarie 2011.
- [123] M. Pollefeys, A. Koschan și M. Abidi, 3D Imaging for Safety and Security (Computational Imaging and Vision), Secaucus, NJ, S.U.A.: Springer-Verlag New York, 2007.
- [124] O. Faugeras, Q.-T. Loung și T. Papadopoulou, The Geometry of Multiple Images: The Laws That Govern The Formation of Images of A Scene and Some of Their Applications, Cambridge, MA, S.U.A.: MIT Press, 2001.
- [125] C. R. Gonzalez și R. E. Woods, Digital Image Processing, Boston, MA, S.U.A.: Addison-Wesley Longman Publishing, 2001.
- [126] E.-S. Platzer, H. Süße, J. Nägele, K.-H. Wehking și J. Denzler, „On the Suitability of Different Features for Anomaly Detection in Wire Ropes,” în *Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Applications*, Berlin, Springer, 2010, pp. 296-308.
- [127] M. Trujillo și M. Sadki, „Sensitivity analysis for texture models applied to rust steel classification,” *Electronic Imaging Science and Technology*, vol. 5303, pp. 161-169, 2004.
- [128] K. Y. Choi și S. S. Kim, „Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing,” *Corrosion Science*, vol. 47, nr. 1, pp. 1-15, 2005.
- [129] K. S. Robert, R. M. Haralick și I. Dinstein, „Textural features for image classification,” *IEEE Transactions on Systems*, vol. 3, nr. 6, pp. 610-621, 1973.
- [130] S. Cagnoni, „Evolutionary image analysis and signal processing,” în *Proceedings of the 2014 conference companion on Genetic and evolutionary computation companion*, Vancouver, BC, Canada, 2014.
- [131] J. Dorsey, H. Rushmeier și F. Sillion, Digital Modeling of Material Appearance, San Francisco, CA, S.U.A.: Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- [132] C. Boguslaw, Object detection and recognition in digital images: theory and practice, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, 2013.
- [133] M. S. Prewitt, „Object enhancement and extraction,” *Picture Processing and Psychopictorics*, vol. New York: Academic, pp. 75-149, 1970.
- [134] S. Dutta, S. K. Pal, S. Mukhopadhyay și R. Sen, „Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Elsevier*, vol. 6, nr. 3, pp. 212-232, 2013.
- [135] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. %1 din %2PAMI-8, nr. 6, pp. 679-698, 1986.
- [136] A. R. Webb, Statistical Pattern Recognition, London, UK: John Wiley and Sons, 2002.

- [137] R. Danescu, „Curs Procesarea Imaginilor- Detecția Muchiilor,” [Interactiv]. Available: <http://users.utcluj.ro/~rdanescu/PI-L11r.pdf>. [Accesat 09 .08. 2014].
- [138] M. Farooque Khan, „Arc Length of an Elliptical Curve,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, nr. 8, pp. 1-5, August, 2013.
- [139] J. T. Kajiya, „The rendering equation,” *ACM SIGGRAPH Computer*, vol. 20, nr. 4, pp. 143-150, 1986.
- [140] E. Lafortune, „Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering,” PhD Thesis, Faculty of Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 1996.
- [141] E. Wacker și J. Denzler, „Enhanced Anomaly Detection in Wire Ropes by Combining Structure and Appearance,” *Pattern Recognition Letters, Elsevier*, vol. 34, nr. 8, pp. 942-953, 2013.
- [142] G. Kopenetz, A. Cătărig și F. Lișman, „Siguranța podurilor suspendate/hobanate,” în *Proceedings of the 14th Romanian Congress of Roads and Bridges*, Cluj-Napoca, Romania, 10-13.09.2014.
- [143] W. S. McCulloch și W. H. Pitts, „A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity,” *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [144] C. M. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford, UK: Clarendon Press, 1995.
- [145] L. A. Zadeh, „Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, nr. 3, pp. 338-353, 1965.
- [146] W. L. Tung și C. Quek, „A Mamdani-Takagi-Sugeno based linguistic neural-fuzzy inference system for improved interpretability-accuracy representation,” în *FUZZ-IEEE'09 Proceedings of the 18th international conference on Fuzzy Systems*, IEEE Press Piscataway, NJ, USA, 2009.
- [147] I. Elamvazuthi, P. Vasant și J. Webb, „The Application of Mamdani Fuzzy Model for Auto Zoom Function of a Digital Camera,” *International Journal of Computer Science and Information Security*, vol. 6, nr. 3, pp. 244-249, 2009.
- [148] V. Malik, A. Gautam, A. Sahai și A. Jha, „Satellite Image Classification Using Fuzzy Logic,” *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 2, nr. 3, pp. 204-207, 2013.
- [149] D. F. Lișman, „Wireless sensor network used for structural health monitoring of civil infrastructure,” în *Proceedings of the International Scientific Conference CIBv 2014*, Brașov, Romania, 7-8 Noiembrie 2014.
- [150] G. L. Kopenetz și D. F. Lișman, „Monitoring Steel Bearing Cables Using a Sound Scanning Technique,” în *Proceedings of the 10th International Symposium Computational Civil Engineering*, Iași, Romania, 25 Mai 2012.
- [151] R. Verreet, „What we can learn from wire rope failures: Predictable and unpredictable rope failures,” în *O.I.P.E.E.C. Conference Safe Use of Ropes*, College Station, TX, S.U.A., 22-24 martie 2011.
- [152] P. Peterka, K. Kresak, S. Kropuch și G. Fedorko, „Failure analysis of hoisting steel wire rope,” *Engineering Failure Analysis, Elsevier*, vol. 45, pp. 96-105, 2014.
- [153] H.-j. Wei, „The study on Security Detection Technology Based on Hyper-spectral Image Rope,” *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol. 7, nr. 4, pp. 108-115, 2013.
- [154] A. Cătărig, G. L. Kopenetz și D. F. Lișman, „Problems concerning in situ behavior of complex structures,” *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 2, nr. 15, pp. 43-48, 2012.

- [155] F. Medeiros, G. Ramalho, M. Bento și L. Medeiros, „On the Evaluation of Texture and Color Features for Nondestructive Corrosion Detection,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, 2010.
- [156] J. Nagele, K. H. Wehking, E. S. Platzer și J. Denzler, „HMM-Based Defect Localization in Wire Ropes - A New Approach to Unusual Subsequence Recognition,” în *Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5748*, Jena, Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 442-451.
- [157] L. Kopenetz și D. F. Lişman, „Aspects concerning complex bearing structures monitoring,” *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, vol. 52, pp. 05-94, 2009.
- [158] X. Xie, „A Review of Recent Advances in Surface Defect Detection using Texture Analysis Techniques,” *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, vol. 7, nr. 3, pp. 1-22, 2008.
- [159] X. Xie și M. Mirmehdi, „TEXEMS: Texture Exemplars for Defect Detection on Random Textured Surfaces,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 29, nr. 8, pp. 1454-1464, 2007.
- [160] P. R. Roberge, *Corrosion Inspection and Monitoring*, New York, NY, S.U.A.: John Wiley & Sons, 2007.
- [161] J. Zhang, „Detection and monitoring of wear using imaging methods, PhD Thesis,” University of Twente, Twente, The Netherlands, 2006.
- [162] T. Maenpaa, M. Turtinen și M. Pietikainen, „Real-time surface inspection by texture,” *Real-Time Imaging*, vol. 9, nr. 5, pp. 289-296, 2003.
- [163] H. Zheng, L. X. Kong și S. Nahavandi, „Automatic inspection of metallic surface defects using genetic algorithms,” *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier*, Vol. %1 din %2125-126, pp. 427-433, 2002.
- [164] E. Trucco și A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, New Jersey, S.U.A.: Prentice Hall, 1998.
- [165] L. A. Zadeh, „Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 28-44, 1973.
- [166] D. F. Lişman și L. Kopenetz, „Nondestructive SHM of wire rope in situ,” în *Proceedings of the 2nd International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture*, Cluj-Napoca, 10-13 Decembrie 2014.