

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT
*CERCETĂRI PRIVIND COMPORTAREA LA EROZIUNE
A CURBELOR ȘI COTURILOR FOLOSITE LA
REALIZAREA CONDUCTELOR TEHNOLOGICE ȘI DE
TRANSPORT PRODUSE PETROLIERE LICHIDE*

Autor: Ing. Adrian Marian LOSPĂ

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Răzvan George RÎPEANU

Ploiești 2021

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

*CERCETĂRI PRIVIND COMPORTAREA LA EROZIUNE
A CURBELOR ȘI COTURILOR FOLOSITE LA
REALIZAREA CONDUCTELOR TEHNOLOGICE ȘI DE
TRANSPORT PRODUSE PETROLIERE LICHIDE*

*RESEARCH ON EROSION BEHAVIOR OF PIPE
ELBOWS USED FOR LIQUID PETROLEUM FLUIDS IN
TECHNOLOGICAL AND MAIN PIPELINES*

Autor: Ing. Adrian Marian LOSPĂ

Conducător științific: Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Răzvan George RÎPEANU

Nr. Decizie 952 din 15.12.2021

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf. Univ. Dr. Ing. Dr. Mat. Ion PANĂ	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Răzvan George RÎPEANU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof. Univ. Dr. Ing. Gheorghe VOICU	de la	Universitatea Politehnica București
Referent oficial	Prof. Univ. Dr. Ing. Alexandru Valentin RĂDULESCU	de la	Universitatea Politehnica București
Referent oficial	Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Ion NAE	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Ploiești 2021

Cuprins

Listă figuri	Pag.
Listă tabele	i
Introducere	vi
Capitolul 1 Sisteme de conducte tehnologice și de transport	3
1.1. Considerații generale	6
1.2. Categorii de oțeluri folosite la fabricarea țevelor, curbelor și coturilor din componența conductelor tehnologice și de transport	7
1.3. Tipodimensiuni de țevi folosite pentru realizarea conductelor tehnologice și de transport	10
1.4. Gama de coturi și curbe folosite pentru realizarea conductelor tehnologice și de transport	13
1.5. Tipuri de imperfecțiuni întâlnite pe conductele utilizate pentru transportul hidrocarburilor	15
1.6. Analiza critică a informațiilor istorice referitoare la cedarea în exploatare a conductelor utilizate pentru transportul hidrocarburilor	17
1.7. Identificarea cauzelor și surselor de risc privind cedarea coturilor și curbelor din componența conductelor tehnologice și de transport	22
1.8. Metode de evaluare a capacității portante a coturilor și curbelor cu defecte datorate eroziunii	26
1.9. Concluzii	30
Capitolul 2 Analiza critică a proceselor de eroziune	32
2.1 Mecanismele fenomenului de eroziune – considerații generale	32
2.2 Caracterizarea uzurii erozive	35
2.3 Modele și ecuații generale dezvoltate pentru analiza fenomenelor de eroziune	38
2.4 Modele și ecuații empirice dezvoltate pentru analiza fenomenelor de eroziune în țevi și coturi	59
2.5 Modele și ecuații numerice dezvoltate pentru analiza fenomenelor de eroziune în țevi și coturi	65
2.6 Reprezentarea sistematică a modelelor generale și empirice disponibile pentru analiza eroziunii	69
2.7 Concluzii	75
Capitolul 3 Evaluarea capacității portante a coturilor și curbelor cu defecte de tip “lipsă de material”	77
3.1 Evaluarea gravității defectelor de tip “lipsă de material” conform API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service	77
3.1.1 Verificarea condițiilor de proiectare: determinarea t_{min} și $MAWP$	78
3.1.2 Evaluare Nivel 1 conform API 579 Partea 4 – cu utilizarea măsurătorilor individuale ale grosimii de perete a cotului/curvei	86
3.1.3 Evaluare Nivel 1 conform API 579 Partea 4 - cu utilizarea profilelor grosimii de perete a cotului/curvei	87
3.1.4 Evaluare Nivel 2 conform API 579 Partea 4 – cu utilizarea măsurătorilor individuale ale grosimii de perete a cotului/curvei	90
3.1.5 Evaluare Nivel 2 conform API 579 Partea 4 – cu utilizarea profilelor grosimii de perete a cotului/curvei	91
3.1.6 Evaluare Nivel 1 conform API 579 Partea 5 – cu utilizarea profilelor grosimii de perete a cotului/curvei	92

3.1.7	Evaluare Nivel 2 conform API 579 Partea 5 – cu utilizarea profilelor grosimii de perete a cotului/curbei	97
3.1.8	Evaluarea duratei de viață remanente a cotului/curbei afectat de imperfecțiuni tip „lipsă de material”	101
3.1.9	Metode de remediere aplicabile în cazul echipamentelor supuse fenomenelor de eroziune	103
3.1.10	Incertitudini referitoare la datele de intrare necesare pentru evaluarea gravității defectelor de tip „lipsă de material” conform API 579	105
3.2	Evaluarea gravității defectelor de tip “lipsă de material” conform BS 7910 – Engineering Critical Assessment	106
3.2.1	Aplicabilitatea metodelor de evaluare	108
3.2.2	Evaluarea imperfecțiunii de tip „lipsă de material”	110
3.2.3	Imperfecțiuni de tip „lipsă de material” prezente pe coturi	111
3.2.4	Evaluarea combinată a imperfecțiunilor grupate de tip „lipsă de material”	113
3.3	Aplicație informatică de evaluare a imperfecțiunilor de tip „lipsă de material” pe curbe și coturi	114
3.4	Concluzii	116
Capitolul 4	Modelarea fenomenelor de eroziune în țevi și coturi	119
4.1	Analiza CFD – considerații generale	119
4.2	Analiza CFD în cazul a 9 configurații de curbe/coturi – determinarea vitezei de eroziune și a traiectoriei particulelor	123
4.3	Modelarea statistică de tip „Design Experimental” a comportamentului la eroziune a curbelor și coturilor	130
4.4	Concluzii	138
Capitolul 5	Încercări experimentale destinate stabilirii comportării la eroziune a curbelor și coturilor utilizate la conductele tehnologice și de transport	140
5.1.	Structura și descrierea standului experimental	140
5.2.	Caracterizarea fluidului de lucru vehiculat în cadrul standului experimental	143
5.3.	Caracterizarea particulelor de nisip din cadrul fluidului de lucru	145
5.3.1	Analiza spectrală a particulelor de nisip	145
5.3.2	Granulometria particulelor de nisip	148
5.3.3	Factorul de formă al particulelor de nisip	152
5.4.	Măsurarea în exploatare a grosimii de perete a curbelor și coturilor	155
5.5.	Concluzii	171
Capitolul 6	Analiza CFD în vederea stabilirii comportării la eroziune pe standul experimental	173
6.1	Definirea scopului analizei	173
6.2	Crearea modelului geometric și a rețelei de discretizare	173
6.3	Alegerea condițiilor de calcul și a modelului fizic	176
6.4	Calculul, monitorizarea soluției și examinarea rezultatelor	182
6.5.	Concluzii	188
Capitolul 7	Concluzii generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare	197
Bibliografie		198
Anexa A1		208
Anexa A2		212
Anexa A3		214

Listă de figuri

Figura	Denumire	Pagina
1.1	Conducte de transport amplasate suprateran, pe suporturi multiple	6
1.2	Conducte de distribuție	6
1.3	Conducte tehnologice utilizate într-o instalație de proces	7
1.4	Forma și dimensiunilor caracteristice ale principalelor tipuri de coturi și curbe	14
1.5	Dimensiunile uzuale ale coturilor și curbelor obținute cu ajutorul echipamentelor de curbare la cald a țevelor încălzite prin inducție	14
1.6	Numărul anual de incidente conform EGIG	17
1.7	Numărul cumulat de incidente conform EGIG	18
1.8	Distribuția incidentelor – 2007 – 2016 conform EGIG	18
1.9	Lungimea de conducte în funcție de grosimea de perete	18
1.10	Analiză incidente - Relația dintre grosimea de perete și frecvența de apariție a incidentelor determinate de eroziune/coroziune	19
1.11	Numărul anual de incidente conform UKOPA	19
1.12	Numărul cumulat de incidente conform UKOPA	20
1.13	Numărul anual de incidente conform CONCAWE	21
1.14	Numărul anual de incidente în funcție de temperatura produselor petroliere transportate	21
1.15	Cauzele incidentelor pe conductele de transport produse petroliere la temperaturi ridicate	21
1.16	Cauzele incidentelor pe conductele de transport produse petroliere la temperaturi normale	22
1.17	Cauzele incidentelor pe conductele de transport produse petroliere la temperaturi ridicate conform informațiilor CONCAWE	22
1.18	Definirea accidentelor tehnice – conform informațiilor din API 1160	23
1.19	Posibilele solicitări și deteriorări la care sunt supuse conductele	24
1.20	Arborele de evenimente tipic pentru cedarea unei conducte de transport gaze naturale conform PD 8010-3	25
1.21	Arborele de evenimente tipic pentru cedarea unei conducte de transport lichide conform PD 8010-3	25
1.22	Defecte de tip lipsă de material, produse prin eroziune, depistate pe diverse coturi și curbe	26
1.23	Metode de depistare a pierderilor de material de pe tubulatura conductelor	26
2.1	Schema pentru modelul de calcul al uzurii erozive	36
2.2	Variația $F(\alpha)$ în funcție de tipul materialului (ductil vs. fragil)	36
2.3	Mecanismele de producere a eroziunii și modurile de deteriorare	37
2.4	Factorii ce influențează fenomenele de eroziune	37
2.5	Schema de calcul pentru determinarea volumului de material îndepărtat prin eroziune – model ideal bi-dimensional al unei particule erodente rigide ce taie un metal ductil	40
2.6	Modelul de eroziune Oka – Mecanismul de eroziune produs printr-un proces repetat de deformare plastică și tăiere a materialului lovit de particule	56
2.7	Modelul de eroziune Oka - Comparatie între rata de eroziune obținută experimental și rata de eroziune calculată conform (2.85)	57
2.8	Efectul parametrilor de impact asupra exponenților k_1 și k_2	58

2.9	Modelul de eroziune Salama și Venkatesh - Comparație între rata de eroziune obținută experimental și rata de eroziune calculată conform relației (2.96)	62
2.10	Modele generale de eroziune - Factori ce țin cont de materialul supus eroziunii	69
2.11	Modele generale de eroziune - Factori ce țin cont de proprietățile particulei erodente	70
2.12	Modele generale de eroziune - Factori ce țin cont de condițiile de lucru	70
2.13	Modele generale de eroziune - Numărul de factori întâlniți în ecuații	71
2.14	Modele empirice și numerice de eroziune - Factori ce țin cont de materialul erodat, de proprietățile particulei erodente și de condițiile de lucru	71
2.15	“Tabelul periodic al modelelor de eroziune” - Reprezentarea sistematică a modelelor generale pentru analiza eroziunii	73
2.16	“Tabelul periodic al modelelor de eroziune” - Reprezentarea sistematică a modelelor empirice și numerice pentru analiza eroziunii pe țevi și coturi	74
3.1	Procedura de evaluare a unui component ce prezintă defecte de tip “lipsă de material” realizată conform indicațiilor din API 579-1	77
3.2	Elementele descriptive pentru coturi/curbe cu defecte	79
3.3	Forma și dimensiunile caracteristice ale defectelor superficiale locale interioare de tip „lipsă de material”	82
3.4	Zonele de inspecție în cazul coturilor și curbelor	82
3.5	Modul de determinare a CTP (Profilul critic al grosimilor)	84
3.6	Modul de stabilire a dimensiunilor pentru CTP în cazul unor suprafețe adiacente ce prezintă „lipsă de material”	85
3.7	Modul de stabilire a CTP în cazul unei imperfecțiuni izolate și a unor imperfecțiuni multiple	86
3.8	Procedura de evaluare a unui component ce prezintă defecte de tip „lipsă de material” conform API 579 Partea 4	86
3.9	Modul de calcul pentru grosimea medie de perete în funcție de CTP	88
3.10	Procedura de evaluare a unui component ce prezintă defecte de tip „lipsă de material” conform API 579 Partea 5	93
3.11	Diagrama de acceptare pentru extinderea longitudinală a defectului conform Nivelului 1 de evaluare, realizată pe baza relației (3.59)	94
3.12	Factorul Folias determinat în funcție de parametrul învelișului în planul longitudinal, λ , conform (3.60)	95
3.13	Reprezentare exagerată a efectului de umflare a unei imperfecțiuni de tip „lipsă de material”	95
3.14	Procesul de divizare a secțiunii defectului în punctului curent de evaluare	99
3.15	Plăci sau camere de protecție sudate pe extradadosul coturilor și curbelor	104
3.16	Tipuri de imperfecțiuni ce se pot evalua cu ajutorul BS 7910	106
3.17	Rezultatul aplicării unei metode de control nedistructiv conform informațiilor din BS 7910	107
3.18	Procedura de evaluare a unui component ce prezintă imperfecțiuni - realizată conform indicațiilor din BS 7910	108
3.19	Tipurile de imperfecțiuni de tip „lipsă de material” ce pot fi evaluate cu BS 7910	109
3.20	Procedura de evaluare a unui component ce prezintă imperfecțiuni de tip „lipsă de material” conform BS 7910 Anexa G	110
3.21	Dimensiunile unei imperfecțiuni de tip „lipsă de material”	111
3.22	Dimensiunile unei curbe/cot utilizate pentru calculul tensiunilor de referință	112
3.23	Reguli de confirmare a interacțiunii între imperfecțiuni de tip „lipsă de material” adiacente conform BS 7910	113
3.24	Ecranul cu datele de intrare pentru aplicația informatică de evaluare a imperfecțiunilor de tip „lipsă de material” pe curbe și coturi	115

3.25 Ecranul cu rezultatele evaluării - aplicația informatică de evaluare a imperfecțiunilor de tip „lipsă de material” pe curbe și coturi

4.1	Etapele unei analize CFD	120
4.2	Dependența de timp a caracteristicilor de curgere - simulare în stare de echilibru versus simulare tranzitorie	120
4.3	Profilele de eroziune pe coturi de diferite diametre (4in, 6in, 12in)	121
4.4	Profilele de eroziune pe coturi cu diferite curburi (1.5D, 3D, 5D)	121
4.5	Profilele de eroziune pentru al doilea cot/ curba cu diferite distanțe față de primul cot/ curbă (2.5D, 5D, 7.5D)	122
4.6	Profilele de eroziune pentru modelarea deterministică și stohastică	122
4.7	Rețeaua de discretizare generată pentru curbele de tip 30°, 45° sau 90°	124
4.8	Traietoria și viteza particulelor de nisip - curbă 30°, D = 114.3 mm	127
4.9	Traietoria și viteza particulelor de nisip - curbă 45°, D = 114.3 mm	127
4.10	Traietoria și viteza particulelor de nisip - cot 90°, D = 114.3 mm	127
4.11	Rezultatele simulării CFD - curbă 30°, D = 76.1 mm	128
4.12	Rezultatele simulării CFD - curbă 45°, D = 76.1 mm	128
4.13	Rezultatele simulării CFD - cot 90°, D = 76.1 mm	128
4.14	Vitezele de eroziune în funcție de tipul curbei și de diametru conform analizei desfășurate în ANSYS Fluent	129
4.15	Fazele unei modelări statistice de tip Design Experimental	130
4.16	Factorii utilizați în cadrul analizei tip Design Experimental și nivelurile aferente	132
4.17	Structura simulărilor necesare în cadrul modelării de tip Screening Design definitiv - Minitab	133
4.18	Tipul termenilor utilizați în cadrul modelării de tip Screening Design definitiv - Minitab	133
4.19	Grafic Pareto al efectelor termenilor statistic semnificativi asupra eroziunii maxime - Minitab	134
4.20	Efectul standardizat al termenilor statistic semnificativi asupra eroziunii maxime - Minitab	134
4.21	Coeficienții termenilor modelului matematic propus în cadrul modelării de tip Screening Design definitiv	135
4.22	Tipul termenilor utilizați în cadrul modelării de tip Screening Design definitiv	135
4.23	Valorile reziduale ale modelul propus pentru determinarea eroziunii maxime - Minitab	135
4.24	Efectul factorilor semnificativi din model asupra eroziunii maxime - Minitab	136
4.25	Graficele de tip contur al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 30° și diametru D = 76.1mm - Minitab	136
4.26	Graficele de tip suprafață al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 30° și diametru D = 76.1mm - Minitab	137
5.1	Standul experimental destinat comportării în exploatare a curbelor și coturilor	140
5.2	Elementele componente ale standului experimental destinat comportării în exploatare a curbelor și coturilor	141
5.3	Pompa din cadrul standului experimental	142
5.4	Debitmetrul tip Piusi K24 uL din cadrul standului experimental	143
5.5	Manometrul clasic 0 – 6 bar din cadrul standului experimental	143
5.6	Compoziția chimică a apei de zăcământ utilizate pe stand	144
5.7	Compoziția ipotetică a soluțiilor prezente în apei de zăcământ utilizată pe stand	145
5.8	Microscopul SEM Hitachi S3400-N	146
5.9	Așezarea particulelor de nisip în vederea analizei la microscopul electronic tip SEM	146
5.10	Imaginea particulelor de nisip obținută cu ajutorul microscopului SEM	147

5.11	Rezultatele analizei spectrale pe microscopul SEM asupra particulelor de nisip	147
5.12	Dispozitivul utilizat pentru determinarea granulometriei	148
5.13	Proba de 50g de nisip utilizată pentru analiza granulometrică	148
5.14	Cantitățile de nisip reținute pe sitele dispozitivului utilizat pentru determinarea granulometriei	149
5.15	Curba granulometrică a nisipului analizat	149
5.16	Curba cumulativă procentuală a granulației particulelor de nisip	150
5.17	Curba Rosin-Rammler și distribuția particulelor de nisip	151
5.18	Modul de lucru în cazul factorului de formă a unei particule	153
5.19	Particulele de nisip măsurate în vederea stabilirii factorului de formă	154
5.20	Analiza statistică a datelor referitoare la factorul de formă a particulelor măsurate - Minitab	155
5.21	Punctele de măsurare a grosimii de perete pe traseul standului experimental	156
5.22	Aparatul ultrasonic utilizat pentru efectuarea măsurătorilor de grosime de perete în cursul exploatării standului experimental	156
5.23	Traietoria fasciculelor de transmisie și recepție în cazul traductoarelor duale ultrasonice	157
5.24	Diferența între grosimile de perete măsurate în ziua 1 de funcționare și grosimile de perete măsurate în ziua 180 de funcționare, pentru cele 4 poziții de măsurare	159
5.25	Rezultatele testării statistice ANOVA de tip unidirecțional a diferențelor de grosime de perete între ziua 1 și 180 a elementelor standului experimental - Minitab	161
5.26	Evoluția pierderii zilnice de grosime aferente fiecărei poziții de măsurare – grafice separate pentru T1 – T5 și C1 – C6	163
5.27	Rezultatele testării statistice ANOVA de tip unidirecțional a pierderii de material zilnice în cele 6 intervale de măsurare, pe cele 4 poziții de măsurare, pentru trasele drepte de țevă T1 – T5 - Minitab	165
5.28	Rezultatele testării statistice ANOVA de tip unidirecțional a pierderii de grosime zilnice în cele 6 intervale de măsurare, pe cele 4 poziții de măsurare, pentru curbele/coturile C1 – C6 - Minitab	168
5.29	Curba de eroziune pentru coturile C1 – C6	169
5.30	Curba de eroziune pentru elementele de tip țevă T1 – T5	170
5.31	Reprezentare grafică a regresiei - curba de eroziune pentru coturile C1 – C6	170
5.32	Reprezentare grafică a regresiei - curba de eroziune pentru T1 – T5	170
6.1	Modelul 3D a zonei active a standului experimental destinat comportării în exploatare a curbelor și coturilor	173
6.2	Importarea configurației geometrice a standului experimental	174
6.3	Stabilirea fețelor Inlet și Outlet, și a tipului configurației geometrice	174
6.4	Deschiderea modulului Meshing în vederea editării	174
6.5	Stabilirea opțiunilor implicite pentru generarea rețelei de discretizare	174
6.6	Activarea funcției avansate pentru stabilirea dimensiunii elementelor de discretizare	175
6.7	Activarea straturilor limită în apropierea zonei exterioare a geometriei	175
6.8	Rețeaua de discretizare a modelului 3D a zonei active a standului experimental destinat studiului eroziunii	175
6.9	Straturile limită ale rețelei de discretizare în apropierea zonei exterioare a geometriei	176
6.10	Pornirea modulului Fluent în vederea stabilirii condițiilor și modelelor	177
6.11	Stabilirea opțiunilor de procesare ale modulului Fluent	177
6.12	Stabilirea tipului de analiză și specificarea efectelor gravitaționale	177
6.13	Specificarea modelului de turbulență și a funcțiilor de comportament ale pereților	177
6.14	Modelarea fazei discrete (particule de nisip)	178

6.15	Activarea algoritmilor de calcul la eroziune	178
6.16	Straturile limită ale rețelei de discretizare în apropierea zonei exterioare a geometriei	179
6.17	Parametrii distribuției Rosin-Rammler	179
6.18	Specificarea factorul de formă	179
6.19	Selectarea materialului și proprietăților pentru fluid	180
6.20	Selectarea materialului și proprietăților pentru particulele de nisip	180
6.21	Selectarea condițiilor limită pentru fața Inlet	180
6.22	Selectarea condițiilor limită pentru faza discretă (fața Inlet)	180
6.23	Prescrierea rugozității pentru suprafața interioară a conductei	181
6.24	Selectarea condițiilor limită pentru suprafața interioară a conductei	181
6.25	Selectarea opțiunilor pentru metodele de calcul ale soluției	182
6.26	Selectarea opțiunilor pentru modul de control al calculului soluției	182
6.27	Modul de inițializare a soluției	183
6.28	Calculul și convergența soluției	183
6.29	Distribuția masică a particulelor de nisip din cadrul fluidului vehiculat în standul experimental	184
6.30	Distribuția concentrației masice a particulelor de nisip din cadrul fluidului vehiculat în standul experimental	184
6.31	Traseul particulelor de nisip în cadrul standului experimental în funcție de diametrul acestora	185
6.32	Amplitudinea și amplasarea proceselor de eroziune în funcție de rata de eroziune pe traseul activ al standului experimental	185
6.33	Secțiune și vedere din sensul negativ al axei X - Amplitudinea și amplasarea proceselor de eroziune în funcție de rata de eroziune pe traseul activ al standului experimental	186
6.34	Secțiune și vedere din sensul pozitiv al axei X - Amplitudinea și amplasarea proceselor de eroziune în funcție de rata de eroziune pe traseul activ al standului experimental	186
6.35	Distribuția și amplitudinea fenomenelor de eroziune în funcție de poziția unghiulară din cadrul secțiunii traseului de conductă al standului experimental	176
A2.1	Rezultatele simulării CFD - curbă 30°, D = 88.9 mm	212
A2.2	Rezultatele simulării CFD - curbă 45°, D = 88.9 mm	212
A2.3	Rezultatele simulării CFD - curbă 30°, D = 114.3 mm	212
A2.4	Rezultatele simulării CFD - curbă 45°, D = 114.3 mm	212
A2.5	Rezultatele simulării CFD - cot 90°, D = 88.9 mm	213
A2.6	Rezultatele simulării CFD - cot 90°, D = 114.3 mm	213
A3.1	Graficele de tip contur al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 90° și diametru D = 76.1mm	214
A3.2	Graficele de tip contur al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 30° și diametru D = 114.3mm	215
A3.3	Graficele de tip contur al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 90° și diametru D = 114.3mm	215
A3.4	Graficele de tip suprafață al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 90° și diametru D = 76.1mm	216
A3.5	Graficele de tip suprafață al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 30° și diametru D = 114.3mm	217
A3.6	Graficele de tip suprafață al modului în care factorii analizați influențează valorile eroziunii maxime în cazul curbelor de 90° și diametru D = 114.3mm	218

Listă de tabele

Tabel	Denumire	Pagina
1.1	Gruparea oțelurilor utilizate la realizarea conductelor tehnologice	7
1.2	Standarde pentru oțelurile utilizate la realizarea țevelor conductelor tehnologice	8
1.3	Tehnologii de fabricare și tipuri de țevi pentru conducte	10
1.4	Diametre exterioare și grosimi de perete ale țevelor pentru conducte tehnologice	11
1.5	Diametre exterioare și grosimi de perete ale țevelor pentru conducte de transport și distribuție	12
1.6	Abaterile admisibile la D_e și ovalitatea admisă a țevelor pentru conducte	12
1.7	Abaterile admisibile la grosimea de perete a țevelor pentru conducte	13
1.8	Tipuri de semifabricate și procese de fabricare a coturilor și curbilor	13
1.9	Tipuri de anomalii pe conductele destinate transportului produselor petroliere	16
1.10	Incidente ce au evoluat în incendii (conform UKOPA)	20
1.11	Metode de depistare a defectelor de pe tubulaturile conductelor	27
1.12	Metode de detectare a anomaliilor prezente pe tubulaturile conductelor - detecție, mărime și acuratețe	28
2.1	Tipuri de agenți erozivi și non-erozivi conform DNVGL-RP-0501	33
2.2	Clasele de eroziune conform DNVGL-RP-0501	34
2.3	Tipuri de materiale ductile și fragile	37
2.4	Proprietățile oțelurilor supuse eroziunii	37
2.5	Valori observate experimental pentru exponentul vitezei particulei erodente	48
2.6	Valori obținute experimental pentru constantele din modelul de eroziune Oka	57
2.7	Factori de corecție pentru geometrie	68
2.8	Limitări ale parametrilor folosiți în cadrul modelelor numerice	68
3.1	Valorile coeficientului de rezistență al îmbinărilor sudate longitudinal conform ASME B31.3	80
3.2	Valorile coeficientului YB31 conform ASME B31.3	81
3.3	Criteriile de interacțiune între imperfecțiunile de tip „lipsă de material” adiacente	114
4.1	Configurația geometrică a curbilor/coturilor propuse pentru analiza CFD	123
4.2	Detalii referitoare la numărul de noduri și elemente ale rețelei de discretizare conform analizei	125
4.3	Valorile coeficienților de reflecție pe direcție normală și tangențială și funcția ce caracterizează ductilitatea materialului	126
4.4	Vitezele de eroziune rezultate în urma simulării CFD	127
4.5	Rezultatele experimentale ale lui Bourgoyne referitoare la eroziune	129
5.1	Dimensiunile minime necesare pentru o bună exploatare a pompei	142
5.2	Caracteristicile apei de zăcământ utilizate în cadrul standului experimental	143
5.3	Analiza microbiologică a apei de zăcământ utilizate în cadrul standului experimental	144
5.4	Granulația particulelor de nisip utilizate împreună cu apa de zăcământ	149
5.5	Verificarea distribuției dimensiunilor particulelor de nisip: Rosin – Rammler	151
5.6	Caracteristicile cantitative ale particulelor măsurate în vederea stabilirii factorului de formă	154

5.7	Grosimile de perete [mm] măsurate în timpul funcționării standului experimental în cazul țevilor T1 – T5	158
5.8	Grosimile de perete [mm] măsurate în timpul funcționării standului experimental în cazul cotelor C1 – C6	158
5.9	Pierderile de grosimi de perete [mm] între ziua 1 și ziua 180 în funcție de poziția de măsurare a elementelor standului experimental	160
5.10	Media și deviația standard a pierderilor de grosime de perete între ziua 1 și ziua 180 pentru cele 4 poziții de măsurare	161
5.11	Pierderea de grosime zilnică [mm] în cadrul fiecărui interval de funcționare pentru fiecare poziție de măsurare de pe elementele standului experimental	162
5.12	Media și deviația standard a pierderii de grosime zilnice în cele 6 intervale de măsurare, pe cele 4 poziții de măsurare, pentru trasele drepte de țevă T1 – T5	166
5.13	Media și deviația standard a pierderii de grosime zilnice în cele 6 intervale de măsurare, pe cele 4 poziții de măsurare, pentru cotelor C1 – C6	169
6.1	Valorile coeficienților de reflecție pe direcție normală și tangențială și funcția ce caracterizează ductilitatea materialului	181
6.2	Ratele de eroziune [kg/m ² s] conform analizei CFD în funcție de poziția de măsurare, pe fiecare din elementele de tip cot sau țevă	187
6.3	Pierderile de grosimi de perete [mm] conform analizei CFD pentru 180 de zile de funcționare ale standului	187

Rezumat

Teza de doctorat intitulată „*Cercetări privind comportarea la eroziune a curbelor și coturilor folosite la realizarea conductelor tehnologice și de transport produse petroliere lichide*„ și-a propus să elucideze modul de degradare prin eroziune corozivă a coturilor și curbelor din cadrul conductelor ce transportă lichide petroliere.

Lucrarea de față are un pronunțat caracter de originalitate și aplicabilitate în practică, obiectivul principal fiind reprezentat de cercetarea comportării la eroziune corozivă a tipurilor uzuale de coturi curbate la 30°, 45°, 60° și 90°, confecționate din oțeluri de tip P275NL1, obiectiv ce a fost atins prin analizele și modelele numerice de eroziune originale realizate în **Cap. 4**, validate prin determinări experimentale prezentate în **Cap. 5**.

Ca obiective secundare, putem enumera:

- ✓ Determinarea influenței diverșilor factori asupra fenomenelor de eroziune, obiectiv atins prin analizele critice prezentate în **Cap. 2** și **Cap. 3**;
- ✓ Evaluarea capacității portante a coturilor și curbelor afectate de defecte de tip „lipsă de material”, atins prin cele prezentate în **Cap. 3**, unde s-a efectuat o analiză critică aplicată a standardelor API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service și BS 7910 – Engineering Critical Assessment;
- ✓ Determinarea influenței unghiului curbelor și coturilor asupra comportării la eroziune a acestora, obiectiv atins prin modelele numerice originale realizate în **Cap. 4** încercările experimentale din **Cap. 5**.

Caracterul de noutate al tezei reiese din o serie de contribuții personale originale, din care amintim:

- ✓ O analiză a ecuațiilor reprezentative de evaluare a eroziunii, acestea fiind grupate în trei categorii, modele generale (matematice), modele empirice și modele numerice; utilizând programul *PowerBI*, folosit pentru realizarea de vizualizări interactive, au fost construite diverse grafice ce oferă o vedere unitară asupra modelelor de eroziune și asupra factorilor utilizați în calcule;
- ✓ Printr-o abordare originală, și păstrând similitudinea cu tabelul periodic al elementelor, s-a realizat „*Tabelul periodic al modelelor de eroziune*”, în programul Microsoft Visio, pentru reprezentarea sistematică a modelelor generale, empirice și numerice;
- ✓ O sinteză a prescripțiilor din API 579/ASME FFS-1 - Fitness-For-Service și BS 7910 - *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, în care se prezintă pas cu pas, etapele ce trebuie parcurse pentru evaluarea defectelor sau imperfecțiunilor;
 - Pe baza acestor prescripții, a fost realizat un produs informatic pentru evaluarea imperfecțiunilor de tip „lipsă de material” pe curbe și coturi ” cu ajutorul programului Mathcad;

- ✓ Analiza CFD a 9 configurații de coturi/curbe cu diametre, și raze de curbura diferite în ANSYS Fluent;
 - Analiza a determinat influența a 6 factori asupra vitezei de eroziune (curbură, diametru, debit fluid, concentrație abraziv, dimensiune și factor de formă abraziv);
- ✓ Modelarea statistică a celor 6 factori, cu câte 3 nivele, ce acționează concomitent și determină eroziunea.
 - Simulările au fost realizate în programul ANSYS, structura modelării fiind stabilită cu ajutorul programului de calcul statistic Minitab, utilizând o abordare de tip „Design Experimental”;
 - Astfel, au fost determinați principalii factori ce influențează aceste fenomene, concentrația nisipului și tipul curbei;
 - De asemenea, a fost obținută ecuația de regresie ce explică legătura matematică între factorii implicați în proces și apariția și mărimea fenomenelor de eroziune;
- ✓ Proiectarea și realizarea unui stand experimental ce vehiculează apă de zăcământ, împreună cu diferite concentrații de abraziv, într-un sistem de țevi și curbe/coturi la unghiuri diferite;
 - Prin realizarea curbei uzurii erozive obținute în urma determinărilor experimentale, s-au obținut 2 ecuații pentru determinarea uzurii erozive în cazul elementelor de tip țevă și a celor de tip cot;
- ✓ Analiza CFD a traseului de conducte din cadrul încercărilor experimentale;
 - În urma comparării rezultatelor obținute prin simularea CFD cu cele obținute experimental, s-a confirmat valabilitatea modelului numeric propus;

Teza de doctorat se extinde pe 7 capitole, având 169 de figuri și 44 de tabele ce transpun informațiile relevante pentru direcția generală de cercetare a tezei și pentru obiectivele individuale tratate în fiecare capitol.

În **Capitolul 1**, intitulat „*Sisteme de conducte tehnologice și de transport*”, a fost realizată o sinteză a tipurilor de materiale utilizate la construcția țevelor, coturilor și curbilor din cadrul conductelor de transport produse petroliere, precum și a factorilor ce conduc la degradări ale conductelor. De asemenea, au fost prezentate și analizate rapoartele oferite de diverse organisme ce strâng date referitoare la incidente ce apar pe conductele de transport. Astfel, s-a evidențiat că eroziunea corozivă reprezintă aproximativ 25% din totalul defectărilor, defectele sau imperfecțiunile cauzate de aceste procese fiind încadrate ca și defecte de tip „lipsă de material”.

Capitolul 2, „*Analiza critică a proceselor de eroziune*”, cuprinde o analiză a 48 de ecuații reprezentative de evaluare a eroziunii, grupate ca și modele generale (matematice), modele empirice și modele numerice. Factorii utilizați în cadrul acestor ecuații sunt reprezentativi pentru 3 mari categorii: materialul supus eroziunii, proprietățile particulelor erodente și condițiile de lucru. Referitor la materialul supus eroziunii, 22 de modele generale utilizează în calcule densitatea materialului, iar 17 din ele duritatea, 7 din ele rezistența la rupere și 5 din ele rezistența la curgere și modulul de elasticitate. Pentru a simula comportarea particulei erodente, 37 din modelele generale

au utilizat în calcule viteza particulei, 20 din ele mărimea, 14 din ele densitatea, 6 circularitatea și 3 momentul de inerție. Pentru a lua în calcul condițiile de lucru, 28 din modelele generale au utilizat o constantă de calcul, 23 din ele unghiul de impact al particulelor, 3 unghiul maxim de impact și 2 temperatura. Printr-o abordare originală, și păstrând similitudinea cu tabelul periodic al elementelor, s-a realizat **“Tabelul periodic al modelelor de eroziune”** din pentru reprezentarea sistematică a modelelor generale, empirice și numerice. Această analiză și clasificare a fost diseminată în cadrul unui articol de cercetare – *„Erosion modelling: a systematic review of available models and equations”* - prin prezentarea la conferința *„The 14th International Conference on Tribology (ROTRIB 19)”* și publicat în revista *„IOP Conference Series-Materials Science and Engineering”*.

În **Capitolul 3**, intitulat *„Evaluarea capacității portante a coturilor și curbelor cu defecte de tip lipsă de material”* a fost realizată o sinteză, a prescripțiilor din API 579/ASME FFS-1 - *Fitness-For-Service* și BS 7910 - *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. Au fost prezentate, etapele ce trebuie parcurse pentru evaluarea defectelor sau imperfecțiunilor. Pentru orice evaluare a unei imperfecțiuni de tip „lipsă de material” este nevoie de luarea în considerare a unui factor de siguranță pentru asigurarea existenței unei marje de siguranță între încărcările rezultate din operarea curentă a echipamentului și încărcările ce pot produce cedarea în zona imperfecțiunii. Pentru a ușura specialiștilor din domeniu evaluarea imperfecțiunilor pe curbe și coturi, a fost realizat un produs informatic *„Aplicație informatică de evaluare a imperfecțiunilor de tip lipsă de material pe curbe și coturi”* cu ajutorul programului Mathcad.

Capitolul 4, *„Modelarea fenomenelor de eroziune în țevi și coturi”*, cuprinde analiza CFD a 9 configurații de coturi/curbe cu diametre și raze de curbura diferite. Pe baza rezultatelor obținute, s-a concluzionat că vitezele maxime de eroziune au fost obținute în cadrul coturilor la 90°, cu mențiunea că viteza de eroziune scade pe măsură ce diametrul crește. De asemenea, din punctul de vedere al razei de curbare s-a observat că viteza de eroziune crește pe măsură ce raza de curbura crește. Pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor de eroziune în cazul curbelor/coturilor a fost realizată o modelare statistică ce a cuprins 6 factori cu câte 3 nivele (curbură, diametru, debit fluid, concentrație abraziv, dimensiune și factor de formă abraziv), ce acționează concomitent și determină eroziunea. Structura modelării a fost stabilită cu ajutorul programului de calcul statistic Minitab, utilizând o abordare de tip „Design Experimental” – DOE (Design of Experiments), simulările fiind realizate în programul ANSYS, în modulul Fluid Flow (Fluent). Astfel, s-a observat că din punct de vedere statistic, mare parte a efectelor asupra rezultatelor sunt generate de 2 factori din totalul de 6: concentrația nisipului și tipul curbei. A fost obținută ecuația de regresie ce explică legătura matematică între factorii implicați în proces și apariția și mărimea fenomenelor de eroziune. Rezultatele obținute au fost diseminate în cadrul unui articol de cercetare – *„CFD evaluation of sand erosion wear rate in pipe bends used in technological installations”*, prin prezentarea la conferința *„International Conference of Product Design, Robotics, Advanced Mechanical & Mechatronic Systems and Innovation Conference (PRASIC 18)”* și publicat în revista *„IOP Conference Series-Materials Science and Engineering”*. Articolul în cauză a beneficiat de 6 citări până în luna Noiembrie 2021 conform informațiilor din bazele de date Scopus și Google Academic.

În **Capitolul 5**, intitulat „Încercări experimentale destinate stabilirii comportării la eroziune a curbelor și coturilor utilizate la conductele tehnologice și de transport”, a fost prezentat un stand experimental ce vehiculează apă de zăcământ, împreună cu diferite concentrații de abraziv, într-un sistem de țevi și curbe/coturi la unghiuri diferite (traseu activ de țevi, curbe și coturi din oțel P275NL1 cu diametrul exterior $D_e = 88.9\text{mm}$ și grosime de perete $s = 6.3\text{mm}$ - un cot la 90° , două coturi la 45° , două coturi la 30° , un cot la 60°). A fost realizată caracterizarea abrazivului din instalație, s-a determinat prin analiză spectrală compoziția chimică a particulelor și granulometria nisipului, stabilindu-se dimensiunea medie M50 cu valoarea de 0.077, curba Rosin-Rammler a distribuției dimensiunilor și factorul de formă a particulelor de nisip cu valoarea 0.603. În urma încercărilor experimentale de eroziune s-a concluzionat că cele mai mari reduceri ale grosimii de perete au fost pentru coturile la 90° , pozițiile de măsurare ora 6 și ora 9, cu pierderi de 10-12% din grosimea inițială de perete. Au fost efectuate analize statistice ANOVA asupra rezultatelor, și s-a observat că în funcție de pierderea de grosime zilnică, cele mai mari valori au fost obținute în intervalul 1-7 zile (0.08mm/zi), urmat de 7-30 zile (0.02mm/zi), după care s-a constatat că pierderea grosimii de perete începe să se stabilizeze (se ajunge în perioada de variație liniară a uzurii erozive), cu o valoare maximă de 0.007mm/zi . Prin realizarea curbei uzurii erozive obținute în urma determinărilor experimentale, s-au obținut 2 ecuații pentru determinarea uzurii erozive în cazul elementelor de tip țevă și a celor de tip cot. Această analiză experimentală a fost diseminată în cadrul unui articol de cercetare – „*Numerical and experimental evaluations of the elbows corrosion used for the interconnection of pipes*” - prin prezentarea la conferința „10th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '20” și publicat în revista „IOP Conference Series-Materials Science and Engineering”.

Capitolul 6, „Analiza CFD în vederea stabilirii comportării la eroziune pe standul experimental”, cuprinde analiza CFD a zonei active a standului experimental, analiză ce utilizează informațiile disponibile din **Cap. 5**, referitor la granulometria particulelor de nisip (distribuție Rosin-Rammler), viteza fluidului, concentrația particulelor de nisip etc. În urma calculelor a fost observată o distribuție a vitezei fluidului de lucru cu valori mari pe intradosul curbelor și de două ori mai mici pe extrados. Datorită accelerației imprimată de fluid și datorită curgerii turbulente, se obțin viteze mărite ale particulelor de nisip, acest fapt fiind premegător apariției fenomenelor de eroziune. Analiza CFD confirmă rezultatele experimentale, elementele cel mai afectate de eroziune fiind primul cot C1- 90° și tronsonul de țevă aflat în continuarea acestuia, T2. În urma comparării rezultatelor obținute prin simularea CFD cu cele obținute experimental, s-a confirmat valabilitatea modelului numeric propus.

În **Capitolul 7**, intitulat „Concluzii generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare”, se regăsesc principalele concluzii ce reies din desfășurarea cercetărilor doctorale, precum și contribuțiile originale subiectul studiat, ale autorului, împreună cu două posibile direcții viitoare de cercetare, una referitoare la creșterea duratei de viață a coturilor/curbelor prin schimbarea unghiului de impact a particulelor din fluidul de lucru, și alta referitoare la optimizarea geometriei curbelor și coturilor în vederea creșterii duratei de viață în exploatare.

Abstract

The PhD Thesis „*Research on erosion behavior of pipe elbows used for liquid petroleum fluids in technological and main pipelines*„ aims to elucidate the erosion / corrosion degradation mechanism for elbows and curved pipes from pipelines carrying oil liquids.

This paper has a strong originality and applicability in practice, the main objective being the investigation of the corrosive erosion behavior of the usual types of 30 °, 45 °, 60 ° and 90 ° elbows, made of P275NL1 steels, objective that was achieved through the analyzes and original numerical models of erosion made in **Chap. 4**, validated by experimental determinations presented in **Chap. 5**.

As secondary objectives, we can list:

- ✓ Determining the influence of various factors on erosion phenomena, an objective achieved through the critical analyzes presented in **Chap. 2** and **Chap. 3**;
- ✓ Evaluation of the load-bearing capacity of the elbows and curves affected by “Local Thin Area” type defects, achieved through those presented in Chap. 3, where an applied critical analysis of the API 579-1 / ASME FFS-1 Fitness-For-Service and BS 7910 - Engineering Critical Assessment standards was performed;
- ✓ Determining the influence of the elbow angles of curvature on their erosion behavior, an objective achieved through the original numerical models from **Chap. 4** the experimental tests in **Chap. 5**.

The novelty of the thesis stems from a series of original personal contributions, of which we can mention:

- ✓ An analysis of the representative equations for erosion assessment, grouped in three categories, general (mathematical) models, empirical models and numerical models; various graphs were built, offering a unitary view on the erosion patterns and on the factors used in the calculations, using PowerBI, (a software used to create interactive visualizations);
- ✓ Through an original approach, and keeping the similarity with the periodic table of elements, the "Periodic Table of Erosion Models" was created using Microsoft Visio, to have a systematic representation of general, empirical and numerical models;
- ✓ A summary of the requirements of API 579 / ASME FFS-1 - Fitness-For-Service and BS 7910 - Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, which presents step by step, the steps to be taken to assess defects or imperfections;
 - Based on these prescriptions, a computer product was developed to evaluate “Local Thin Area” imperfections on elbows, using Mathcad;

- ✓ CFD analysis of 9 configurations of elbows / bends with different diameters, and radii of curvature in ANSYS Fluent;
 - The analysis determined the influence of 6 factors on the erosion rate (elbow curvature angle, diameter, fluid flow rate, sand particle concentration, sand particle size and shape factor);
- ✓ Statistical modeling of the 6 factors, with 3 levels each, which act simultaneously and determine erosion.
 - The simulations were performed in ANSYS, the modeling structure being established with the help of Minitab statistical calculation program, using a "Design of Experiments" approach;
 - Thus, the main factors influencing the erosion phenomena were determined: the sand particle concentration and the elbow curvature angle;
 - Also, a regression equation was obtained, to explain the mathematical connection between the factors involved in the process and the occurrence and magnitude of the erosion phenomena;
- ✓ Design and construction of an experimental stand conveying field water, together with different concentrations of abrasive, in a system of pipes and bends / elbows at different curvature angles;
 - By determining the erosive wear curve from the experimental data, I derived 2 equations that can be used to calculate the erosive wear for pipes and for elbows / bends;
- ✓ CFD analysis of the pipeline used in the experimental tests;
 - Following the comparison of the results obtained by CFD simulation with those obtained experimentally, I confirmed the validity of the proposed numerical model;

The PhD thesis extends on 7 chapters, with 169 figures and 44 tables that transpose the relevant information for the general direction of the thesis research and for the individual objectives covered in each chapter.

Chapter 1, titled "Technological and transport pipeline systems", provides a summary of the material types used for the pipes, bends and elbows from oil transportation pipelines, as well as factors leading to pipeline degradation. Various reports provided by bodies that collect data on incidents on transport pipelines were presented and analyzed. Thus, it was highlighted that corrosive erosion represents approximately 25% of the total number of defects, defects or imperfections caused by these processes being classified as "Local Thin Area" type defects.

Chapter 2, "Critical Analysis of Erosion Processes," contains an analysis of 48 representative erosion assessment equations, grouped as general (mathematical) models, empirical models, and numerical models. Factors used in these equations are representative of 3 major categories: eroded material, eroding particle properties, and working conditions. Regarding the material subjected to erosion, 22 general models use in the calculations the density of the material, and 17 of them the hardness, 7 of them the breaking strength and 5 of them the yield strength and the modulus of elasticity. To simulate the behavior of the eroding particle, 37 of the general models used in the calculations the particle speed, 20 of them the particle size, 14 of them the density, 6 the

circularity and 3 the moment of inertia. To take into account the working conditions, 28 of the general models used a calculation constant, 23 of them the particle impact angle, 3 the maximum impact angle and 2 the temperature. Through an original approach, and keeping the similarity with the periodic table of the elements, I built the "Periodic Table of Erosion Models" for the systematic representation of general, empirical and numerical models. This analysis and classification was disseminated in a research article - "*Erosion modeling: a systematic review of available models and equations*" – that was presented at "The 14th International Conference on Tribology (ROTRIB 19)" and published in the "IOP Conference Series-Materials Science and Engineering" journal.

In **Chapter 3**, titled "Assessment of the load-bearing capacity of elbows and bends with Local Thin Area type defects" I've made a summary of the API 579 / ASME FFS-1 - Fitness-For-Service and BS 7910 - Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures requirements. I presented the steps that can be taken to assess defects or imperfections. For any assessment of a "Local Thin Area" imperfection, a safety factor must be taken into account to ensure a safety margin between loads resulting from the day-to-day operation of the equipment and loads which may result in failure in the area of the imperfection. In order to make it easier for specialists in the field to evaluate imperfections on elbows and bends, I developed a software using Mathcad: "Computer application for the assessment of "Local Thin Area" imperfections on elbows and bends".

Chapter 4, "Modeling of erosion phenomena in pipes and bends", includes the CFD analysis of 9 configurations of bends / elbows with different diameters and radii of curvature. Based on the obtained results, I concluded that the maximum erosion rates were obtained for 90° elbows, with the observation that the erosion rates decrease as the diameter increases. From the point of view of the radius of curvature, it was observed that the erosion rates increase as the radius of curvature increases. For a better understanding of erosion phenomena on elbows / bends, I've built a statistical model that includes 6 factors, each one with 3 levels (elbow curvature, elbow diameter, fluid flow rate, sand particle concentration, sand particle size and shape factor), acting together and generating erosion phenomena. The model was established with the help of Minitab statistical calculation software, using a "Design of Experiments" approach, while the simulations were being performed in ANSYS, in the Fluid Flow module. Thus, it was observed that from a statistical point of view, that most of the effects are generated by 2 factors out of a total of 6: the sand particle concentration and the elbow curvature angle. The regression equation was obtained to explain the mathematical connection between the factors involved in the process and the occurrence and magnitude of the erosion phenomena. The results were disseminated in a research article - "CFD evaluation of sand erosion wear rate in pipe bends used in technological installations", that was presented at the International Conference of Product Design, Robotics, Advanced Mechanical & Mechatronic Systems and Innovation Conference (PRASIC 18)" and published in the IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. The article received 6 citations until November 2021 according to information from the Scopus and Google Scholar databases.

Chapter 5, titled "Experimental tests to determine the erosion behavior of elbows and bends used in technological and transport pipelines", presented an experimental stand conveying field water with different concentrations of sand particles through a

system of pipes and elbows / bends with different curvature angles (P275NL1 steel pipes, and bends with outer diameter $D_e = 88.9\text{mm}$ and wall thickness $s = 6.3\text{mm}$ - one 90° elbow, two 45° elbows, two 30° elbows, and a 60° one). I performed the sand particles' characterization and determined the chemical composition and the granulometry using spectral analysis, establishing that the average size M50 has the value 0.077. Also, I determined the Rosin-Rammler distribution curve for the sand particle sizes, plus the shape factor with a value of 0.603. The experimental erosion tests showcased that the largest in wall thickness reductions were for 90° elbows, at 6 o'clock and 9 o'clock measuring positions, with losses of 10-12% of the initial wall thickness. I performed ANOVA statistical analyzes on the results, and it was shown that the daily thickness loss had the greatest values for the 1-7 days' interval (0.08mm / day), followed by the 7-30 days' interval (0.02mm / day), afterwards the wall thickness loss begins to stabilize (reaches a period of linear variation of the erosive wear), with a maximum value of 0.007mm / day. By determining the erosive wear curve from the experimental data, I derived 2 equations that can be used to calculate the erosive wear for pipes and for elbows / bends. This experimental analysis was disseminated in a research article - "Numerical and experimental evaluations of the elbows corrosion used for the interconnection of pipes" - that was presented at the 10th International Conference on Tribology - BALKANTRIB '20" and published in the "IOP Conference Series-Materials Science and Engineering" journal.

Chapter 6, "CFD analysis of the erosion behavior on the experimental stand", includes the CFD analysis of the active area of the experimental stand, analysis that is using the available information from **Chap. 5**, regarding the sand particle sizes (Rosin-Rammler distribution), fluid velocity, sand particle concentration, etc. Looking on the results, I observed, a distribution of the fluid velocity with high values on the intrados of the curves and twice as low on the extrados. Due to the acceleration imprinted by the fluid and due to the turbulent flow, high velocities of sand particles are obtained, this fact being a precursor to the occurrence of the erosion phenomena. The CFD analysis confirms the experimental results, the elements most affected by erosion being the first bend C1 - 90° and the pipe section following it, T2. Comparing the results obtained by CFD simulation with those obtained experimentally, I confirmed the validity of the proposed numerical model.

Chapter 7, titled "General conclusions, personal contributions and future research directions", contains the main conclusions arising from the conduct of this doctoral research, as well as the original contributions to the subject being studied, together with two possible future research directions, one to increase the life of the bends / elbows by changing the angle of impact of the particles in the working fluid, and another related to optimizing the geometry of the elbows and bends in order to increase the service life.

Bibliografie

1. * * * Norme tehnice pentru proiectarea și execuția conductelor de alimentare din amonte și de transport gaze naturale, aprobate prin Decizia ANRGN nr. 1220/07.11.2006 (M.O. 960/29.11.2006), cu modificările la Anexa 3 a aprobate prin Decizia ANRGN nr. 1306/30.11.2006 (M.O. 990/12.12.2006)
2. Tudor, I., ș.a., *Protecția anticorozivă și reabilitarea conductelor și rezervoarelor*, Editura Universității Petrol – Gaze din Ploiești, Ploiești, 2007
3. * * * EN 13445: 2009, *Unfired pressure vessels*
4. * * * CR ISO 15608: 2000, *Welding — Guidelines for a metallic material grouping system*
5. * * * EN 10216: 2004, *Seamless steel tubes for pressure purposes*
6. * * * EN 10217: 2002, *Welded steel tubes for pressure purposes*
7. * * * STAS 8185: 88, *Oțeluri pentru țevi fără sudură destinate industriei petroliere. Mărci și condiții tehnice de calitate*
8. * * * SR EN 10208+AC:1998 – *Țevi de oțel pentru conducte destinate fluidelor combustibile*, IRS București.
9. * * * ANSI / API Specification 5L:2009 *Specification for Line Pipe*
10. * * * EN 10220: 2002 *Seamless and welded steel tubes - Dimensions and masses per unit length*
11. * * * EN 10253: 1999 *Butt - welding pipe fittings*
12. * * * DIN 2605-1 *Elbows and bends with reduced pressure factor*
13. * * * DIN 2605-2 *Elbows - Full correlation of utilization*
14. * * * ISO 3419 *Non-alloy and alloy steel butt - welding fittings*
15. * * * ANSI B16.9:2001 *Factory - Made Wrought Steel Butt - Welding Fittings*
16. Muthmann, E., Grimpe, F., *Fabrication of hot induction bends from LSAW large diameter pipes manufactured from TMCP plates*, Micro alloyed Steels for the Oil and Gas Industry International Symposium, Araxa, Brazil, January 22-27, 2006
17. * * * API 1160: 2001, *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*
18. * * * BS 7910:2013+A1:2015, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*
19. * * * ASME B31.8S-2004, *Managing System Integrity of Gas Pipelines*
20. * * * Gas Pipelines Incidents - *10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016)*, Doc. number VA 17.R.0395, March 2018
21. Goodfellow, G. D., Lyons, C. J., Haswell, J. V., *UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962 – 2016)*, Report of the UKOPA Fault And Risk Work Group, Report Number: UKOPA/17/002, , Issue 1.1, February 2018
22. * * * CONCAWE - *Performance of European cross-country oil pipelines - Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971*, Report no. 6/18, Brussels, March 2018
23. * * * API 579-1: 2016, *Fitness-For-Service*

- 24.*** PD 8010:2009, *Code of practice for pipelines*
- 25.* * * EN 14161:2003, *Petroleum and natural gas industries- Pipeline transportation systems*
- 26.*** EN 13480:2012, *Metal industrial piping*
- 27.*** ASME B31.1-2016, *Power Piping*
- 28.*** ASME B31.3-2016, *Process Piping*
- 29.*** ASME B31.4-2016, *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*
- 30.*** ASME B31.8-2014, *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*
- 31.A. Keith Escoe, *Piping and Pipeline Assessment Guide*, Gulf Professional Publishing, 2006, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7880-3.X5000-4>
- 32.* * * GRI-00/0193 - Topical Report - *Natural Gas Transmission Pipelines - Pipeline Integrity Prevention, Detection & Mitigation Practices*, The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, Gas Research Institute Pipeline Business Unit, December 2000
- 33.*** NACE RP0102-2002: *Standard Recommended Practice, In-Line Inspection of Pipelines*
- 34.Venkatesh, E. S., *Erosion damage in oil and gas wells*, Proceedings Rocky Mountain Meeting of SPE, Billings MT, May 19-21, 1986, pp 489-497
- 35.Barton, N. A., *Erosion in elbows in hydrocarbon production systems: Review document prepared by TÜV NEL Limited for the Health and Safety Executive*, 2003
- 36.Peters, J., *NEL UK Erosion Management Using Erosion Testing Combined with Erosion*, 6th European Sand Management Forum, Aberdeen, 26-27 March 2014
- 37.*** DNVGL-RP-O501: August 2015, *Managing sand production and erosion*
- 38.M. M. Salama, & E. S. Venkatesh, *Evaluation of API RP 14E Erosional Velocity Limitations for Offshore Gas Wells*, Offshore Technology Conference, 1983, <https://doi.org/10.4043/4485-MS>
- 39.E. S. Venkatesh, *Erosion Damage in Oil and Gas Wells*, SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 19-21 May, Billings, Montana 1986, <https://doi.org/10.2118/15183-MS>
- 40.H.C. Meng, K.C. Ludema, *Wear models and predictive equations: their form and content*, Wear, Volumes 181-183, Part 2, 1995, Pages 443-457, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2)
- 41.Mazdak Parsi, Kamyar Najmi, Fardis Najafifard, Shokrollah Hassani, Brenton S. McLaury, Siamack A. Shirazi, *A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications*, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 21, 2014, Pages 850-873, ISSN 1875-5100, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.10.001>.
- 42.I. Finnie, *Erosion of surfaces by solid particles*, Wear, Volume 3, Issue 2, 1960, Pages 87-103, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7).
- 43.J.G.A. Bitter, *A study of erosion phenomena part I*, Wear, Volume 6, Issue 1, 1963, Pages 5-21, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6).

44. G. L. Sheldon, I. Finnie, *The Mechanism of Material Removal in the Erosive Cutting of Brittle Materials*, ASME Journal of Energy Resources Technology, Volume 88(4), 1966, Pages 393-399, <https://doi.org/10.1115/1.3672667>
45. J.H. Neilson, A. Gilchrist, *Erosion by a stream of solid particles*, Wear, Volume 11, Issue 2, 1968, Pages 111-122, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90591-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90591-7).
46. E Goodwin, J & Sage, W & P Tilly, G. (1969). *Study of erosion by solid particles*. Archive: Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols 1-196). 184. 279-292.
47. W.J. Head, M.E. Harr, *The development of a model to predict the erosion of materials by natural contaminants*, Wear, Volume 15, Issue 1, 1970, Pages 1-46, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90184-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(70)90184-5).
48. G. L. Sheldon (1970). *Similarities and Differences in the Erosion Behavior of Materials*, Journal of Basic Engineering, <https://doi.org/10.1115/1.3425086>
49. I. Finnie, *Some observations on the erosion of ductile metals*, Wear, Volume 19, Issue 1, 1972, Pages 81-90, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(72\)90444-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90444-9)
50. G.L. Sheldon, Ashok Kanhere, *An investigation of impingement erosion using single particles*, Wear, Volume 21, Issue 1, 1972, Pages 195-209, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(72\)90257-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90257-8)
51. G.P. Tilly, *A two stage mechanism of ductile erosion*, Wear, Volume 23, Issue 1, 1973, Pages 87-96, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90044-6)
52. W.J. Head, L.D. Lineback, C.R. Manning, *Modification and extension of a model for predicting the erosion of ductile materials*, Wear, Volume 23, Issue 3, 1973, Pages 291-298, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90018-5)
53. G. Grant & W. Tabakoff, *An Experimental Investigation of the Erosive Characteristics of 2024 Aluminum Alloy*, Department of Aerospace Engineering, University of Cincinnati, 1973
54. J.H. Williams, E.K. Lau, *Solid particle erosion of graphite-epoxy composites*, Wear, Volume 29, Issue 2, 1974, Pages 219-230, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(74\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(74)90072-6)
55. W.H. Jennings, W.J. Head, C.R. Manning, *A mechanistic model for the prediction of ductile erosion*, Wear, Volume 40, Issue 1, 1976, Pages 93-112, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90021-1)
56. I. M. Hutchings, R. E. Winter and J. E. Field, *Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 348, No. 1654 (Mar. 9, 1976), pp. 379-392
57. I. Finnie, D.H. McFadden, *On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence*, Wear, Volume 48, Issue 1, 1978, Pages 181-190, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90147-3).

58. A. G. Evans, M. E. Gulden and M. Rosenblatt, *Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-Plastic Response Régime*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences Vol. 361, No. 1706 (Jun. 1, 1978), pp. 343-365
59. A. G. Evans, *Impact damage mechanics: solid projectiles*, Academic Press, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 16, 1979, pp. 1-67.
60. A. W. Ruff & S. M. Wiederhorn, *Erosion by solid particle impact*, NBSIR-78-1575, National bureau of standards, Gaithersburg md national measurement lab, 1979.
61. W. Tabakoff, R. Kotwal, A. Hamed, *Erosion study of different materials affected by coal ash particles*, Wear, Volume 52, Issue 1, 1979, Pages 161-173, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90206-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90206-0).
62. J.L. Routbort, R.O. Scattergood, A.P.L. Turner, *The erosion of reaction-bonded SiC*, Wear, Volume 59, Issue 2, 1980, Pages 363-375, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(80\)90194-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(80)90194-5)
63. J. L. Routbort, R. O. Scattergood & E. W. Kay, *Erosion of Silicon Single Crystals*, Journal of the American Ceramic Society, Volume 63, Pages 635-640, <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1980.tb09851.x>
64. I.M. Hutchings, *A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence*, Wear, Volume 70, Issue 3, 1981, Pages 269-281, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90347-1)
65. Sundararajan, P.G. Shewmon, *A new model for the erosion of metals at normal incidence*, Wear, Volume 84, Issue 2, 1983, Pages 237-258, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(83\)90266-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(83)90266-1)
66. Gottfried Beckmann, Johannes Gotzmann, *Analytical model of the blast wear intensity of metals based on a general arrangement for abrasive wear*, Wear, Volume 73, Issue 2, 1981, Pages 325-353, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90299-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90299-4)
67. S. M. Wiederhorn & B. J. Hockey, *Effect of material parameters on the erosion resistance of brittle materials*, Journal of Materials Science, Volume 18, No. 3, 1983, Pages 766-780, ISSN 1573-4803, <https://doi.org/10.1007/BF00745575>
68. J. E. Ritter, *Erosion damage in structural ceramics*, Materials Science and Engineering, Volume 71, 1985, Pages 195-201, ISSN 0025-5416, [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(85\)90230-7](https://doi.org/10.1016/0025-5416(85)90230-7)
69. A. V. Reddy, G. Sundararajan, *Erosion behavior of ductile materials with a spherical non-friable erodent*, Wear, Volume 111, Issue 3, 1986, Pages 313-323, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90190-0)
70. S. Johansson, F. Ericson & J. Schweitz, *Solid particle erosion - a statistical method for evaluation of strength properties of semiconducting materials*, Wear, Volume 115, Issues 1-2, 1987, Pages 107-120, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90202-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(87)90202-X)
71. C. Lhymn, P. Wapner, *Slurry erosion of polyphenylene sulfide-glass fiber composites*, Wear, Volume 119, Issue 1, 1987, Pages 1-11, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(87)90094-9)

72. G. Sundararajan, *A comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials*, Wear, Volume 149, Issues 1–2, 1991, Pages 111-127, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90368-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90368-5).
73. K. Ahlert, *Effect of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 Steel*, M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 1994
74. Y. Zhang, E.P. Reuterfors, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, E.F. Rybicki, *Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows*, Wear, Volume 263, Issues 1–6, 2007, Pages 330-338, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.048>.
75. K. Haugen, O. Kvernfold, A. Ronold, R. Sandberg, *Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves*, Wear, Volumes 186–187, Part 1, 1995, Pages 179-188, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07158-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07158-X).
76. Danian Chen, M. Sarumi, S.T.S. Al-Hassani, Su Gan, Zhihua Yin, *A model for erosion at normal impact*, Wear, Volume 205, Issues 1–2, 1997, Pages 32-39, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07315-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07315-2).
77. Danian Chen, M. Sarumi, S.T.S. Al-Hassani, *Computational mean particle erosion model*, Wear, Volume 214, Issue 1, 1998, Pages 64-73, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00210-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00210-X).
78. Levin, B., Vecchio, K., Marder, A., 1999. *Modeling solid-particle erosion of ductile alloys*. Metall. Mater. Trans. A 30A, 1763-1774, <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0175-9>
79. Y.I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida, *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation*, Wear, Volume 259, Issues 1–6, 2005, Pages 95-101, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
80. Y.I. Oka, T. Yoshida, *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage*, Wear, Volume 259, Issues 1–6, 2005, Pages 102-109, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
81. Cunkui Huang, S. Chiovelli, P. Minev, Jingli Luo, K. Nandakumar, *A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow*, Powder Technology, Volume 187, Issue 3, 2008, Pages 273-279, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.03.003>.
82. S. Nsoesie, R. Liu, K.Y. Chen, M.X. Yao, *Analytical modeling of solid-particle erosion of Stellite alloys in combination with experimental investigation*, Wear, Volume 309, Issues 1–2, 2014, Pages 226-232, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.026>.
83. * * * API 14E Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems, 5th edition, 1991 (revised 2000)
84. M. M. Salama, & E. S. Venkatesh, *Evaluation of API RP 14E Erosional Velocity Limitations for Offshore Gas Wells*, Offshore Technology Conference, 1983, <https://doi.org/10.4043/4485-MS>

85. E. S. Venkatesh, Erosion Damage in Oil and Gas Wells, SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 19-21 May, Billings, Montana 1986, <https://doi.org/10.2118/15183-MS>
86. Rabinowicz, E., The wear equation for erosion of metals by abrasive particles, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, 5th, Cambridge, England, 1979, pp. 38-1
87. Bourgoyne, A. T. (1989, January 1). Experimental Study of Erosion in Diverter Systems Due to Sand Production. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/18716-MS>
88. Svedeman, S.J., Arnold, K.E., 1993. Criteria for Sizing Multiphase Flow Lines for Erosive-Corrosive Service. Proceedings of 68th SPE Annual Fall Technical Conference, Houston, Paper No. SPE-26569, <https://doi.org/10.2118/26569-PA>
89. Svedeman, S.J., Arnold, K.E., 1994. Criteria for sizing multi-phase flow lines for erosive/corrosive services. SPE Prod. Facil. 9 (1), 74e80, <https://doi.org/10.2118/26569-PA>
90. Jordan, K., 1998. Erosion in Multiphase Production of Oil & Gas. Corrosion 98, Paper No. 58, NACE International Annual Conference, San Antonio
91. Shirazi S.A., Shadley J.R., McLaury B.S., Rybicki E.F., A Procedure to Predict Solid Particle Erosion in Elbows and Tees, ASME. J. Pressure Vessel Technol. 117 (1995), Pages 45-52, <https://doi.org/10.1115/1.2842089>
92. McLaury B.S., Shirazi S.A., An Alternate Method to API RP 14E for Predicting Solids Erosion in Multiphase Flow, ASME Journal of Energy Resources Technology, Volume 122, 2000, Pages 115-122, <https://doi.org/10.1115/1.1288209>
93. Lospa, A., Ripeanu, R.G., Dinita, A., *Erosion modelling: a systematic review of available models and equations*, The 14th International Conference on Tribology September 19-21, 2019 – Cluj Napoca, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 724, 2020, pp.1-11, ISSN 1757-899X, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012037>, Bristol BS1 6BE, England, 2020;
94. Barton, N. A., *Erosion in elbows in hydrocarbon production systems: Review document* prepared by TÜV NEL Limited for the Health and Safety Executive, 2003
95. Agrawal, M., *Erosion Modeling and Sand Management with ANSYS CFD*, ANSYS Houston, June 2012
96. <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/15.0.7/> ANSYS Fluent 15.0.7 Theory Guide
97. Droubi, M.G., Tebowei, R., Islam, S.Z., Hossain M., Mitchell, E., *Computational fluid dynamic analysis of sand erosion in 90° sharp bend geometry*, Ninth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD9), Istanbul, Turkey, July 11-15, 2016
98. Hadžiahmetović, H., Hodžić, N., Kahrmanović, D., Džaferović, E., *Computational Fluid Dynamics (CFD) based erosion prediction model in elbows*, Predviđeni

- model erozije koljena temeljen na računalnoj dinamici fluida, Tehnički vjesnik 21, 2(2014), pp 275-282
99. *Tutorial: Using FLUENT's Erosion Model to Investigate Erosion in a 90 degree Elbow Bend*, Fluent Inc., November 6, 2006
 100. Bourgoyne, A. T. (1989, January 1). *Experimental Study of Erosion in Diverter Systems Due to Sand Production*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/18716-MS
 101. Madhusuden Agrawal, *Erosion Modeling and Sand Management with ANSYS CFD*, ANSYS Inc., Houston, June 21, 2012
 102. Srinivasan, V., *Simulating Erosion Using ANSYS Computational Fluid Dynamics*, ANSYS Inc., November 14, 2014
 103. *Optional Lecture 2: Erosion Modelling, Advanced Multiphase Modeling*, ANSYS Inc., May 2, 2014
 104. *Tutorial 1. Introduction to Using ANSYS FLUENT in ANSYS Workbench: Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Elbow*, Release 12.1, ANSYS, Inc., September 10, 2009
 105. Sofialidis, D., *Express Introductory Training in ANSYS Fluent Workshop 01 Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Tee*, PRACE Autumn School 2013 - Industry Oriented HPC Simulations, September 21-27, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia
 106. Sofialidis, D., *Express Introductory Training in ANSYS Fluent Workshop 02 Using the Discrete Phase Model (DPM)*, PRACE Autumn School 2013 - Industry Oriented HPC Simulations, September 21-27, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia
 107. Lospa A.M., Ripeanu R.G., Dinita A., and Dudu C., *CFD Evaluation of sand erosion wear rate in pipe bends used in technological installations*, The 10th International Conference of Product Design, Robotics, Advanced Mechanical & Mechatronic Systems and Innovation Conference (PRASIC 18), 8-9 November 2018, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 514, 2019, pp.1-8, ISSN 1757-899X, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/514/1/012009>, Bristol BS1 6BE, England, 2019 <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24067665900>;
 108. Homicz, G. F., *Computational Fluid Dynamic Simulations of Pipe Elbow Flow*, SAND REPORT, SAND2004-3467, Sandia National Laboratories, 2004
 109. Bakker, A., *Lecture 15 - Discrete Phase Modeling, Applied Computational Fluid Dynamics*, Fluent Inc. (2002)
 110. *** *Pipe Erosion due to Contaminant Particles*, COMSOL, 2014
 111. Mazumder, Q., *Tutorial: investigate erosion in a 180-degree u-bend using FLUENT*, Computational Fluid Dynamics Research Center University of Michigan-Flint, USA
 112. *Designing an Experiment*, Minitab 18 support, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/>

113. * * * Minitab Blog Editor, *Getting Started with Factorial Design of Experiments (DOE)*, 25 March, 2013, <https://blog.minitab.com/blog/understanding-statistics/getting-started-with-factorial-design-of-experiments-doe>
114. Richard, N. M., *How to use Minitab: Design of Experiments*, 08/27/14
115. Goch, L., *DOE Design & Analysis Using Minitab*, February 2011
116. * * * *How to Run a Design of Experiments – Full Factorial in Minitab*, <https://goleansixsigma.com/how-to-run-a-design-of-experiments-full-factorial-in-minitab/>
117. * * * Minitab Blog Editor, *Regression Analysis: How Do I Interpret R-squared and Assess the Goodness-of-Fit?*, 30 May, 2013, <https://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>
118. A. Lospă, *Proiect de cercetare științifică: Cercetări privind îmbunătățirea calității țevelor curbate folosite la realizarea conductelor tehnologice și de transport*, UPG Ploiești, 2017.
119. Pedrollo, "VORTEX" Submersible pumps for sewage water, <https://www.pedrollo.com/en/vortex-submersible-pumps-for-sewage-water/260>
120. Piusi, *K24 Electronic Aluminum Turbine Meter – Use, maintenance and calibration manual*, <https://www.piusi.com/usa/support/search-manuals?fert=F00408U0>
121. * * * 4500-H+ pH VALUE (2017), *pH Value in Water by Potentiometry Using a Standard Hydrogen Electrode*, <https://www.standardmethods.org/doi/full/10.2105/SMWW.2882.082>
122. * * * ASTM D7777 – 12, *Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Liquid Petroleum by Portable Digital Density Meter*
123. Metoda 2510, *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association, <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.027>
124. * * * STAS 6953-81, *Ape de suprafață și ape uzate. Determinarea conținutului de materii în suspensie, a pierderii la calcinare și a reziduului de calcinare*
125. * * * ASTM D7678 – 11, *Standard Test Method for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in Water and Wastewater with Solvent Extraction using Mid-IR Laser Spectroscopy*
126. Chemetrics, *Monitoring Dissolved Oxygen in High-Pressure Boiler Systems*, Feb 2019, Ver 1, https://chemetrics.b-cdn.net/uploads/2019/01/DissolvedOxygen_CHEMetrics.pdf
127. * * * SR EN ISO 9963-1:2002, *Calitatea apei. Determinarea alcalinității. Partea 1: Determinarea alcalinității totale și permanente*
128. * * * SR 7510/1997, *Calitatea apei : Determinarea conținutului de sulfuri : Metoda iodometrică*

129. * * * SR EN ISO 11885:2009, *Calitatea apei. Determinarea elementelor selectate prin spectroscopie de emisie optică cu plasmă cuplată inductiv (ICP-OES)*
130. Hitachi, *Hitachi Model S-3400N PC-Based Variable Pressure Scanning Electron Microscope*, <https://www.ntnu.edu/documents/140082/1269041159/S-3400NSpecifications.pdf/6b94c26f-a9d4-4f36-82b3-7e9eb3603922>
131. Hitachi, *Operation Guide Hitachi S-3400N Variable Pressure Scanning Electron Microscope with Deben Peltier Coolstage*, http://lydiajoubert.com/wp-content/uploads/2009/08/SEM-S-3400N-Operations-Guide_final2.pdf
132. Hitachi, *Hitachi S-3400N Quick Start Guide*, https://adk.elsevierpure.com/files/59225448/S3400_Quick_start_guide.pdf
133. Wikipedia, *Scanning electron microscope*, https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
134. * * * STAS 5609-87 *Nisip pentru turnătorie. Condiții tehnice generale de calitate*
135. * * * ISO 3310-1: 2016, *Test sieves - Technical requirements and testing — Part 1: Test sieves of metal wire cloth*
136. Ulmanu V., Zecheru Gh., Minescu M., Săvulescu M.J., *Tehnologia materialelor. Îndrumar de laborator*, Institutul de Petrol și Gaze, Ploiești 1987
137. Rodriguez, J., Edeskar, T., Knutsson, S., *Particle shape quantities and measurement techniques - a review*, The Electronic journal of geotechnical engineering, vol.18/A, pp.169-198, 2013
138. Haider, A., Levenspiel, O., *Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles*, Powder Technology, Volume 58, pp. 63–70, 1989.
139. Austen, A., Gilbert, K., *Shape Factor in Particle-Size Measurement*, Nature 163, 527 (1949), <https://doi.org/10.1038/163527b0>
140. Carter, R. M., Yan, Y., *Measurement of particle shape using digital imaging techniques*, Journal of Physics: Conference Series 15, pp. 177–182, 2005
141. Dukov, I., Ta%neva, D., *Determination of the particle shape factor using Cauchy's theorem and image analysis*, Proceedings, Vol. II, pp. 60-63, Sozopol, 2016
142. Olympus, *Thickness and Flaw Inspection Solutions, 38DL PLUS*, [https://www.olympus-ims.com/en/38dl-plus/#!cms\[focus\]=cmsContent11056](https://www.olympus-ims.com/en/38dl-plus/#!cms[focus]=cmsContent11056)
143. Olympus, *Thickness Gage Tutorial*, <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-theory/thickness-gage/>
144. Olympus, *Precision Thickness Gaging Theory*, [https://static5.olympus-ims.com/data/Media/Precision Thickness Gaging Theory/?rev=8DC6](https://static5.olympus-ims.com/data/Media/Precision_Thickness_Gaging_Theory/?rev=8DC6)
145. Graham, P., *How the Echo-to-Echo and THRU-COAT® Techniques Measure Up for Corrosion Inspection*, InSight Blog, February 7, 2017 <https://www.olympus-ims.com/en/insight/echo-to-echo-vs-thru-coat/>

146. Olympus, Corrosion Thickness Gauging with Dual Element Transducers, Olympus Industrial Resources Application Notes, <https://www.olympus-ims.com/en/applications/corrosion-gaging-dual-element-transducers/>
147. Ripeanu R.G., Lospa A.M., Dudu C., Dinita A., *Numerical and experimental evaluations of the elbows corrosion used for the interconnection of the pipes*, 10th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '20, Belgrade, Serbia, 20 – 22 May 2021.