



**Departament d'Enginyeria
Mecànica**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



**DEPARTMENT DE ORGANE DE MAȘINI ȘI TRIBOLOGIE
UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚE ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI, ROMANIA**

Fractal approach to wheel-rail roughness contact theory

**(Abordarea fractală a teoriei contactului cu rugozitati
intre roata-si sina)**

de

Laura Mariana BABICI

Teză de doctorat în inginerie mecanică

În cadrul

UNIVERSITĂȚII NAȚIONALE DE ȘTIINȚE ȘI TEHNOLOGIE

Politehnica București, Romania (UPB)

În cotutelă cu

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

December 2023

December 2023

Mulțumiri

Finalizarea acestei lucrări de cercetare nu ar fi fost posibilă fără ajutorul și sprijinul mai multor persoane cărora doresc să le exprim recunoștința mea profundă. Doresc să îmi exprim cea mai profundă grațitudine coordonatorilor mei, Prof. Jordi Romeu și Prof. Andrei Tudor, pentru îndrumarea lor, suportul continuu pe parcursul studiilor mele doctorale și pentru răbdarea, motivația și cunoștințele lor vaste. Sfaturile lor au fost esențiale pe tot parcursul perioadei de cercetare și redactare a acestei teze. Eforturile lor neobosite de a-mi modela gândirea științifică și de a îmbunătăți claritatea și profunzimea analizelor mele merită o recunoaștere specială.

De asemenea, îmi exprim sincera recunoștință față de Dr. Cristian Ulianov, care mi-a oferit oportunitatea de a mă alătura echipei Railway Technology Team Lead ca cercetător vizitator la Universitatea din Newcastle, Marea Britanie, oferindu-mi perspective noi în cercetarea mea și ajutându-mă să îmi lărgesc orizonturile în acest domeniu de studiu.

Mulțumesc sincer conducerii Autorității Feroviare Române, Centrului de Testare Feroviară Faurei din România și conducerii Softronic Craiova, care au contribuit semnificativ prin furnizarea facilităților experimentale esențiale pentru acest studiu.

Aș dori să le mulțumesc conducerii și colegilor Autorității Feroviare Române, în special Direcției Organism Notificat - Departamentul Laboratoare, pentru tot sprijinul și înțelegerea acordată, făcând posibilă finalizarea tezei mele.

De asemenea, aș dori să îmi exprim aprecierea, în special prof. Robert Arcos, tuturor membrilor grupului de cercetare LEAM din cadrul UPC și Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie de la UPB. Această cercetare nu ar fi fost realizată fără opiniile și ideile lor valoroase. Aș dori să îmi exprim recunoștința sinceră comisiei de revizuire și îndrumare din cadrul Departamentului de Organe de Mașini și Tribologie de la UPB, formată din prof. Filip Ilie, prof. Alexandru Radulescu și prof. Adrian Predescu, pentru sprijinul lor neclintit și sugestiile valoroase care au contribuit semnificativ la rafinarea și succesul acestei cercetări.

Sunt de asemenea foarte recunoscătoare tuturor colegilor mei de la LEAM și Departamentul de Tribologie pentru prietenia și asistența lor.

La final, aș dori să le mulțumesc soțului meu, fiului meu și întregii mele familii. Sprijinul lor a depășit simpla încurajare, fiind o sursă constantă de confort și stabilitate emoțională. Rolul lor în această călătorie academică a fost la fel de vital ca orice contribuție academică, asigurându-mi echilibrul și binele necesar pentru a continua această căutare a cunoașterii.

Cuprins

Capitolul 1 Introducere.....	2
Capitolul 2 Modelarea fractala a rugozitatii sinei	9
Capitolul 3 Modelul fractal al comportamentului frecarii statice in contactul Hertzian cu rugozitati	18
Chapter 4 Fenomenul de Stick-Slip si Emisie acustica in contactul Hertzian Liniar	29
Chapter 5 Concluzii si lucrari viitoare	38
Bibliografie.....	43

Această teză cuprinde 123 de pagini, 18 tabele și 40 de figuri, o anexă, precum și 180 de referințe bibliografice. Titlurile capitolelor, alături de cele ale tabelelor și figurilor incluse în acest rezumat, sunt identice cu cele din teza completă. În plus, numerotarea ecuațiilor, tabelelor și figurilor din acest rezumat este în concordanță cu cea din teza integrală.

Prezentul rezumat este o traducere a tezei originale redactate în limba engleză, nu o redactare independentă a conținutului său.

Capitolul 1

Introducere

Acest capitol introduce teza curentă, începând cu o prezentare concisă a legislației armonizate privind rugozitatea roată-șină și implicațiile acesteia asupra zgomotului de rulare. În continuare, se oferă o explicație pentru adoptarea unei abordări fractale simulate, care vizează predicția rugozității șinelor și ai coeficienților de frecare statică. În cadrul experimentelor de contact Hertzian, emisiile acustice rezultate din mișcarea relativă a eșantioanelor cilindru-plan au servit drept indicatori pentru debutul fazei de alunecare, stabilindu-se astfel ca unelte esențiale nedistructive în detectarea și monitorizarea fenomenului de alunecare, însoțind în același timp procesul de fricțiune. Rezultatele experimentale confirmă în mod asertiv că variațiile coeficientului de frecare și exploziile de emisie acustică sunt consistent corelate în toate condițiile de presiune de contact și diferite viteze de alunecare. După prezentarea justificării, sunt conturate obiectivele principale ale tezei. Capitolul se încheie cu o scurtă prezentare a subiectelor abordate în fiecare secțiune ulterioară a tezei.

1.1. Prezentare generală

În contextul modernizării continue a infrastructurii feroviare europene, conformitatea materialului rulant cu reglementările tehnice actuale este esențială pentru a asigura interoperabilitatea și reducerea poluării fonice. Standardele europene, în special "Specificațiile Tehnice pentru Interoperabilitate" (TSI), precum și Directiva 2008/57/EC și Regulamentul (UE) Nr. 1304/2014 din 26 noiembrie 2014, subliniază necesitatea acestei conformități, având ca scop garantarea compatibilității vehiculelor pe teritoriul UE și atenuarea zgomotului feroviar. Se pune un accent deosebit pe identificarea și controlul principalelor surse de zgomot. În sectorul feroviar, se recunoaște neechivoc că interacțiunea complexă roată-șină cauzează în primul rând zgomotul de rulare. Rugozitatea ambelor componente și implicarea reciprocă influențează în mod semnificativ această interacțiune și zgomotul rezultat. Astfel, rugozitatea șinei în contactul dintre șină și roată afectează semnificativ interacțiunea microstructurală, influențând direct zgomotul de rulare (Thompson, 2003,

Chapter 1: Introduction

R.J. Diehl, P. Holm, 2006, Wu, 2006). Când o roată se deplasează pe șină cu rugozitate variabilă, interacțiunea poate genera fluctuații de zgomot datorate variației intensității contactului și contactului intermitent. Acest fenomen poate conduce la creșterea zgomotului, cu un potențial considerabil de poluare fonică în zonele adiacente căii ferate. De asemenea, rugozitatea influențează direct transmiterea forțelor prin sistemul roată-șină, generând oscilații sau vibrații verticale care afectează atât confortul pasagerilor, cât și durata de viață a componentelor și infrastructurii. (R. Arcos, 2011, E. Verheijen, 2006) În plus față de aceste efecte imediate, rugozitatea joacă un rol cheie în determinarea uzurii și a necesităților de întreținere. O șină rugoasă poate cauza uzură inegală, atât pentru roată, cât și pentru șină, rezultând în costuri crescute și necesitatea de reparații mai frecvente. Aderența dintre roată și șină poate fi, de asemenea, compromisă datorită rugozității, afectând eficiența accelerării și frânării trenului și, implicit, siguranța și performanța generală. În plus, vibrațiile induse de rugozitate pot fi transferate către structurile și solul învecinate, creând potențialul de disconfort în comunitățile apropiate și afectând structurile adiacente (Zhang, 2002). Din toate aceste motive, este clar că monitorizarea și gestionarea rugozității șinei sunt cruciale pentru un transport feroviar eficient și sigur.

În studiul rugozității suprafeței și mecanicii de contact Hertzian, metoda fractală prezintă o abordare alternativă. Fractali, structuri sau modele care se repetă la mai multe scări, evidențiază natura auto-similară observată în multe fenomene naturale, inclusiv în rugozitatea suprafeței. Prin aceste structuri fractale, devine posibilă reprezentarea eficientă a complexității rugozității, de la caracteristicile macroscopice până la asperitățile microscopice, mai eficient decât cu metodele tradiționale. Datorită proprietăților lor auto-similare și auto-afine, fractalii asigură o reprezentare consecventă a rugozității, menținând conturul general indiferent de scara la care este analizată. Utilizând funcția Weierstrass-Mandelbrot, metoda fractală folosește progresii geometrice pentru a modela și simula variațiile subtile în rugozitate. Această abordare oferă parametri specifici pentru caracterizarea rugozității care sunt independenți de rezoluția instrumentului, facilitând astfel o simulare consecventă a rugozității la diverse scări. Spre deosebire de metoda tradițională, în care analiza rugozității este limitată de rezoluția instrumentelor utilizate, metoda fractală se dovedește a fi versatilă, adaptându-se schimbărilor observate la fiecare scară. Acest atribut conferă fractalilor un avantaj distinct în ceea ce privește adaptabilitatea și analiza cuprinzătoare a suprafețelor comparativ cu metodele convenționale.

Coeficientul de frecare în transportul feroviar este important datorită influenței sale asupra interacțiunilor între suprafețele în contact, cum ar fi stabilirea capacității de a accelera, frâna sau manevra în siguranță. Acesta caracterizează de asemenea gradul de aderență sau alunecare între două suprafețe în mișcare relativă și poate determina comportamentul unui sistem în situații de frânare, tracțiune sau alunecare. Valoarea adecvată a COF asigură transmiterea eficientă a forțelor de la roată

la șină, permițând o tracțiune adecvată și evitând fenomenele nedorite, cum ar fi patinarea roților sau uzura accelerată. COF influențează, de asemenea, ratele de uzură ale șinei și roții, afectând direct costurile de întreținere și durata de viață a infrastructurii feroviare. Variabilitatea sau schimbările neprevăzute în COF pot duce la pierderea aderenței, cauzând posibil derapaje sau alunecări, cu riscuri asociate de accidente sau daune materiale. În plus, gestionarea adecvată a coeficientului de frecare ajută la prevenirea uzurii premature a componentelor, reducând costurile de întreținere și extinzând durata de viață a infrastructurii.

Fenomenul de "stick-slip" în dinamica sistemului feroviar se manifestă prin tranziții rapide și distincte între fazele de aderență și alunecare ale contactului Hertzian roată-șină, rezultând din variațiile coeficientului de frecare, schimbările condițiilor de umiditate și prezența contaminanților la interfața de contact. Acest comportament, influențat de factori mecanici și de mediu, poate induce vibrații în materialul rulant și infrastructura feroviară, ducând la emisii acustice, adesea denumite zgomot de rulare, cu potențialul de a perturba confortul pasagerilor și comunităților adiacente liniilor feroviare. În acest context, emisiile acustice (AE) sunt unelte de înaltă precizie, nedistructive, permițând observarea și analiza fenomenului de stick-slip, în special prin delimitarea clară a debutului fazei de alunecare. Mai mult, alternanța între aderență și alunecare, prin fenomenul de stick-slip, poate accelera procesele de uzură la nivelul roții și șinei, reducând semnificativ durata de viață a componentelor, crescând costurile operaționale și de întreținere și, în anumite circumstanțe, compromițând siguranța călătoriei, generând fluctuații de viteză și posibile derapaje.

Astfel de fluctuații pot afecta, de asemenea, performanța de rulare a trenului, influențând astfel eficiența generală a transportului feroviar. În cadrul menținerii integrității și funcționării optime a sistemului feroviar, abordările moderne, cum ar fi monitorizarea și ajustarea coeficientului de frecare statică prin modelare fractală, sunt promovate ca soluții inovatoare pentru gestionarea și atenuarea impactului fenomenului de stick-slip, asigurând în același timp o întreținere predictivă eficientă.

1.2. Motivatii

Monitorizarea și controlul calității căii ferate prin evaluarea rugozității măsurate sunt imperative pentru a evalua starea de funcționare a acesteia. Deși rugozitatea este adesea percepută doar ca o caracteristică fizică, ea joacă un rol semnificativ ca sursă de zgomot de rulare, având implicații majore asupra eficienței, siguranței și conformității cu mediul. Având în vedere natura multifuncțională a rugozității și manifestarea sa neuniformă la diferite scări, abordarea fractală oferă o analiză mai cuprinzătoare. Utilizarea metodelor fractale permite o înțelegere mai profundă a modelelor complexe și a auto-similarităților inerente în rugozitate, pe care metodele tradiționale le-ar putea ignora. Această perspectivă îmbunătățită obținută prin analiza fractală permite o diagnosticare mai precisă, predicție și strategii de atenuare, conducând în cele din urmă la o gestionare

mai bună a provocărilor asociate zgomotului de rulare și impacturilor ulterioare asupra operațiunilor feroviare.

Modelarea tradițională a contactului Hertzian, bazată pe interacțiunea dintre roată și șină considerând rugozitatea, nu ilustrează întotdeauna în mod precis interacțiunile complexe la interfața acestuia. Prin introducerea teoriei fractale, se deschide o nouă perspectivă asupra naturii reale a zonei de contact între roată și șină. Optând pentru teoria fractală în mecanica contactului se oferă o vedere mult mai detaliată, luând în considerare complexitățile și variațiile inerente la diferite scări prezente pe suprafețele de contact.

Abordând această perspectivă, se poate ajunge la o reprezentare și predicție mai precisă a comportamentului contactului Hertzian, creând astfel soluții mai eficiente pentru reducerea uzurii, reducerea zgomotului și optimizarea performanței în sistemele feroviare. Acest lucru justifică necesitatea unei cercetări detaliate în acest domeniu, deoarece o înțelegere profundă a acestor interacțiuni poate conduce la inovații semnificative în ingineria feroviară și îmbunătățirea generală a infrastructurii.

Fenomenul de "stick-slip", caracterizat printr-o tranziție rapidă între aderență și alunecare, are implicații profunde în domeniul feroviar, influențând performanța și siguranța operațională. O înțelegere profundă a acestui fenomen în cadrul mecanicii contactului ne permite să identificăm și să analizăm cauzele principale ale manifestării sale și modul în care poate influența comportamentul general al sistemului. Cu această bază de cunoștințe, se pot dezvolta soluții eficiente pentru a minimiza sau elimina impactul negativ al fenomenului stick-slip, oferind oportunitatea de a îmbunătăți calitatea și eficiența funcționării sistemului. Aprofundând studiul acestui fenomen în domeniul mecanicii contactului, putem dezvălui detaliile subtile și complexitățile interacțiunii, facilitând astfel dezvoltarea unor strategii mai avansate de monitorizare, control și optimizare.

1.3. Obiectivele tezei

Obiectivul principal al acestei cercetări este de a dezvolta și implementa algoritmi specifici bazati pe tehnici fractale pentru studiul rugozității în cadrul mecanicii contactului. O atenție deosebită este acordată investigării rugozității roților și șinelor feroviare pentru a furniza informații esențiale pentru întreținerea eficientă a componentelor feroviare și pentru atenuarea vibrațiilor și zgomotului de rostogolire.

Următoarele sarcini au fost întreprinse:

- Modelarea rugozității folosind formularea fractală, bazată pe analiza detaliată a 41 de parametri de rugozitate obținuți din măsurători experimentale; pentru a atinge acest obiectiv, funcția Weierstrass-Mandelbrot (W-M) a fost aplicată acestor parametri, iar rezultatele astfel

obținute au fost comparate cu datele originale pentru a verifica valabilitatea metodei fractale, cu un accent deosebit pe modelarea rugozității acustice, conform standardelor stabilite de EN ISO 15610:2019.

- Modelarea rugozității prin formularea fractală, cuprinzând parametrii mecanicii contactului și abordând în mod explicit coeficientul de frecare static (COF), oferă o înțelegere nuanțată a interacțiunilor suprafeței la diferite scări. Această metodă face posibilă captarea naturii multifacționale a interacțiunilor contactului roată-șină, care adesea scapă tehnicilor tradiționale de modelare. O astfel de abordare nu doar rafinează înțelegerea mecanismelor subiacente, dar deschide calea pentru capacități predictive îmbunătățite, ajutând în proiectarea și întreținerea sistemelor mai eficiente în contextul ingineriei feroviare.
- Analizarea comportamentului de stick-slip într-un contact Hertzian implică investigarea corelațiilor între parametrii minimi de Emisie Acustică (AE) și COF, în special la viteze de antrenare scăzute și foarte scăzute. Inițierea mișcării relative între două corpuri în fricțiune este fundamentală în înțelegerea principiului fricțiunii în tribologie. Prin această abordare, parametrii minimi AE se dovedesc a fi atât adecvați cât și suficienți pentru a detecta și monitoriza fenomenul stick-slip, identificând debutul fazei de alunecare. Acest lucru stabilește AE ca un instrument eficient și nedistructiv pentru detectarea și monitorizarea comportamentului stick-slip.
- Validarea coeficientului de frecare static folosind metoda fractalilor și compararea acestuia cu rezultatele experimentale ale coeficientului de frecare static.

1.4. Continutul tezei

Conținutul prezentei teze este împărțit în cinci capitole. Toate capitolele, cu excepția Capitolului 1 și Capitolului 5, Introducere, respectiv Concluzii și Lucrări ulterioare, includ starea actuală a artei în cadrul introducerii. Capitolele tezei sunt organizate astfel:

Capitolul 1 prezintă o introducere generală în cercetare, justificările, obiectivul și structura tezei.

Capitolul 2 introduce o metodologie care folosește tehnici de modelare fractală pentru a capta în detaliu caracteristicile rugozității șinei. Natura complexă a rugozității șinei este descrisă detaliat folosind atât structura cât și funcțiile Weierstrass Mandelbrot. Datele de la Centrul de Testare Feroviară Făurei din România validează faptul că înălțimea rugozității prezintă trăsături matematice fractale distincte. Un total de 41 de parametri statistici clasici derivați din măsurătorile de rugozitate au fost juxtapuși cu omologii lor fractali simulați. Parametri precum funcția de autocorelație, Funcția de Densitate a Amplitudinii, Curbele de Zonă de Susținere și rugozitatea acustică a șinei au fost generați folosind funcția Weierstrass. Compararea acestor parametri cu datele măsurate reale indică o congruență semnificativă. Majoritatea parametrilor au demonstrat o eroare relativă într-un interval

Chapter 1: Introduction

de 10%, subliniind eficacitatea abordării fractale în evaluarea dinamicii rugozității șinei. Prin urmare, parametrii simulați ar putea fi unelte vitale pentru evaluarea rugozității șinei, promovând întreținerea îmbunătățită a căii ferate, rectificarea și reducerea zgomotului.

Capitolul 3 se concentrează pe analiza coeficientului de frecare static (COF) și a parametrilor de contact Hertzian dintr-o perspectivă fractală. Această abordare permite modelului fractal să cuprindă aria reală de contact, reflectând asperitățile suprafeței nu ca forme geometrice ideale, ci ca structuri complexe și neregulate, care reprezintă mai precis realitatea. Aceasta îmbunătățește semnificativ înțelegerea fenomenelor din zona de contact și contribuie la o modelare mai precisă a parametrilor de contact.

Lucrarea subliniază că valoarea COF este influențată de caracteristicile materialelor suprafețelor aspre, parametrii fractali care descriu topografia și forța normală aplicată. Modelul fractal, cu capacitatea sa de a simula interacțiuni complexe la scară micrometrică, oferă o contribuție valoroasă la predicția și analiza comportamentului de contact. Astfel, deschide calea pentru proiectarea și optimizarea avansată a sistemelor mecanice, cu aplicații directe în domenii unde fricțiunea și uzura determină performanța și fiabilitatea, cum ar fi în industria feroviară. Bazându-se pe modelul WM, au fost evaluate patru regimuri de deformare: elastic, primele două elastoplastice și complet plastic. Coeficientul de frecare static, teoretic derivat din fractali și mecanica contactului, poate fi văzut ca „proprietate intrinsecă” a entității mai moi dintre cele două în contact, marcată de microgeometria sa de suprafață în termeni de dimensiuni fractale. Această abordare a mecanicii contactului în contextul fractal deschide drumul pentru avansarea unor metode mai robuste pentru gestionarea și controlul aderenței sub condiții variate de operare.

Capitolul 4 evidențiază că parametrii fundamentali AE detectează eficient fenomenul stick-slip. Folosind o configurație personalizată a tribometrului adaptată pentru aceste experimente, a fost efectuată o analiză aprofundată a semnalelor AE, ocolind necesitatea echipamentului tradițional AE. Obiectivul central al testelor a fost să exploreze interrelațiile între parametrii AE și COF, accentuând vitezele de antrenare extrem de scăzute, având în vedere că debutul mișcării relative între două corpuri în fricțiune este cheia pentru înțelegerea principiului fricțiunii în tribologie. În acest context, au fost stabilite conexiuni între caracteristicile fundamentale AE și atributele stick-slip, cum ar fi coeficienții de frecare statici și cinetici, precum și evoluția lor temporală. Testele tribologice au fost efectuate pe eșantionul cilindru-plan în condiții de fricțiune uscată la diferite presiuni de contact Hertzian și viteze de antrenare. Instalația a fost setată pentru a înregistra simultan AE, forțele normale și de fricțiune, observându-se că vârfurile AE au urmat imediat variațiilor coeficientului de frecare. Rezultatele au relevat sensibilitatea amplitudinii și energiei AE la manifestarea stick-slip, cu profiluri de energie atât pentru AE cât și pentru COF indicând modele consistente pe baza vitezei de antrenare. În cele din

Chapter 1: Introduction

urmă, coeficientul de frecare static derivat fractal a fost comparat cu coeficientul obținut experimental la o viteză de deplasare apropiată de zero.

Capitolul 2

Modelarea fractala a rugozitatii sinei

2.1. Introducere

Scopul principal al acestui capitol este de a examina natura fractală a rugozității suprafeței șinelor, bazându-se pe măsurători de rugozitate efectuate la Centrul de Testare Feroviară Făurei (TCF) din România, prin derivarea parametrilor fractali și definirea a doi parametri esențiali, D și G_f , pentru a caracteriza în mod precis rugozitatea șinei. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost realizată o evaluare și o comparație a parametrilor statistici clasici obținuți din măsurătorile de rugozitate cu parametrii fractali simulați folosind funcția WM pentru aceleași măsurători.

În plus, modelarea rugozității acustice a fost efectuată folosind funcția WM și rezultatele au fost comparate cu datele de rugozitate acustică obținute din măsurători experimentale. Prin compararea parametrilor statistici clasici cu parametrii fractali obținuți din funcția WM și analizând datele de rugozitate acustică, lucrarea își propune să ofere o perspectivă aprofundată asupra caracteristicilor fractale ale rugozității suprafeței șinei.

2.2. Theory

Pentru un semnal $y_r(x)$, a cărui increment $y_r(x_i + \tau) - y_r(x_i)$ se presupune că are o distribuție Gaussiană cu media zero, se definește o funcție numită funcție de structură (SF) în forma continua (P. R. Nayak, 1973):

$$SF(\tau) = \langle (y_r(x) - y_r(x + \tau))^2 \rangle = C_t(|\tau|)^{(4-2D)}, \quad (2.1)$$

unde τ este deplasarea de-a lungul axei x , cu $C_t = \psi G_f^{2(D-1)}$, D and G_f sunt parametrii fractali și, Ψ (A G.Y. Zhou et al., 1993) este dat de ecuația:

$$\psi = \frac{\Gamma(2D-3) \sin(2D-3)\pi/2}{2-D}, \quad (2.2)$$

În care $\Gamma(\cdot)$ reprezintă funcția Gamma.

Graficul lui $S(\tau)$ în raport cu τ în Ecuația (1) apare ca o linie dreaptă atunci când este trasat folosind coordonatele dublu logaritmice de forma:

$$\log(S(\tau)) = (4 - 2D) \log \tau + \log C_t, \quad (2.3)$$

Dacă semnalul original $y_r(x)$ este împărțit în Nr intervale, $\Delta x = x_q/Nr$, unde x_q este lungimea secțiunii măsurate, funcția de structură în formă discretă, $SF(k)$, a unui semnal $y_r(x_i)$ este:

$$SF(k) = \frac{1}{Nr-k} \sum_{i=1}^{Nr-k} (y_{r_{i+k}} - y_{r_i})^2, \quad (2.4)$$

în care, $SF(k)$ reprezintă SF sub forma discretă și k variază în intervalul 1 până la Nr .

Odata ce D and G_f sunt cunoscute, rugozitatea poate fi estimată utilizând parametrii fractali prin funcția continuă WM de următoarea forma $yrW(x)$ (Majumdar A. and Bhushan B., 1990, Mandelbrot B. B., 2021, Zhang X., Xu Y. and Jackson R. L., 2017, Majumdar A., Tien C. L., 1991, Singh A. N., 1953, Green I., 2020):

$$yrW(x) = G_f^{D-1} \sum_{n=nl}^{nh} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}}, \quad 1 < \gamma < 2 \quad (2.5)$$

unde, $yrW(x)$ reprezintă înălțimea profilului fractal generat, iar G_f este constanta de scalare a lungimii caracteristice (Zhou A. G. Y. et al., 1993); aceasta stabilește poziția spectrului pe axa puterii și rămâne neschimbată în raport cu toate frecvențele rugozității; D reprezintă dimensiunea fractală a profilului și poate fi o valoare neîntreagă între 1 și 2 pentru 2D și între 2 și 3 pentru 3D; γ este un parametru care determină densitatea de frecvență în analiza rugozității; n este numărul întreg de elemente colectate de seria în timpul procesului de măsurare a rugozității și indică numărul total de puncte de date luate în considerare în analiză; nh corespunde frecvenței de tăiere superioară a profilului, în funcție de rezoluția instrumentului folosit pentru captarea datelor de rugozitate, iar nl corespunde frecvenței de tăiere inferioară a profilului. Prin stabilirea unor valori adecvate pentru γ , n , nh și nl , putem controla gama de frecvențe a datelor de rugozitate folosite în analiză.

2.3. Metodologie

Acest studiu a avut ca scop stabilirea unei corelații și a unei analize comparative între parametrii de rugozitate a șinei obținuți prin măsurători experimentale efectuate la Centrul de Testare Feroviară Făurei din România și cei derivați din profiluri de rugozitate simulate generate folosind metoda fractală care implică funcția WM. Această comparație ajută la validarea eficacității metodei fractale în captarea caracteristicilor esențiale ale rugozității și oferă informații valoroase legate de generarea zgomotului și întreținerea căii ferate. De asemenea, predicția rugozității șinei a fost realizată folosind modelul fractal cu funcția Weierstrass.

Metoda de măsurare directă a rugozității acustice a șinei implică plasarea traductorului pe suprafața șinei, ceea ce permite o măsurare izolată a rugozității șinei fără a fi influențată de rugozitatea suprafeței roții sau alte potențiale interacțiuni ale contactului roată-șină. Rugozitatea acustică a șinei a fost comparată cu rugozitatea acustică a șinei calculată folosind metoda fractală care implică funcția WM.

2.3.1. Masuratori experimentale

Testele experimentale au fost realizate în cadrul Centrului de Testare Feroviară Făurei, care aparține Autorității Feroviare Române. Pentru a determina rugozitatea șinei pe Inelul Mare, a fost ales un segment de tip linie dreaptă UIC 60, pe pat de balast și traverse de beton, fără îmbinări sau defecte vizibile, situat la kilometrul 6 + 900 km (Fig. 2.1-2.2).

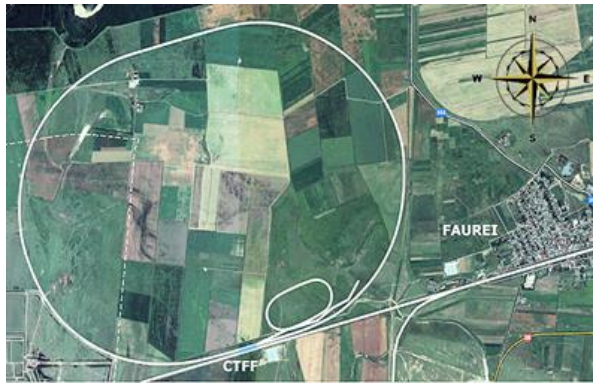


Fig. 2.1. Railway Testing Centre
Graphic presentation.

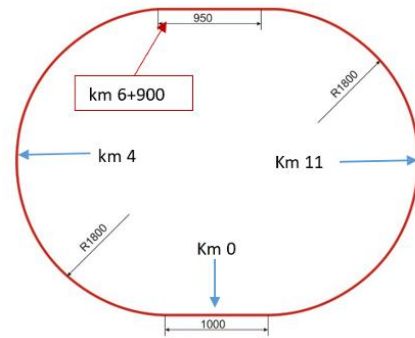


Fig. 2.2. Testing area.

Testele au fost efectuate conform liniilor directe stabilite în EN 15610:2019 (Capitolul 5), folosind abordarea directă pentru măsurarea rugozității suprafeței șinei. A fost luată în considerare o lungime totală de testare a suprafeței de 30 m, cuprinzând patru secțiuni de testare de câte 7.5 m fiecare. Aceste patru secțiuni de testare cu rugozitatea măsurată pe linia mediană a suprafeței au fost analizate. Măsurătorile rugozității șinei au fost efectuate folosind un sistem de măsurare de înaltă precizie - echipamentul m|rail trolley, care utilizează un senzor de accelerație interdependent ce este deplasat manual de-a lungul șinei (trolley) și înregistrează continuu rugozitatea șinei cu o rezoluție verticală de 1 mm.

2.3.2. Prelucrarea datelor rugozitatii

Pentru a analiza condiția de rugozitate a șinei, a fost selectată și analizată secvența experimentală a profilului de rugozitate al vectorului liniei centrale $y_r(x_i)$ pentru firul central al inelului exterior de lungime de 7.5 metri, cu o discretizare a profilului de 1 mm. Tehnicile de îndepărtare a vârfurilor și procesarea curburii au fost efectuate pentru datele de rugozitate, conform EN 15610:2019, capitolul 5. Pentru a elimina efectele granulelor de praf sau murdărie de pe capul șinei, a fost inclus un algoritm care îndepărtează „vârfurile și vaile” (mult reduse față de zona de contact roată-șină). Un al doilea algoritm, cunoscut sub numele de „procesare a curburii”, este dezvoltat pentru a gestiona caracteristicile similare pe care vârful mic al sondei le-ar detecta, dar care nu ar afecta o roată cu un diametru mult mai mare.

2.3.3. Calcule

Diferiți parametri de rugozitate a suprafeței sunt comparați pentru a verifica dacă abordarea fractală este potrivită pentru modelarea rugozității. Astfel, 41 de parametri definiți ca parametri de amplitudine, spațiali și hibridi calculați în 2D (Majumdar A., Bhushan B., 1991) și rugozitatea acustică a șinei au fost analizați. Pentru a compara rugozitatea determinată experimental cu rugozitatea simulată obținută prin metoda *WM*, au fost comparați parametrii de rugozitate pentru fiecare din cele patru secțiuni de testare măsurate.

2.4. Rezultate si discutii

Metoda de analiză SF a fost folosită pentru a examina natura fractală a rugozității șinei de la CTF Făurei România și pentru a determina parametrii fractali pentru fiecare segment supus analizei de rugozitate, urmând ecuațiile 2.1-2.4. Această analiză a confirmat natura fractală a rugozității șinei, deoarece fiecare segment a aderat la criteriul legii exponențiale, indicat de comportamentul său liniar pe o scară logaritmică dublă în graficul funcției de structură (Fig. 2.3.a). Urmând metoda fractală, care a folosit funcția WM și a implicat dimensiunea fractală D , constanta de scalare a lungimii caracteristice G_f și alți parametri relevanți, au fost create profile de rugozitate sintetice pentru a imita natura fractală a rugozității reale a șinei. Rugozitatea fractală simulată prin modelarea WM și rugozitatea măsurată pentru prima secțiune de lungime de 7.5 m sunt prezentate în Fig. 2.3.b, și se poate observa că rugozitatea simulată urmează aceeași tendință ca rugozitatea măsurată.

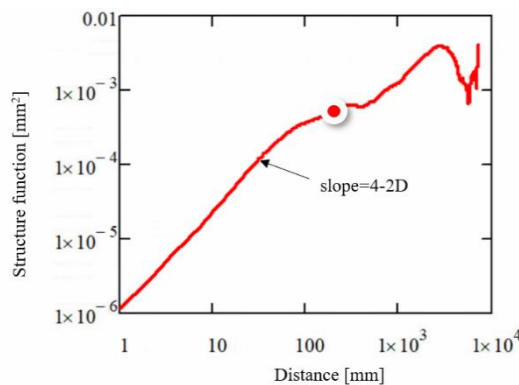


Fig. 2.3.a. Structure-function log-log of the rail roughness measurement data (7.5 m).

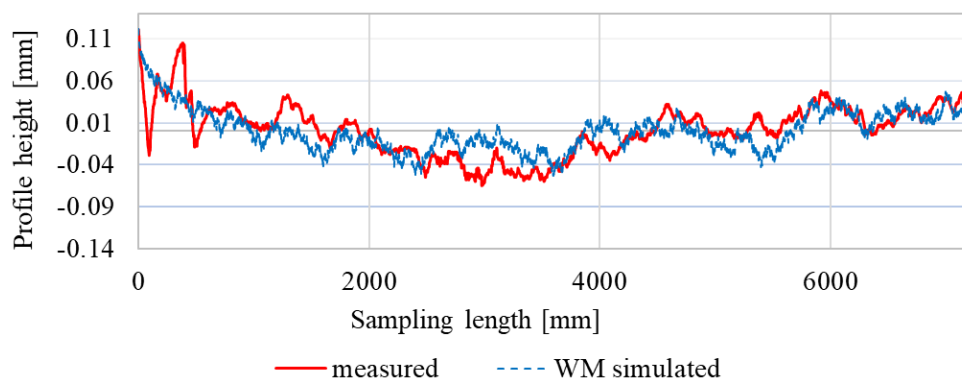


Fig. 2.3.b. Comparison between experimental (solid line) and simulated (dotted line) rail roughness (7.5m).

După cum era de așteptat, se poate observa că, cu cât datele experimentale colectate sunt mai mici, cu atât precizia este mai scăzută, dar rezultatele sunt destul de bune chiar și pentru o lungime experiențială scurtă. Rezultatele pentru lungimea de 7,5 metri sunt constant sub eroarea relativă de 10% și au întotdeauna aceeași ordine de mărime a valorii rezultatului referitor la fiecare parametru analizat. PSD este un parametru esențial pentru identificarea lungimilor de undă spațiale dominante prezente în profilul unei suprafețe și pentru înțelegerea comportamentului rugozității la diferite scări

de lungime. De asemenea, joacă un rol vital în evaluarea surselor de zgomot legate de rugozitatea suprafețelor. În analiza rugozității șinelor, PSD măsoară modul în care diferite componente de lungime de undă contribuie la rugozitatea generală. Lungimile de undă scurte pot fi asociate cu zgomotul de rulare, variațiile în uzura suprafețelor șinelor sau urmele procesării materialelor. În contrast, lungimile de undă mai lungi sunt asociate cu zgomotul aerian sau cu vibrațiile în aplicațiile de prelucrare de precizie sau tribologie. Fig. 2.4.a compară PSD-ul măsurat și PSD-ul generat cu funcția Weierstrass Mandelbrot și oferă informații despre cât de bine se potrivește modelul Weierstrass Mandelbrot cu datele reale de rugozitate pentru o lungime de 7,5 m. În acest context, PSD-ul simulat este comparabil ca tendință cu PSD-ul măsurat. În plus, cu reducerea lungimii de rugozitate până la 2,5 m, rezultatele au omis o gamă largă de lungimi de undă, dar coerența dintre cele două funcții PSD rămâne constantă pe parcursul lungimii de 7,5 metri, o aliniere care persistă și pe măsură ce distanța scade, așa cum se poate vedea în Fig. 2.4.b.

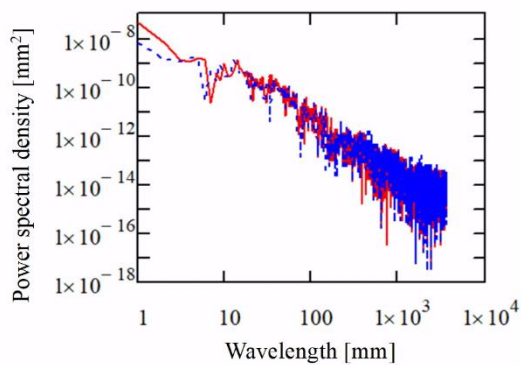


Fig. 2.4.a. Comparison between experimental (solid line) and simulated (dotted line) PSD function for roughness length 7.5 m.

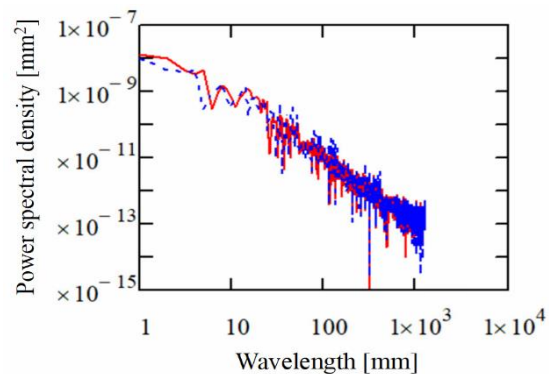


Fig. 2.4.b. Comparison between experimental (solid line) and simulated (dotted line) PSD function for roughness length 2.5 m.

Un parametru esențial în sistemul feroviar examinat este rugozitatea acustică, care înregistrează fluctuațiile de înălțime ale suprafeței de rulare, corelând cu generarea zgomotului de rulare, iar aceste variații sunt exprimate ca o funcție a distanței „x” de-a lungul suprafeței de rulare. În conformitate cu liniile directoare ale EN 15610:2019, pentru a compara atât rugozitatea măsurată cât și pe cea simulată, abordarea de măsurare directă a fost folosită pentru a caracteriza rugozitatea suprafeței șinelor, în mod special corelația acesteia cu zgomotul de rulare denumită „rugozitate acustică”. Această caracterizare este reprezentată sub forma unui spectru în bandă de o treime de octavă.

Fig. 2.5 arată că atât rugozitatea acustică a șinelor măsurată, cât și cea simulată pe o lungime de 7,5 metri se aliniază îndeaproape, cu o eroare relativă de 7,31%. Această aliniere persistă chiar și atunci când lungimea măsurată este redusă la 2,5 metri, cu erori relative de 5,76% pentru 5 metri și 3,64% pentru 2,5 metri. În plus, abaterile de la standardele TSI pentru rugozitatea măsurată și simulată la 7,5 metri sunt de 2,97 dB și, respectiv, 3,04 dB, indicând faptul că lungimile de măsurare mai scurte

nu compromit precizia datelor de rugozitate sau gama de lungimi de undă necesară conform EN 15610: 2019 (2,8-250 mm).

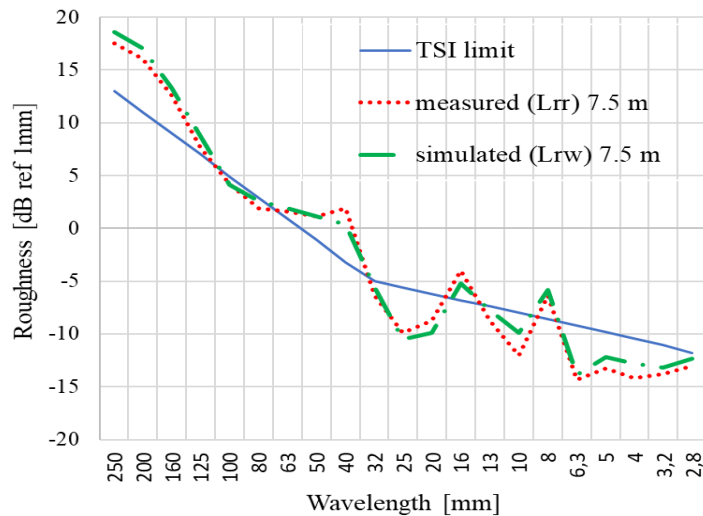


Fig. 2.5. Comparison between experimental (solid line) and simulated (dotted line) rail acoustic roughness determined for 7.5 rail roughness length.

Prin urmare, figurile 2.4-2.5 ilustrează o aliniere remarcabilă între graficele care prezintă rugozitatea simulată și cea măsurată, subliniind robustețea modelului WM în capturarea caracteristicilor nuanțate ale rugozității suprafeței.

Parametrii de spațiere cantifică caracteristicile orizontale ale neregularităților suprafeței și joacă un rol crucial în analiza rugozității, texturii suprafeței sau într-o serie de procese de fabricație, cum ar fi formarea metalelor, unde sunt esențiali pentru menținerea uniformității lubrifierii și performanței în timpul formării materialului. Deși acești parametri sunt semnificativi în anumite aplicații industriale, importanța lor este mai puțin pronunțată în domeniul feroviar. Cu toate acestea, aceștia își asumă un rol important în domeniul tribologiei, unde evaluarea lor este esențială pentru optimizarea eficienței lubrifierii și a interacțiunilor suprafeței. Numărul mare de puncte (HSC) este calculat prin numărarea numărului de regiuni înalte dintr-un profil care depășește fie linia mediană, fie nivelul deasupra liniei mediane. Contorul de puncte înalte (HSC) prezintă similitudini cu Contorul de vârfuri (Pc), dar diferența principală între acești doi parametri este în definiția vârfului. Pentru ca un vârf să fie numărat în analiza Contorului de vârfuri, acesta trebuie să fie succedat de o vale care se întinde pe întreaga lățime de bandă (pragul superior și inferior). Pentru Contorul de vârfuri, un prag deasupra și dedesubtul liniei mediane este setat la aceeași distanță de linia mediană, și doar vârfurile deasupra acestui prag sunt luate în considerare. Pragurile au fost setate la $\pm 0,05$ mm. Pragurile sunt menite să limiteze numărul de vârfuri la „vârfuri substanțiale” pentru a produce parametri mai stabili. Parametri precum Contorul de vârfuri și Contorul de varfuri înalte își găsesc

aplicarea principală în tribologie, unde joacă un rol crucial în procesele de fabricație și controlul calității pentru acoperiri.

Pe baza constatărilor discutate anterior, devine evident că, atunci când se consideră o lungime de 7,5 metri, parametrii de spațiere extrași din profilele de rugozitate simulate demonstrează o apropiere remarcabilă față de profilele de rugozitate experimentale. Această proximitate este exemplificată de o eroare relativă care rămâne semnificativ sub pragul de 10%.

După cum era de așteptat, pe măsură ce distanța de măsurare este redusă progresiv, se observă o reducere discernabilă în numărul acestor parametri de spațiere.

Cu toate acestea, este de remarcat faptul că anumiți parametri, în special Contorul de varfuri înalte (HSC) și Contorul de vârfuri, prezintă erori relativ mai mari atunci când sunt evaluați la lungimi mai scurte.

Acești parametri sunt deosebit de potriviți pentru examinarea finisajelor mici ale materialului metalic și a imperfecțiunilor. Cu toate acestea, în contextul operațiunilor feroviare și al domeniului mai larg al tribologiei, accentul este adesea pus pe atributele de rugozitate la scară mai largă, și, prin urmare, acești parametri specifici ar putea avea o relevanță mai mică.

Parametrii hibridi combină parametrii de amplitudine și spațiere și reprezintă ultimul set de parametri analizați.

Atunci când se consideră o lungime de 7,5 metri, devine evident că parametrii hibridi extrași din profilele de rugozitate simulate, în comparație cu profilele de rugozitate experimentale, prezintă în mod constant o convergență sub un interval de eroare relativă de 10%. Cu toate acestea, pe măsură ce distanța de măsurare este redusă progresiv, se constată o ușoară scădere în numărul acestor parametri hibridi.

Tendința anticipată de scădere a numărului de parametri cu reducerea distanței de măsurare este un rezultat natural, deoarece se colectează mai puține puncte de date pentru comparație cu rezultatele experimentale. Cu toate acestea, această mică reducere, rezultatele simulate susțin în mod constant un nivel de acuratețe și aliniere, în special având în vedere extinderea relativ limitată a lungimii sale. Robustețea rezultatelor în intervalul de 7,5 metri păstrează o magnitudine comparabilă a valorilor pe întregul spectru de parametri analizați și subliniază fiabilitatea metodei și capacitatea sa de a oferi informații valoroase despre caracteristicile rugozității aflate sub investigație. Pentru toți parametrii analizați, pe măsură ce lungimea de măsurare scade, rezoluția instrumentului de măsurare ar putea deveni mai critică. Lungimile de măsurare ale datelor experimentale pot duce la provocări în captarea detaliilor fine și a variațiilor în profilul de rugozitate, ceea ce poate duce la obținerea unui număr mai mic de parametri din rugozitatea simulată în intervalul de eroare relativă de 10%. Independența de scară a metodei fractale poate fi menținută într-un anumit interval, dar reduceri extreme ale lungimii pot afecta acuratețea măsurătorilor. Deși metoda fractală oferă un mod valoros

Chapter 2: Fractal - based modelling of rail roughness

de a modela anumite proprietăți statistice ale rugozității, ea nu poate captura complet toate detaliile intricate și variațiile prezente pe suprafață la scale extrem de mici atunci când se raportează rezultatele la o scară de lungime superioară. Acest lucru ar putea duce la identificarea unui număr mai mic de parametri de rugozitate acceptați. În continuare, a fost efectuată o analiză amănunțită prin juxtapunerea tuturor parametrilor de rugozitate extrași din secțiunea experimentală inițială de 7,5 metri cu profilele de rugozitate simulate cuprinzând o gamă de 2,5 până la 7,5 metri. Intervalele de simulare au fost stabilite sistematic la incrementări de 500 mm, cuprinzând astfel diverse scale de lungime. În plus, această investigație cuprinzătoare s-a extins la o comparație care a implicat rugozitatea simulată la o lungime minimă măsurată de 1 metru, o cerință specificată de standardul EN 15610. În fiecare caz de rugozități simulate, au fost determinați parametrii fractali D și G_f . Toți parametrii calculați pentru profilele de rugozitate măsurate, precum și cei obținuți din rugozitatea simulată care se încadrează într-o marjă de eroare de 10%, sunt prezentate în detaliu în Tabelul 2.1. Această examinare amănunțită subliniază eficacitatea metodei în captarea și reproducerea caracteristicilor rugozității, menținând un grad ridicat de fidelitate față de datele experimentale.

Table 2.1. Centralizer on the statistical parameters of experimental and simulated roughness that falls within the relative error of 10% (7.5m).

Distance measured	7.5 m	7 m	6.5 m	6 m	5.5 m	5 m	4.5	4	3.5	3	2.5	1
No. Amplitude param.	16/16	16/16	15/16	14/16	13/16	13/16	13/16	13/16	12/16	12/16	12/16	11/16
No. Spacing param.	8/8	7/8	6/8	6/8	6/8	6/8	5/8	5/8	5/8	5/8	5/8	2/8
No. Hybrid param.	12/12	11/12	10/12	10/12	10/12	10/12	8/12	7/12	7/12	7/12	7/12	5/12
Total no. parameter	36/36	34/36	31/36	30/36	29/36	29/36	26/36	25/36	24/36	24/36	24/36	18/36

Analiza datelor din Tabelul 2.1 arată că parametrii de rugozitate simulată sunt în cadrul unei erori de 10% pentru lungimi de până la 7,5 m, extinzându-se până la 5 m. Totuși, se observă o reducere a numărului de parametri corespunzători pe măsură ce lungimea măsurată scade la 2,5 m și 1 m, sugerând că 2,5 m este lungimea minimă optimă pentru o analiză precisă a rugozității folosind metoda fractală. Chiar dacă unii parametri se abat dincolo de pragul de eroare de 10%, în special cei legați de caracteristicile spațiale, aceștia au o relevanță mai redusă în analiza feroviară. În ciuda unei ușoare scăderi a preciziei măsurătorilor pentru lungimi mai scurte de 7,5 metri, această lungime este adecvată pentru a captura caracteristicile esențiale de rugozitate conform standardului EN 15610.

În ceea ce privește analiza parametrilor fractali D și G_f , aceștia sunt esențiali pentru caracterizarea rugozității șinei și au valori unice pentru un anumit stadiu al suprafeței. Figurile 2.6 și

Chapter 2: Fractal - based modelling of rail roughness

2.7 prezintă variația parametrilor fractali D și G_f în fiecare subsecțiune de testare cuprinzând 2,5 - 7,5 m din secțiunea de testare nr. 1. Figura 2.6 ilustrează natura relativ constantă a parametrului fractal D , în timp ce Figura 2.7 arată tendința descrescătoare a parametrului G_f ($R^2 = 0,9986$) cu creșterea lungimii măsurate. Acest lucru sugerează că parametrul fractal D rămâne neafectat de lungimea de eșantionare și rezoluția instrumentului, în timp ce parametrul G_f arată dependență de lungimea de eșantionare, așa cum sugerează literatura existentă (Zhang X., Xu Y. și Jackson R. L., 2017, Berry M. V. și Lewis Z. V., 1980). Concordanța dintre rugozitatea simulată generată din măsurătorile șinei în cadrul TCF România validează în continuare aceste dependențe.

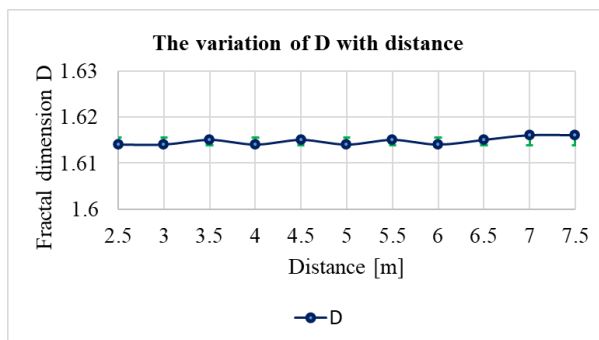


Fig. 2.6. Analysis of fractal dimension parameter D variation.

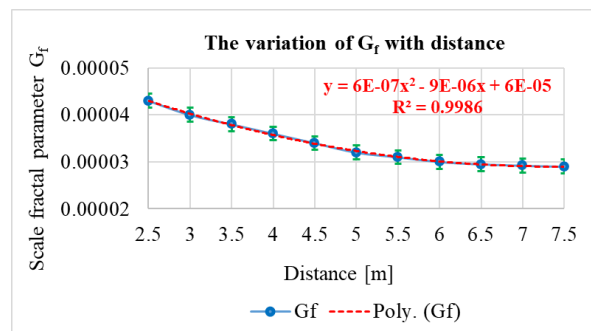


Fig. 2.7. Analysis of scaling parameter G_f variation

În rezumat, întreaga lungime de 950 m din cadrul Centrului de Testare Făurei, România, de la km 6 + 900 la km 7 + 850, prezintă o valoare medie a parametrului fractal D de 1.615 ± 0.00045 (interval de încredere 95%) cu un coeficient de variație (CV) de 0.044% și parametrul G_f deține o valoare de $3.379 \times 10^{-5} \pm 2.367 \times 10^{-6}$ (interval de încredere 95%) cu un coeficient de variație CV = 8.754%.

Capitolul 3

Modelul fractal al comportamentului frecării statice în contactul Hertzian cu rugozități

3.1. Introducere

Mecanica contactului, fundamentală în tribologie, explorează analiza tensiunilor și deformațiilor în zona de contact dintre corpuri. Începând cu lucrarea de pionierat a lui Hertz din 1882, care a evidențiat interacțiunile de tensiuni între solide elastice, au fost dezvoltate metodologii avansate pentru a determina zona reală de contact pe suprafețe aspre și pentru a explora fenomene tribologice specifice, cum ar fi uzura, frecarea și contactul dinamic. Această cercetare își propune să exploreze coeficientul static de frecare în contextul contactului Hertzian între roată și șină, folosind o metodologie bazată pe abordări fractale. Analiza este ancorată în modelul WM, care prezintă tranziția prin patru stări de deformare: elastică, primele două elastoplastice și cea complet plastică. Sub această lumină, coeficientul de frecare static este considerat a reflecta o proprietate intrinsecă a materialului mai moale în contact, cu microgeometria suprafeței influențată de parametrii fractali D și G_f . Conectând aceste concepte, trebuie remarcat faptul că, deși în mod tradițional suprafața de contact Hertzian este presupusă a fi omogenă, lucrarea de față îmbogățește perspectiva prin luarea în considerare a proprietăților fractale pentru calculul ariei de contact reale.

3.2. Modelul teoretic fractal al frecării statice

Caracterizarea fractală a rugozității echivalente a roții și șinei, bazată pe funcția Weierstrass Mandelbrot (W.M.) (ec.2.5 cap. 2), oferă o descriere mai precisă a modului în care rugozitatea suprafeței interacționează la diferite scări în timpul contactului.

3.2.1. Analiza contactului cu o singură asperitate

Modelul mecanic al unei singure asperități este reprezentat prin unde cosinus, oferind o înțelegere a rugozității suprafeței și a mecanicii contactului la nivel microscopic. Bazat pe funcția W.M., cu o lungime de undă de $l=1/\gamma^n$, (l denotă o lungime de undă generală sau o scară caracteristică aplicabilă într-un context larg, γ este un parametru care definește densitatea frecvenței în analiza rugozității, iar n este numărul întreg de elemente colectate de serie în timpul procesului de măsurare a rugozității), și indică numărul total de puncte de date luate în considerare în analiză); forma deformării individuale a asperității este descrisă astfel: (Y. Yuan, 2016):

$$y(x) = G_f^{(D-1)} l^{2-D} \cos \frac{\pi x}{l}, \quad -\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2} \quad (3.1)$$

unde $y(x)$ reprezintă înălțimea rugozității profilului, D parametru fractal, ($1 < D < 2$), și G_f caracteristica lungimii de scalare

Deformația (δ) și amplitudinea (a_m) pot fi exprimate sub următoarea formă (Y. Yuan, 2016):

$$\delta = G_f^{(D-1)} l^{2-D} \left(1 - \cos \frac{\pi r^2}{2l} \right), \quad a_m = G_f^{(D-1)} l^{2-D}. \quad (3.3)$$

Deformația individuală a unei asperități în contact cu suprafața șinei poate fi elastică, elastoplastică sau plastică.

3.2.1.1. Regimul de deformare elastică

Pentru regimul elastic în contextul contactului hertzian dintre roată și șină, accentul se pune pe deformarea reversibilă a asperităților sub sarcină. În acest regim, materialele revin la forma lor originală odată ce încărcătura este îndepărtată. Elasticitatea materialelor este fundamentală pentru absorbția și distribuția tensiunilor fără a provoca schimbări permanente.

Bazată pe teoria lui Hertz (Johnson K. L., 1987), deformația critică (δ_c) cauzată de o asperitate individuală, atunci când este în contact cu o șină de suprafață plană, rigidă și netedă este:

$$\delta_c = G_f \left(\frac{2E}{k \cdot H_d} \right)^{\frac{2-D}{D-1}}, \quad (3.4)$$

unde, H_d este duritatea materialului mai moale, k reprezintă coeficientul aferent raportului Poisson al roții (Chang, W. R., Etsion, I., and Bogy, D. B., 1988) cu $k=0.454+0.41\nu$, și E modulul de elasticitate Hertzian echivalent. Când deformația δ este egală cu deformația critică δ_c , asperitatea individuală suferă deformații elastice. Ulterior, sarcina de contact fără dimensiuni în stare elastică (P_{se}) poate fi exprimată prin fractali, în funcție de rugozitatea corespunzătoare contactului ariei adimensionale, a_s după cum urmează:

$$P_{se}(a_s) = \frac{4\sqrt{\pi} G_{fs}^{D-1}}{3} a_s^{(3-D)/2}, \quad P_{se} = \frac{P_e}{A_d E}, \quad (3.10)$$

în care, P_{se} adimensională indică sarcinile de contact ale unei asperități în regimul elastic.

3.2.1.2. Regimul de deformare elastoplastică

În contextul contactului Hertzian dintre roată și șină, regimul elastoplastic este semnificativ, deoarece determină modul în care forțele sunt transmise și distribuite în asperitățile de contact. Sarcinile de contact fără dimensiuni din primul și al doilea regim elastoplastic (P_{sep1} , P_{sep2}) pot fi exprimate prin fractali, în funcție de rugozitatea corespunzătoare ariei adimensionale de contact, a_s după cum urmează:

$$P_{sep1}(a_s) = \frac{2a_2}{3a_1} k k_{HE} G_{fs}^{2(D-1)(b_2-b_1)} \left(\frac{2}{k k_{HE}} \right)^{2(b_2-b_1)} a_s^{(1-D)(b_2-b_1)+1}, P_{sep1} = \frac{P_{ep1}}{A_a E}, \quad (3.13)$$

$$P_{sep2}(a_s) = \frac{2a_{2p}}{3a_{1p}} k k_{HE} G_{fs}^{2(D-1)(b_{2p}-b_{1p})} \left(\frac{2}{k k_{HE}} \right)^{2(b_{2p}-b_{1p})} a_s^{(1-D)(b_{2p}-b_{1p})+1}, P_{sep2} = \frac{P_{ep2}}{A_a E},$$

unde P_{sep1} and P_{sep2} , denotă sarcinile de contact ale unei asperităţi deformate în primul și al doilea regim elastoplastic, si $a_1, b_1, a_2, b_2, a_{1p}, b_{1p}, a_{2p}$ and b_{2p} sunt constante (Kogut L. and Etsion I. 2002)

3.2.1.3. Regimul de deformatie plastica

În regimul plastic, accentul este pus pe deformarea ireversibilă a asperităților atunci când sarcina aplicată depășește punctul de curgere al materialului. În această stare, asperitățile sunt modificate permanent și nu se întorc la forma lor inițială după încărcare, afectând suprafețele de contact.

Regimul complet plastic al unei asperităţi deformate cade în intervalul $\delta_s \geq \delta_{cs}$. Sarcina de contact dimensională în regimul plastic ($P_{sp}(a_s)$) ar putea fi scrisă astfel:

$$P_{sp}(a_s) = k_{HE} a_s, P_{sp} = \frac{P_p}{A_a E}, \quad (3.14)$$

unde P_{sp} , sarcina de contact adimensională, denotă sarcinile de contact ale unei asperităţi distorsionate în regimul plastic. În final, sarcina totală de contact fără dimensiuni (P_{st}) este dată de:

$$P_{st}(D, G_{fs}, a_s) = P_{se}(D, G_{fs}, a_s) + P_{sep1}(D, G_{fs}, a_s) + P_{sep2}(D, G_{fs}, a_s) + P_{sp}(D, G_{fs}, a_s) \quad (3.15)$$

unde $\delta_s \geq \delta_{cs}$, rezulta ca $a_s > a_{cs}$.

În mod corespunzător, în contextul actualului model, sarcina normală totală indicată ca F_n apare, de asemenea, ca acumulare a sarcinilor de contact legate de cele patru regimuri. Sarcina totală normală și formele sale fără dimensiuni ar putea fi elaborate după cum urmează:

$$F_n = F_e + F_{ep1} + F_{ep2} + F_p \quad (3.21)$$

Ecuatia dă sarcina totală de contact normală fără dimensiuni pentru zona reală de contact:

$$F_{nst}(a_{ls}) = F_{es}(a_{ls}) + F_{ep1s}(a_{ls}) + F_{ep2s}(a_{ls}) + F_{ps}(a_{ls}) \quad (3.24)$$

Această formulare surprinde impactul cuprinzător al diferitelor regimuri de contact asupra sarcinii normale cumulative, oferind o înțelegere rafinată a comportamentului de contact între suprafețele simulate cu rugozitate fractală.

3.2.2. Sarcina de contact tangențială și coeficientul de frecare static

În cazul analizei de fricțiune descrisă mai sus, sarcina tangențială este forța care încearcă să inițieze alunecarea sau mișcarea relativă între suprafețele de contact roată-șină. Doar asperitățile care suportă

regimurile complet elastice și primele elastoplastice (iregularități microscopice ale suprafeței) sunt capabile să susțină sarcina tangență (Kogut L. și Etsion I., 2003; Kogut L. și Etsion I., 2004; You Y., 2010, (Zhang C. și colab., 2022, You J. M., 2010; Zhao B., Xu H., & Lu X., 2019)). Acest lucru înseamnă că doar anumite porțiuni ale suprafețelor de contact, unde deformarea rămâne în anumite limite, pot rezista forței care încearcă să provoace alunecarea. Mai mult, la etapa de inițiere a alunecării, deformarea plastică finală are loc la marginea zonei de contact. Această presupunere se bazează pe distribuția tensiunilor principale în cadrul unei asperități deformate la interfață (Zhang C. și colab., 2022, You J. M., 2010; Zhao B., Xu H., & Lu X., 2019). Acest lucru indică faptul că, sub influența sarcinii tangențiale, materialul suferă o curgere plastică, pierzându-și capacitatea de a rezista la sarcini tangențiale suplimentare fără a suferi deformări semnificative.

Criteriul Tresca determină debutul deformării plastice, afirmând că cedarea începe când tensiunea maximă de forfecare a materialului atinge un anumit prag (K. L. Johnson, 1987). Utilizând acest criteriu, se poate deduce sarcina tangențială adimensională maximă, $T_{ts}(a_{ls})$, pentru suprafețele cu rugozitate fractală.

$$T_{ts}(a_{ls}) = \frac{8k_{yE}}{\pi(6-3\nu)} (A_{es}(a_{ls}) + A_{ep1s}(a_{ls})) + \frac{8(2\nu-1)}{\pi(6-3\nu)} (F_{es}(a_{ls}) + F_{ep1s}(a_{ls})),$$
$$k_{yE} = \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.25)$$

unde k_{yE} reprezintă raportul rezistenței de curgere și σ_y , modulul de elasticitate echivalent a celor două materiale

În continuare, coeficientul de frecare static $\mu_s(a_{ls})$ poate fi exprimat ca:

$$\mu_s(a_{ls}) = \frac{T_{tf}(a_{ls})}{F_{ns}(a_{ls})} \quad (3.26)$$

3.3. Masuratori experimentale

Eșantionul plat a fost realizat din oțel necălit și nealiat, tip R260 (EN 13674-1:2018), cu o duritate Brinell de 285 HBW, iar eşantionul cilindric a fost confecționat din oțel tratat la suprafață, tip ER7 (EN 13262:2021), cu o duritate Brinell de 265 HBW. Aceste materiale rezistente la uzură sunt utilizate pentru șinele și roțile din sistemele feroviare. Rugozitatea șinelor, măsurată la Centrul de Testare Făurei (vezi Capitolul 2), a fost evaluată folosind echipamentul m|rail trolley. În același mod, rugozitatea roților de la locomotiva clasa Lema 048 a fost evaluată folosind sistemul m|wheel.

3.4. Metodologie

În cadrul acestui studiu, ne-am propus să determinăm coeficientul de frecare statică utilizând o abordare fractală, care combină principiile fundamentale ale geometriei fractale cu mecanica de contact atât în sistemele Hertziane roată-șină, cât și în interacțiunile specimenului cilindru-plan ce

implică suprafețe aspre. Din această perspectivă, coeficientul de frecare statică este perceput ca o „proprietate intrinsecă” a materialului mai moale dintre cele două în contact, în cadrul unei microgeometrii de suprafață specifice, definite de parametrii fractali unici D și G_{fs} . Geometria fractală oferă o metodă eficientă pentru caracterizarea suprafețelor de contact. Această abordare este relevantă atât pentru probele de contact cilindru-plan în laborator, cât și pentru contactul roată-șină. Metoda funcției de structura (SF), conform metodologiei prezentate în Capitolul 2, a fost aplicată pentru a estima acești parametri, așa cum este detaliat în ecuațiile 2.1 până la 2.4. Ulterior, parametrii fractali echivalenți au fost calculați pentru a simplifica analiza contactului între cele două suprafețe aspre, fie că este vorba de probele cilindru-plan sau de roată-șină. SF-ul suprafeței cu rugozitate echivalentă a fost determinat folosind următoarea relație:

$$SF(\tau) = SF_r(\tau) + SF_w(\tau) \quad (3.27).$$

Apoi, funcția W.M. descrisă în ec. (2.5) din Capitolul 2 a fost utilizată, iar rugozitatea echivalentă simulată a fost derivată, obținându-se parametrii fractali. Din aceste analize, au rezultat seturi distincte de parametri fractali.

Pentru analiza parametrilor de contact Hertzian, au fost investigate trei scenarii pentru specimenul cilindru-plan cu rugozitate, fiecare asociat cu o forță normală specifică de 20 N, 40 N și 60 N. În cadrul studiului de contact Hertzian roată-șină, s-a concentrat atenția asupra unui caz specific în care o forță normală de 103.00 kN a fost aplicată roții numărul unu.

Ariile nominale (A_{a1} - A_{a4}) pentru perechile de materiale cilindru-plan, precum și perechile roată-șină, au fost determinate pe baza semi-axelor de contact Hertzian ale roții și cilindrului, forțelor externe aplicate și proprietăților materialelor specimenelor (*Esveld C, Thompson D. J., 2009; Otero Yugat J., 2009*).

Analiza a cuprins patru regimuri de deformare: elastic, primul elastoplastic, al doilea elastoplastic și complet plastic, culminând cu determinarea coeficientului de frecare static pentru aceste patru scenarii.

3.5. Rezultate si discutii

Toate regimurile de deformare au fost analizate pentru a determina coeficientul de frecare static și parametrii de contact, luând în considerare diferite valori ale parametrului de scară adimensional G_{fs} și parametrului fractal D .

3.5.1. Regimul de deformatie elastic

3.5.1.1. Aria critica

În această secțiune, prima prezentare acoperă variația ariei critice adimensionale (a_{cs}) în relație cu parametrul fractal D și deformarea critică adimensională (δ_{cs}), așa cum este ilustrat în Figurile 3.3.

(a, b). Determinarea a_{cs} se realizează în conformitate cu Ecuația 3.7, iar δ_c este calculată urmând Ecuația 3.11.

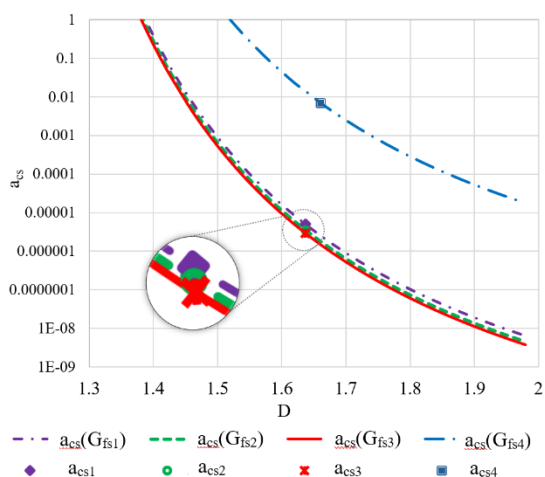


Fig. 3.3. (a) Variation critical area a_{cs} with variable G_{fs} and D fractal parameters

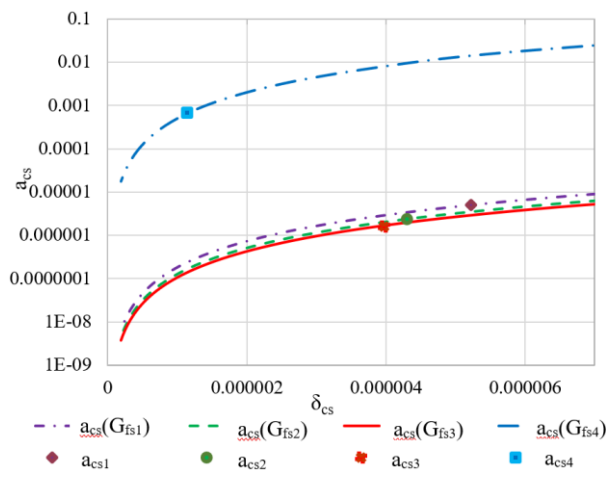


Fig. 3.3. (b) Variation critical area a_{cs} with deformation δ_{cs} with variable G_{fs} and D is constant

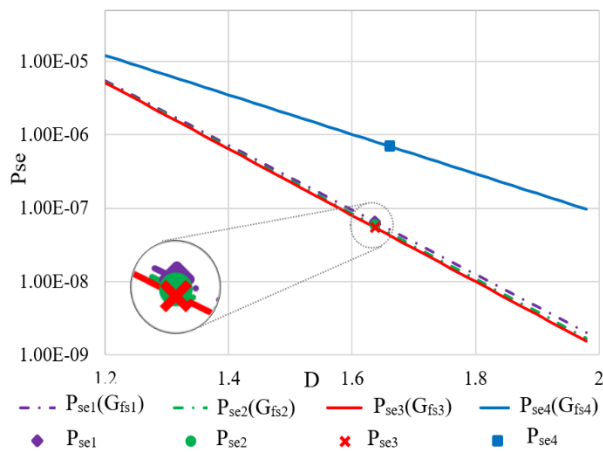


Fig. 3.4. (a) Variation contact load P_{se} with D variable.

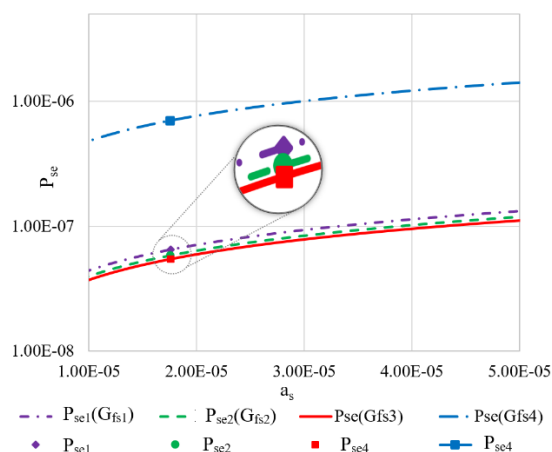


Fig. 3.4. (b) Variation contact load P_{se} with spot area a_s variable.

În Figura 3.4(a), o forță de contact elastic adimensională îmbunătățită (P_{se}) este asociată cu dimensiuni fractale mai mici (D), care denotă suprafețe mai netede, și, atunci când este asociată cu parametri de scală mai mari (G_{fs}), se observă o extindere a zonei de contact în regimul elastic, ducând la o încărcare de contact îmbunătățită. Observațiile din Figura 3.4(b) confirmă faptul că forța de contact elastic adimensională (P_{se}) crește odată cu mărirea ariei punctului de contact (a_s). Acest fenomen este de asemenea evident în contactul roată-șină. Cu toate acestea, în cazul eșantioanelor cilindru-plan, o scădere a P_{se} cu o creștere a forței normale indică o concentrare a presiunii într-o zonă de contact mai mică și o interacțiune mai intensă la nivel microscopic.

3.5.1.2. Regimul de deformare elastoplastic

Modificările ireversibile în comportamentul materialului sub încărcare pot identifica tranziția în regimul elastoplastic. În continuare, variațiile sarcinii de contact în regimul elastoplastic, denumite

Chapter 3: Fractal model of static friction behaviour in Hertzian roughness contact

P_{sep1} și P_{sep2} , sunt ilustrate în relație cu parametrul fractal D și aria spotului a_s , așa cum este prezentat în figurile ulterioare 3.7. (a, b) și Ecuația 3.13.

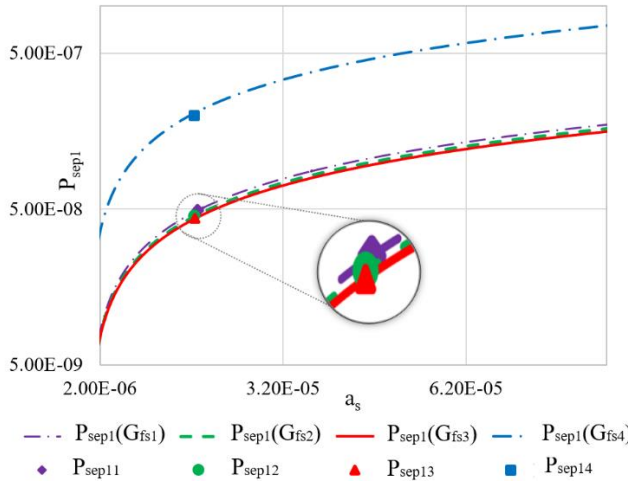


Fig. 3.7. (a) Variation contact load P_{sep1} with variable D and G_{fs} fractal parameters.

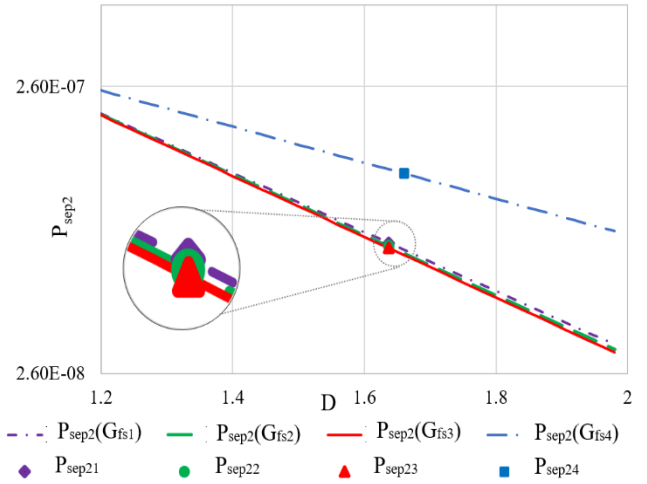


Fig. 3.7. (b) Variation contact load P_{sep2} with variable D and G_{fs} fractal parameters.

Un parametru fractal D mai mare în această gamă semnifică o topologie a suprafeței mai aspră, cu mai multe asperități. Cu toate acestea, nu toate asperitățile vor face un contact adecvat. O rugozitate mai pronunțată (D mai mare) înseamnă că asperitățile care intră în contact ar putea fi cele mai înalte sau mai proeminente, ducând la o valoare mai mică a P_{sep1} , deoarece acestea suportă cea mai mare parte a sarcinii și pot suferi deformări locale mai mari (Figura 3.7. (a)).

În ceea ce privește similitudinea dintre P_{sep1} și P_{sep2} (Figura 3.7. (b) și detaliate prin Ecuațiile 3.8 și 3.13), deși principiile de bază rămân aceleași, forțele de interacțiune și deformările sunt mai pronunțate datorită unui comportament elastoplastic mai profund. O scădere a lui D în acest regim duce la o creștere a P_{sep2} în comparație cu P_{sep1} .

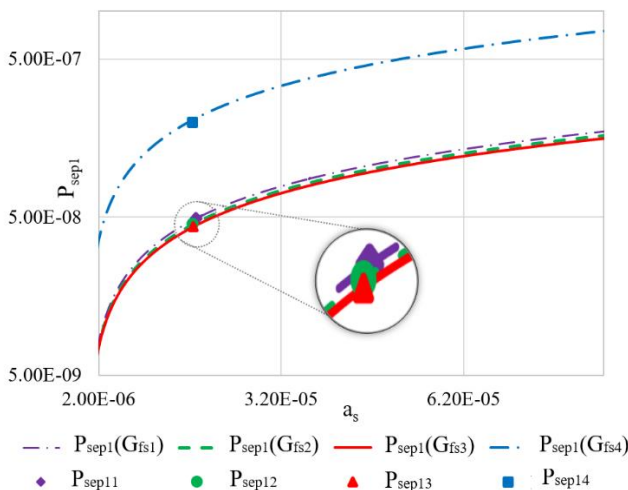


Fig. 3.8. (a) Variation contact load P_{sep1} with variable D and spot area a_s .

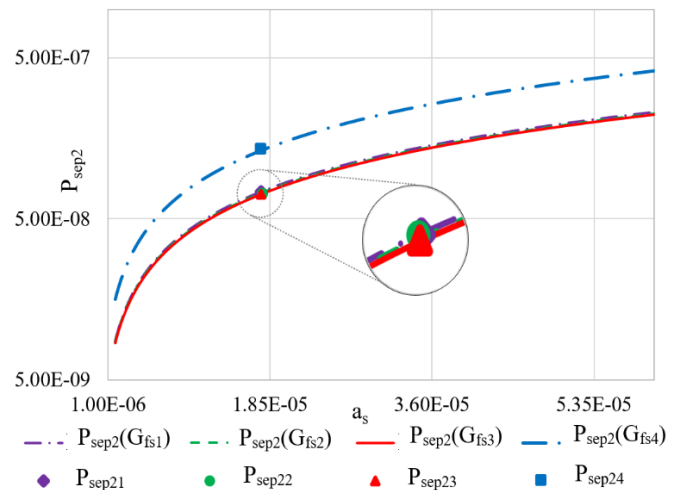


Fig. 3.8. (b) Variation contact load P_{sep2} with variable D and spot area a_s .

Figurile 3.8. (a, b) ilustrează primul și al doilea regim elastoplastic. Se observă o zonă de contact redusă pentru o valoare mai mare a parametrului fractal D , cu G_{fs} constant (a_s). Invers, această

sarcină de contact scade pe măsură ce D scade, urmând același trend ca și Figura 3.4. (b). Acest trend ilustrează influența profundă a dimensiunii fractale D asupra mecanicii de contact în aceste două regimuri elastoplastice.

3.5.1.3. Regimul de deformare plastică

Figura 3.9 evidențiază relația dintre sarcina de contact P_{sp} (Ecuația 3.14) în regimul plastic și parametrul fractal D și aria spotului a_s . În aceste figuri, se observă că întregul regim de deformare plastică rămâne neschimbat de acești parametri D și G_{fs} .

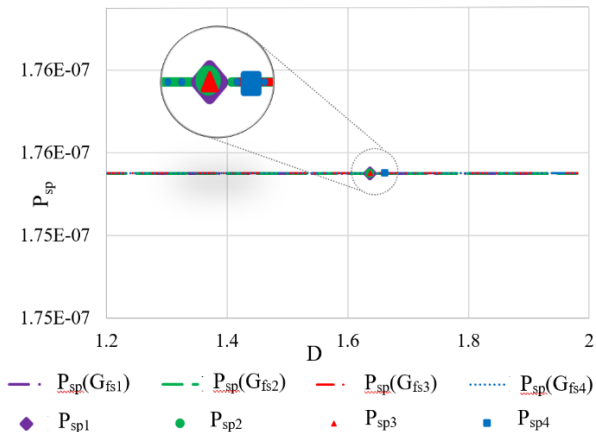


Fig. 3.9. (a) Variation contact load P_{sp} with fractal parameters D .

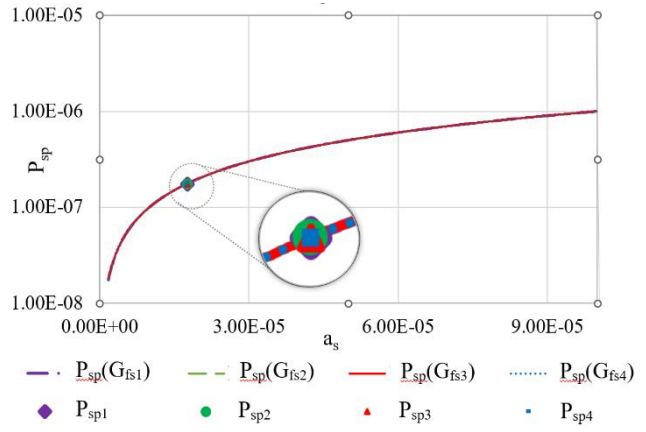


Fig. 3.9. (b) Variation contact load P_{sp} with spot area a_s .

În această etapă, asperitățile suferă deformări semnificative, iar interacțiunile ulterioare sunt mai mult legate de comportamentul plastic al materialului decât de starea sa inițială sau de proprietățile sale fractale.

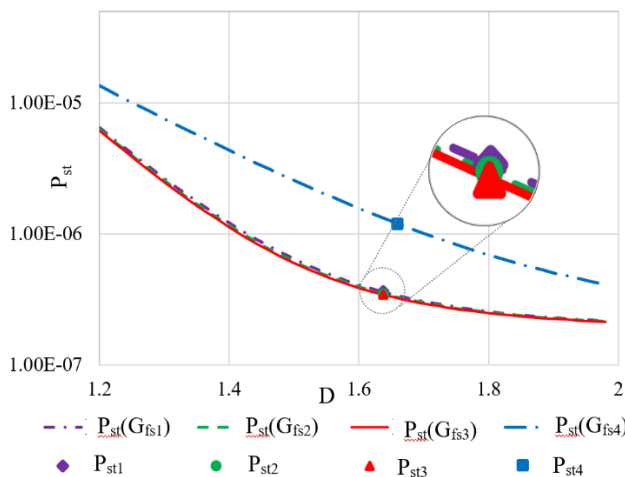


Fig. 3.10. (a) Variation contact load P_{st} with variable D and G_{fs} fractal parameters.

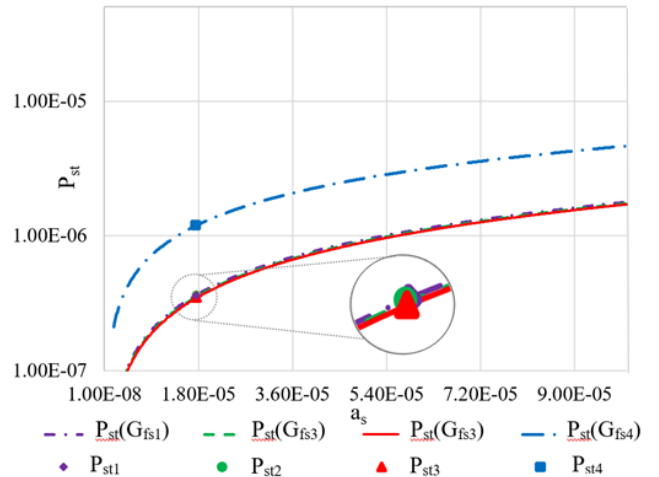


Fig. 3.10. (b) Variation contact load P_{st} with variable a_s , a_s and G_{fs} fractal parameters.

Figura 3.10. (a, b) arata sarcina totala de contact, P_{st} , (eq. 3.15) si interactiunea sa cu parametrii fractali D si G_{fs} . Reflectând tendințele observate pentru P_{se} , P_{se1} și P_{se2} , pe măsură ce variază a_s , D si G_{fs} , P_{st} demonstrează, de asemenea, un răspuns similar.

3.5.2. Sarcina normala totala

Figura 3.12 arată fluctuația sarcinii normale totale adimensionale (F_{nst}) în relație cu parametrul fractal D și cea mai mare arie a petei als, care poate varia între 0 și 1. Această corelație este cuantificată de Ecuatia 3.24, care oferă o bază matematică pentru înțelegerea tendințelor observate.

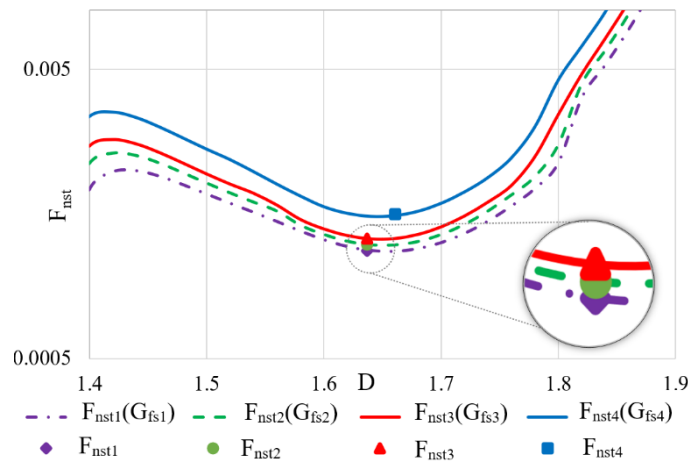


Fig. 3.12. Variation contact load F_{nst} with variable fractal parameter D and maximum spot area a_{ls} .

Figura 3.12 detaliază relația dintre sarcina normală totală, F_{nst} , și parametrii D , G_{fs} și a_{ls} . Astfel, se observă că forța totală, F_{nst} , crește odată cu extinderea ariei petei predominante. Efectul lui D asupra lui F_{nst} este evident doar în intervalul D de la 1.35 la 1.9. F_{nst} pare să fie independentă în afara acestui interval, sugerând că D nu este principalul factor care guvernează F_{nst} . Un astfel de comportament sugerează că alte mecanisme sau proprietăți la nivelul materialului sau interacțiunile la suprafață ar putea domina în aceste condiții.

3.5.3. Coeficientul de frecare static

Figures 3.13. (a, b) arata dependenta COF de F_{nst} (Eq. 3.26) si parametrul fractal D .

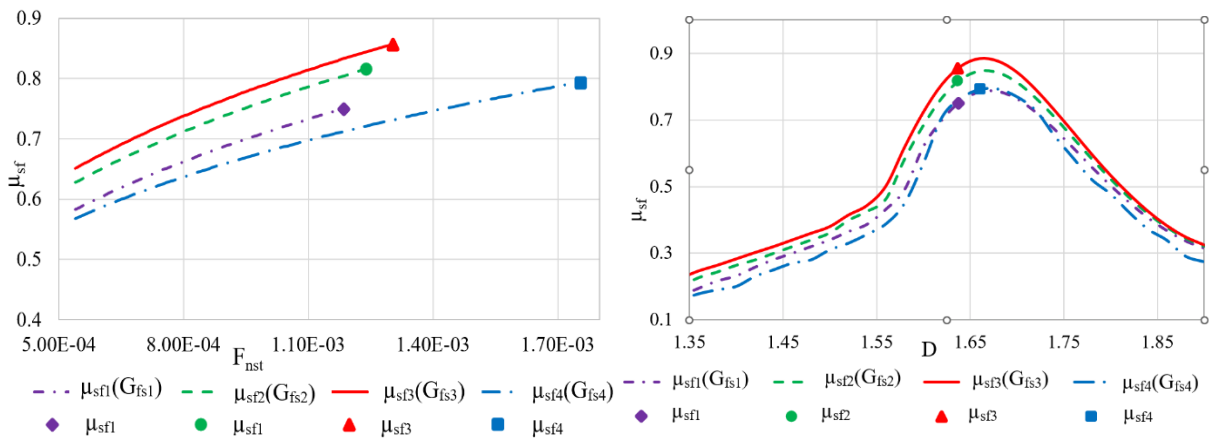


Fig 3.13. (a) Variation contact load F_{nst} with static friction coefficient (μ_{sf}).

Fig 3.13. (b) Variation static friction coefficient (μ_{sf}) with variable fractal parameter D .

În graficul 3.13. (a), pentru perechile cilindru-plan (μ_{sf1} , μ_{sf2} , and μ_{sf3}), coeficientul de frecare static (COF) crește odată cu sarcina normală totală adimensională. Acest trend se aliniază cu așteptările, deoarece o forță normală mai mare îmbunătățește interblocajul asperităților de suprafață, crescând astfel frecarea.

În schimb, pentru perechea roată-șină (μ_{sf4}), se observă un COF static mai scăzut chiar și sub sarcini normale semnificativ mai mari. Acest fenomen poate fi atribuit prezenței unui film lubrifiant sau condițiilor de lubrifiere în zona de contact roată-șină, ceea ce poate reduce frecarea. În plus, la forțe normale foarte mari, cum ar fi cele din contactul roată-șină, asperitățile pot fi aplatizate sau deformate mai extensiv, ducând potențial la o zonă de contact aparent mai mare, dar cu o interblocaj mai puțin eficient la nivel micro, rezultând un COF static mai mic. Cu toate acestea, tendința crescătoare sugerează că, chiar și în aceste condiții, pe măsură ce forța normală continuă să crească, interacțiunile dintre asperități și rezistența la alunecare încep să aibă un impact mai mare, ducând la o creștere graduală a COF-ului.

Din exemplul ilustrat în Figura 3.13. (b), se poate observa că la valori mici ale lui G_{fs} , coeficientul de frecare static (COF) atinge valori maxime și scade odată cu creșterea lui G_{fs} , subliniind influența semnificativă a factorului de scară asupra caracteristicilor fricțiunii. Pe de altă parte, COF static poate fi detectat de D doar în intervalul 1.3-1.9. În afara acestui interval, absența unui COF static discernabil ar putea fi atribuită interacțiunilor specifice de suprafață, caracteristicilor de deformare sau lipsei unui angajament suficient al rugozității pentru a produce o fricțiune măsurabilă. Coeficientul de frecare este maxim pentru D în intervalul 1.6-1.7 deoarece acest interval al dimensiunii fractale corespunde cu cel mai optim echilibru între aderența suprafețelor și capacitatea de deformare elastică a asperităților. La aceste valori, asperitățile sunt suficient de angajate pentru a crea o rezistență la alunecare, dar nu atât de deformate încât să permită o alunecare mai ușoară. În

esență, un D de aproximativ 1.6-1.7 poate reflecta o densitate și o distribuție a asperităților care maximizează interacțiunea și blocajul între suprafețele în contact, conducând astfel la un COF crescut. Pentru cuplul roată-șină, valoarea COF este cea mai mică din grafic, ceea ce poate fi explicat prin mai mulți factori specifici sistemelor feroviare. În primul rând, interfața roată-șină este adesea subiectul unor condiții de lubrifiere, fie prin lubrifierea naturală din mediu, fie prin aplicarea deliberată de lubrifianți pentru a reduce uzura și a facilita mișcarea lină.

Capitolul 4

Fenomenul de Stick-Slip si Emisia Acustica in Contactul Hertzian Liniar

4.1. Introducere

Această cercetare s-a concentrat pe utilizarea parametrilor semnalului de Emisie Acustică (AE) care necesită resurse minime de hardware și software. Acești parametri pot fi derivați dintr-un semnal capturat de un sistem versatil de achiziție de date utilizat pentru teste mecanice. Obiectivul a fost detectarea apariției fenomenului de stick-slip în condiții de frecare uscată la punctele de contact liniar Hertzian, folosind acești parametri AE cu cerințe reduse.

Studiul își lărgeste domeniul de cercetare prin includerea validării coeficientului de frecare static determinat experimental, comparându-l cu valoarea obținută din analiza fractală, ambele măsurători fiind efectuate în condiții de regim stabilizat. Acest demers urmărește să întărească înțelegerea fenomenului de frecare și să verifice acuratețea metodelor utilizate în calcularea coeficientului de frecare static. Prin legarea directă a acestor aspecte de cercetare, scopul este de a detecta fenomenul de stick-slip prin parametrii de emisie acustică și de a realiza o analiză mai profundă a relației dintre comportamentul fricțiunii și vitezele de antrenare reduse, un punct central în studiul principiilor de tribologie.

4.2. Model experimental

Experimentele prezentate în acest articol au fost efectuate folosind tribometrul CERT UMT-2, utilizat pentru testarea fenomenului de stick-slip al diferitelor materiale. Figura 4.2 ilustrează sistemul de testare cu probele superioară și inferioară conectate la tribometru. Pentru realizarea acestor teste experimentale, tribometrul a fost adaptat condițiilor specifice de alunecare pentru contactul Hertzian liniar.

Aderența la nivel molecular și deformările elasto-plastice la nivelul rugozității sunt responsabile pentru fricțiune, care la rândul său este responsabilă pentru forța tangențială (Eid H., 2011; Mulakaluri N., 2011; Persson B. N. J., 2000). Un senzor de emisie acustică CETR AE-5, cu un interval de frecvență între 0.2 MHz și 5 MHz, integrat cu tribometrul UMT-2, a fost utilizat pentru a măsura semnalele de emisie acustică în timpul testului de fricțiune. Semnalul AE și cele legate de forță și poziție au fost achiziționate de unitatea de control CETR UMT la o rată de eșantionare de 200 kHz. Semnalul AE a fost amplificat cu un câștig de 60 dB, iar valoarea sa rms a fost calculată la fiecare 0.5 secunde.

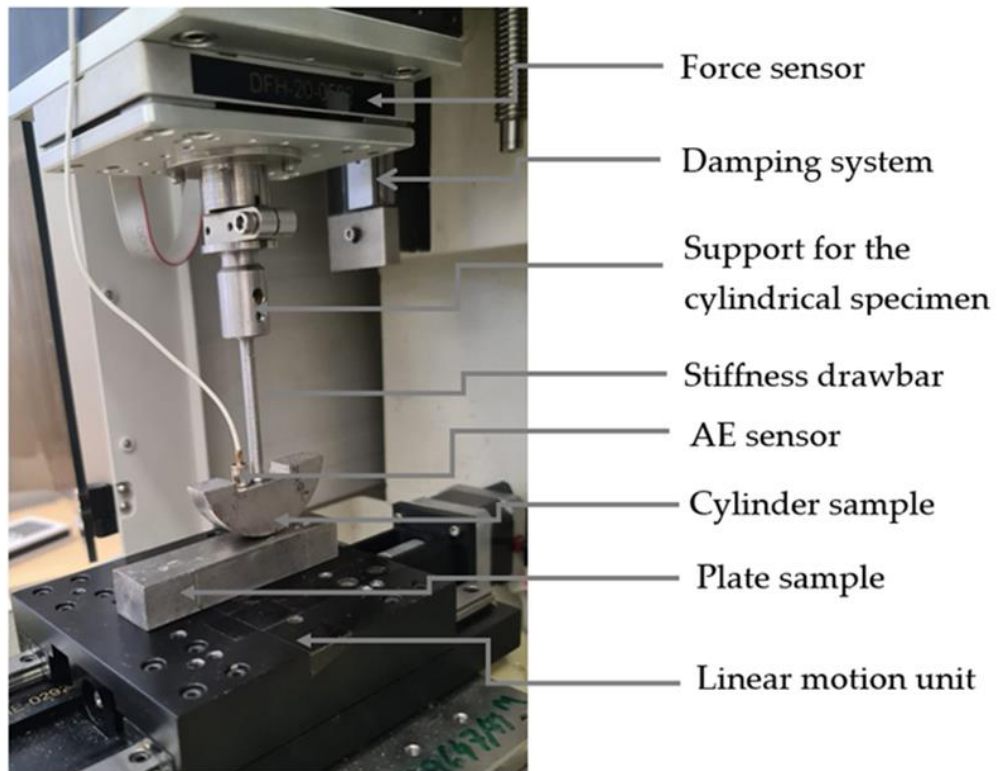


Fig. 4.2. Tribometer to study the phenomenon of stick-slip.

Scopul principal al testelor experimentale a fost de a determina evoluția coeficienților de frecare statică și cinetică ai fenomenului de stick-slip, însoțită de apariția emisiei acustice la contactul Hertzian liniar.

4.3. Metodologie

Un obiectiv al acestui studiu a fost să demonstreze că parametrii de bază ai emisiilor acustice (AE) sunt adecvați și suficienți pentru a detecta fenomenul de stick-slip (SS), iar astfel, configurația adaptată a tribometrului UMT-2 pregătit pentru acest tip de experiment a dus la o analiză simplificată, dar suficientă, a semnalelor AE, evitând necesitățile echipamentelor standard AE. Mai mult, obiectivul fundamental al testelor experimentale efectuate a fost de a analiza corelațiile dintre parametrii AE și coeficientul de frecare (COF), în funcție de vitezele de antrenare scăzute și foarte scăzute, deoarece inițierea mișcării relative între două corpuri în condiții de frecare este o problemă fundamentală și esențială în înțelegerea principiului de frecare în tribologie. Forța de frecare, forța normală și AE au fost măsurate direct prin traductoare. Indirect, au fost calculate medii pentru fiecare tip de COF (static, cinetic, amplitudine), viteza de alunecare, energia consumată prin frecare și mai mulți parametri AE (contor, amplitudine, energie).

Analiza a implicat 12 teste pentru studiul fenomenului de stick-slip, determinând coeficienții de frecare statici și cinetici și amplitudinea stick-slip pentru fiecare secvență de salt. Energia generată de emisiile acustice (WAE_{st} și WAE_{sl}) în perioada de stick-slip este definită ca integrala (aria) a

tensiunii pătrate (V_{AE}) emisă în timp. Viteza instantanee în faza de slip este definită ca derivata a distanței pe care o acoperă eșantionul cilindric în timpul fazei de slip. Abordarea analitică adoptată în acest studiu investighează oscilațiile de slip observate în fenomenul de stick-slip, considerând coeficientul de frecare cinetic ca o funcție a vitezei de antrenare și coeficientul de frecare static ca o funcție a timpului de stick. Referindu-se la cercetări esențiale precum cele realizate de (F. Heslot 1994, Baumberger T. 1996, Caroli C. și Noziers P. 1995 și Baumberger et al. 1995), studiile evidențiază o relație logaritmică clară între coeficientul de frecare static și timpul de stick. (t_{stick}).

Analizând dependența coeficientului de frecare static de timpul de stick și coeficienții de frecare statici și cinetici ca funcție de viteza de antrenare, au fost aplicate aproximări logaritmice datelor rezultate, permițând determinarea lungimii de memorie (L_{mc}) (T. Baumberger, 1995) pentru cele trei forțe de contact aplicate și, în consecință, coeficienții statici la viteza țintită de 10^{-4} mm/s. Acest studiu a calculat un timp mediu de stick pentru fiecare viteză și încărcare din datele experimentale, oferind o imagine de ansamblu generală a duratelor de aderență sub diferite condiții de operare și încărcare în tribologie și mecanica contactului. A fost introdus conceptul de L_{mc} (lungimea de memorie), reprezentând distanța peste care interacțiunile anterioare ale unei suprafețe influențează comportamentul său actual, acționând efectiv ca 'memoria' suprafeței a evenimentelor tribologice trecute. A fost determinat și timpul de creep, un factor crucial în fenomenul de stick-slip pentru contactele Hertziane (cilindru-plan sau roată-șină). Coeficienții de frecare statici obținuți experimental într-un regim stabilizat la o viteză de 10^{-4} mm/s au fost comparați și validați cu cei determinați prin metoda fractală, după cum este detaliat în Capitolul 3.

4.4. Resultate si Discutii

Evoluția coeficientului de frecare, însoțită de emisiile acustice (AE), este prezentată ca exemplu al rezultatelor obținute pentru viteza de antrenare de 0.01 mm/s la forțe normale de 20-60 N. (Fig.4.2.a-c) și evoluția coeficientului de frecare pentru forța de 60 N la cele patru viteze de antrenare (Fig.4.2.d). În toate cazurile, prezența fenomenului de stick-slip a fost confirmată de variația coeficientului de frecare (COF). În termeni generali, salturile de stick-slip au coincis cu creșterile bruște în AE, deși la o încărcătură de 20 N această coincidență nu a fost întotdeauna prezentă.

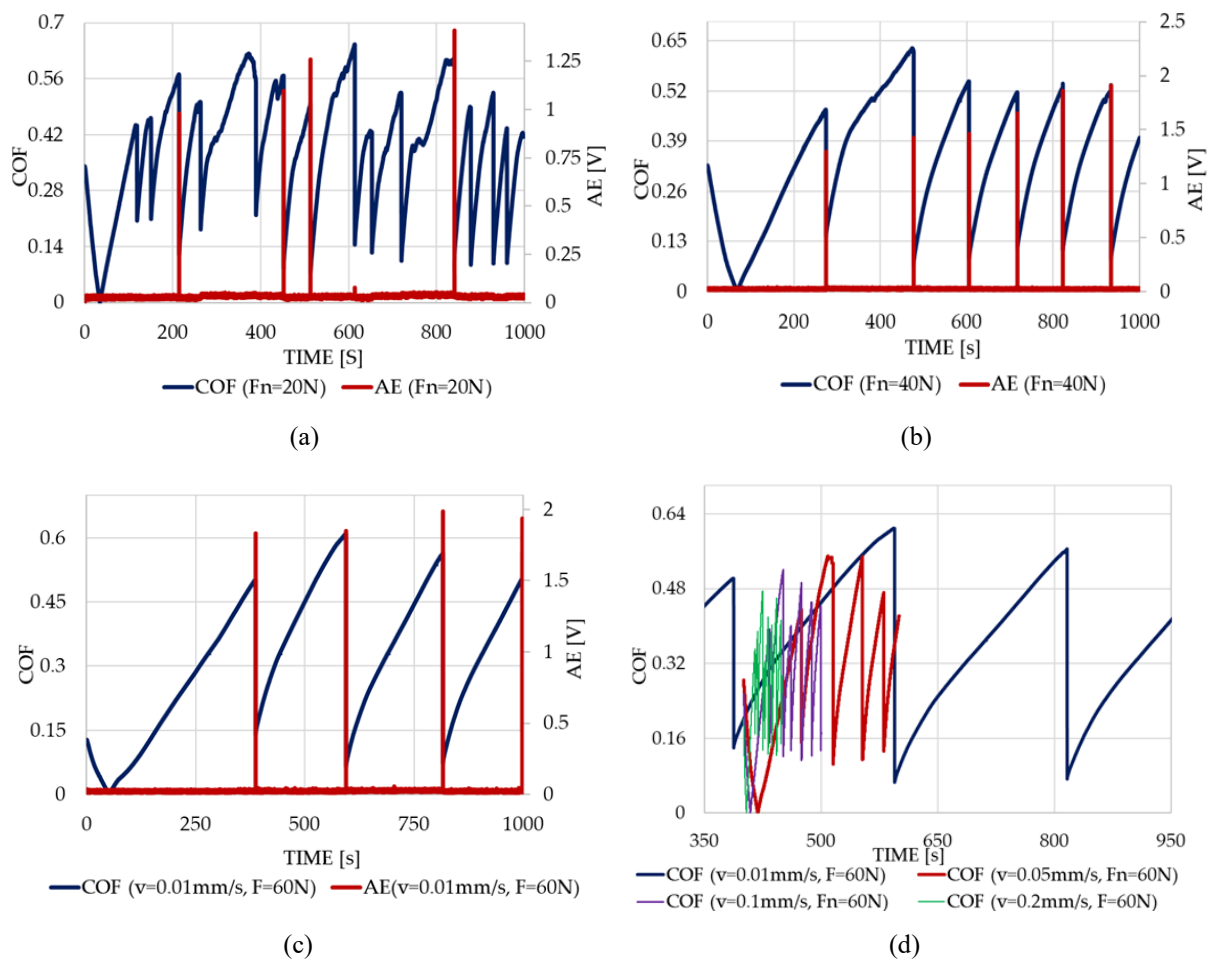


Fig. 4.3. COF and AE amplitude with a driving speed of 0.01 mm/s for the normal force of 20 N (a), 40 N (b), and 60 N (c).

Comparison of COF results over time at 60 N force and all driving speeds (d).

Figura 4.3 ilustrează coeficienții de frecare statică și cinetică și amplitudinea stick-slip pentru diferite viteze de antrenare. Așa cum era de așteptat, coeficienții de frecare statică și cinetică scad pe măsură ce viteza de antrenare crește până la o anumită rigiditate. Ambii coeficienți de frecare cresc cu durata de lipire datorită fenomenului de "saturare" a suprafeței reale de contact, astfel încât cu cât viteza de conducere este mai mare, cu atât timpul de lipire este mai scurt și coeficienții statici și cinetici sunt mai mici (Ozaki S., 2020, Lontin K., 2021). Creșterea vitezei de antrenare reduce, de asemenea, suprafața de contact și, în consecință, coeficientul de frecare tinde să scadă, rezultând o mișcare stick-slip de amplitudine mai mică (măsurată prin diferența dintre COF-urile statice și cinetice), așa cum se poate vedea în Fig.4.5c, și de frecvență mai mare, așa cum se arată în Fig.4.5d.

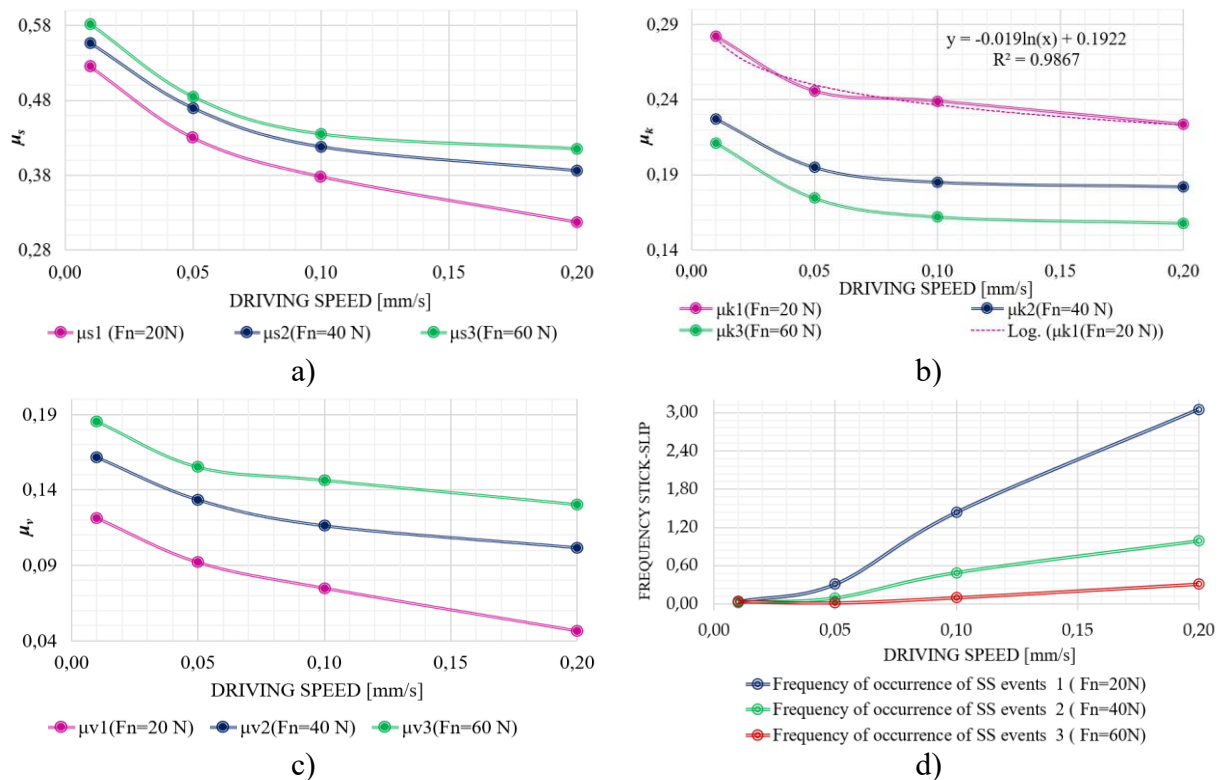


Fig. 4.5. The influence of the driving speed and normal force on the friction coefficients:

- a) static friction coefficient, b) kinetic friction coefficient, including the fitted curve of the kinetic friction coefficient with a force of 20 N, c) the amplitude of the stick-slip phenomenon, d) with the frequency of the number of the stick-slip jumps.

Figura 4.5b evidențiază dependența dintre coeficienții de frecare cinetică și viteza de antrenare, care scade pe măsură ce viteza de suprafață crește, aproximându-se cu curbele logaritmice de forma $y = a + (b \ln(x))$, așa cum a fost anterior găsit de Helstot și Caroli (Heslot F., 1994, Caroli C., 1995).

În ceea ce privește emisia acustică (AE), tendința generală a fost activitatea continuă de AE de intensitate scăzută în faza de stick, dar cu emisii explozive de amplitudine mare în faza de alunecare, ambele depinzând de sarcina normală.

Este ușor de observat că vârfurile AE apar doar la trecerea de la stick la slip (tranziția de la frecare statică la frecare cinetică), deși acestea apar cu o întârziere de câteva milisecunde în comparație cu COF. Această întârziere a AE poate fi explicată prin viteza finită de propagare a undelor elastice AE în comparație cu momentul inițierii fazei de slip (Fig.4.6).

În ambele faze, stick și slip, numărul de emisii acustice (AE) crește odată cu viteza de antrenare și scade cu scăderea sarcinii normale. De fapt, cu cât frecvența mișcării stick-slip este mai mare, cu atât numărul de emisii AE este mai mare. Pentru fiecare secvență de faza de slip într-un test, fiecare număr de AE a fost calculat pe durata fazei de slip și, în final, mediat pentru fiecare test. Similar, pentru faza de stick, numărul de AE a fost determinat pentru fiecare secvență pe durata fazei de stick, iar în final a fost determinată o medie pentru fiecare test. Prin urmare, o mișcare slip-stick

de frecvență scăzută și amplitudine mare produce un număr relativ scăzut de AE cu aspectul unei explozii, apărând în principal la începutul mișcării de slip.

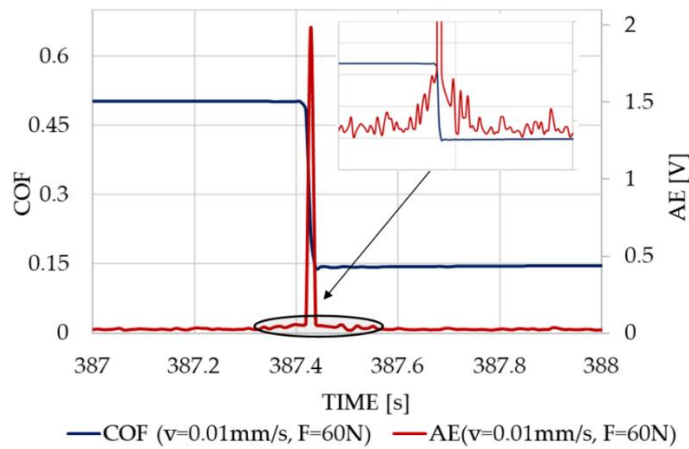


Fig. 4.6. The friction coefficient variation and acoustic emission variation (peak extracted).

Amplitudinile semnalului de Emisie Acustică (AE) au fost reprezentate grafic în raport cu viteza de antrenare pentru diferite sarcini (Fig. 4.5). În termeni generali, amplitudinile AE pentru fenomenele stick și slip par să fie mai degrabă legate de tipul de mișcare stick-slip: creșterea forței normale și scăderea vitezei de antrenare au dus la o creștere a amplitudinii mișcării stick-slip, cu o creștere consecventă a amplitudinii exploziilor AE. În plus, amplitudinea în faza de stick a fost semnificativ mai mică decât amplitudinea în faza de alunecare (Fig. 4.9. a, b), așa cum era de așteptat, deoarece AE cauzată în faza de stick a fost provocată doar de deformarea suprafeței de contact, în timp ce pentru faza de slip, au avut loc și alte fenomene, cum ar fi o parte a deformării plastice. În procesul de transmitere a forțelor normale între cele două corpuri și în prezența mișcării relative, s-a format „al treilea corp” cu proprietăți specifice cuplului de materiale. Astfel, structura materialului s-a schimbat, microcrăpăturile existente s-au unit, iar crăpături noi au apărut, în special în timpul apariției deformărilor plastice. De asemenea, s-a observat că amplitudinea AE urmează o curbă logaritmică, similar coeficienților de frecare, în funcție de viteza de mișcare.

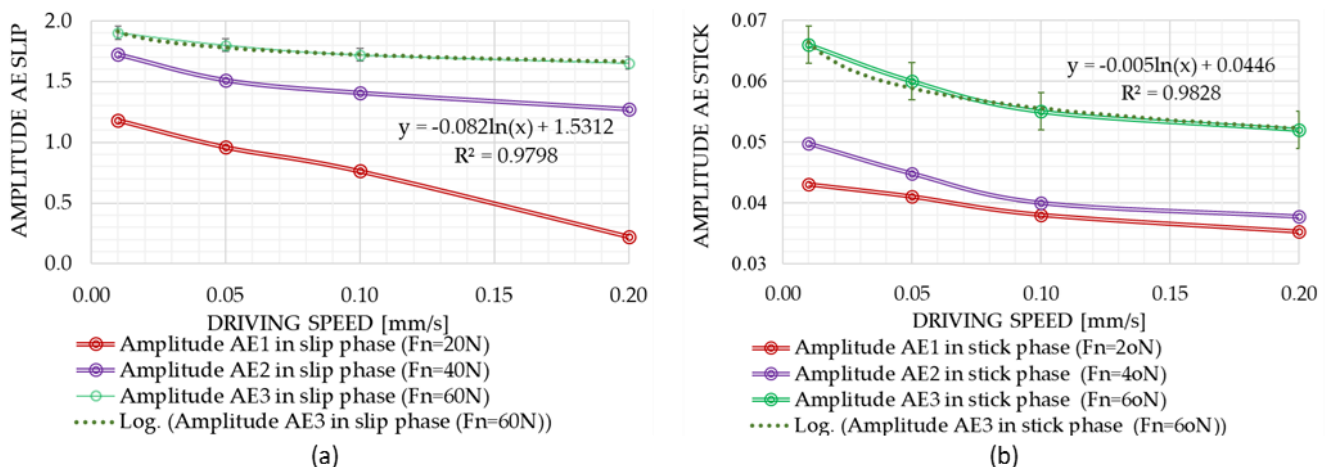


Fig. 4.9. Variation in AE amplitude with driving speed in slip phase (a) and stick phase (b).

Chapter 4: Stick-Slip Phenomena and Acoustic Emission in the Hertzian Linear Contact

Ținând cont că amplitudinea Emisiei Acustice (AE) este corelată cu amplitudinea mișcării stick-slip, și numărul de numărări pare să fie mai degrabă independent de amplitudinea mișcării, se pare că energia consumată prin frecare (W_{COF}) și energia AE (W_{AE}) ar putea fi, de asemenea, legate. Energia consumată prin frecare (W_{COF}) și energia AE (W_{AE}) au fost calculate pentru cele trei forțe, 20, 40 și 60 N, și pentru fiecare fază de lipire și alunecare (Fig. 4.10). În termeni generali, cu cât amplitudinea mișcării stick-slip este mai mare, cu atât energia consumată prin frecare (W_{COF}) este mai mare datorită creșterilor în forța de frecare și distanța de alunecare, și cu atât energia generată de AE este mai mare, datorită intensității mecanismelor de deformare din zona de contact.

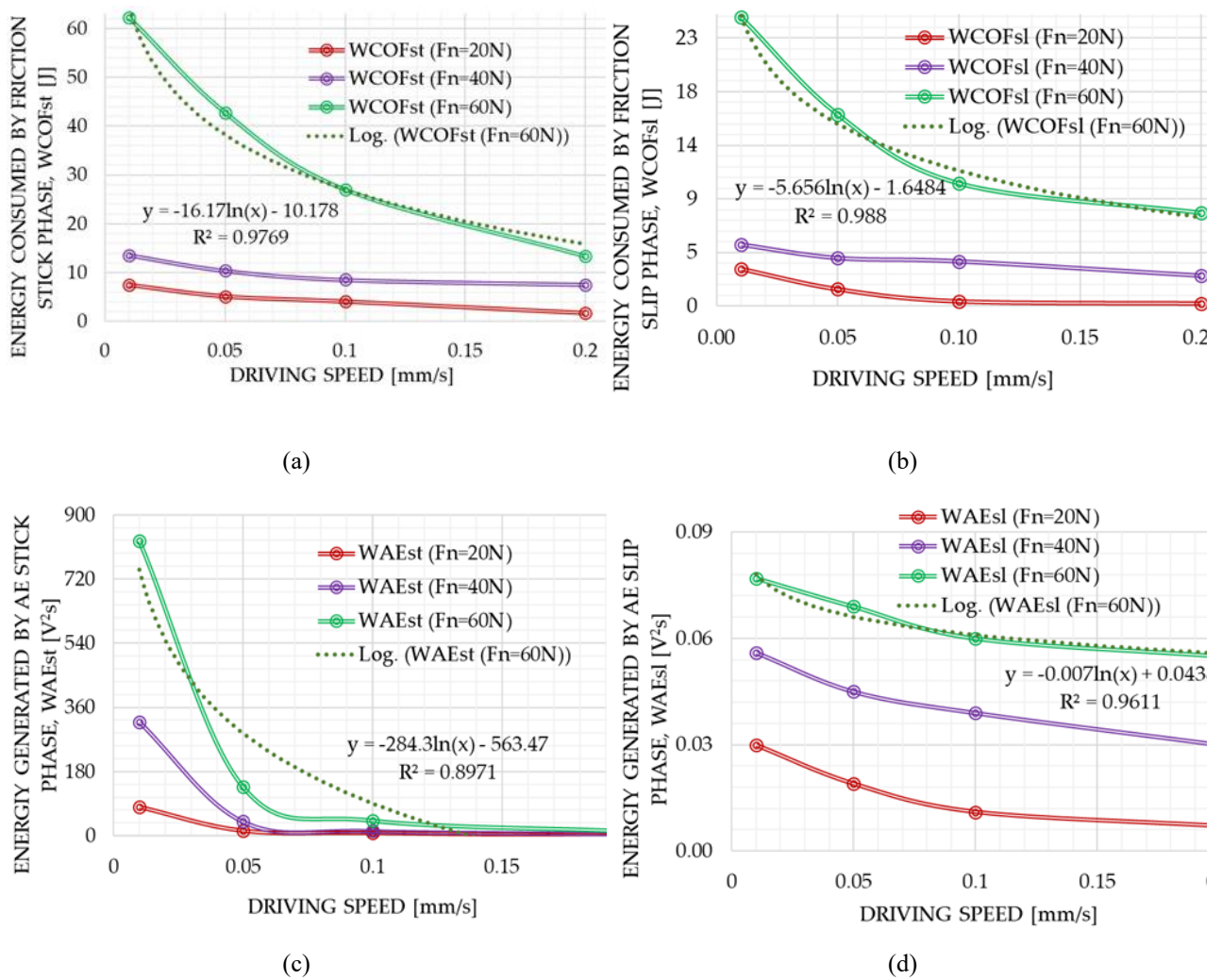


Fig. 4.10. Variation in energies with different driving speeds (mm/s): (a) energy consumed by friction in slip phase, W_{COFsl} (J), (b) energy consumed by friction in stick phase, W_{COFst} (J), (c) energy generated by AE in slip phase, W_{AEsl} (V^2s), (d) energy generated by AE in stick phase, W_{AEst} (V^2s).

În regimurile de viteză foarte scăzută, caracteristicile frecării nelubrificate între cilindru și plan sunt esențial independente de proprietățile materialelor, conform studiilor realizate de C. Caroli, P. Noziers (1995) și E. Rabinowicz (1958). Analiza oscilațiilor de alunecare în fenomenul de stick-slip a considerat coeficientul de frecare cinetic ca o funcție a vitezei de antrenare și coeficientul de frecare

static ca o funcție a timpului de lipire. Rezultatele studiilor, incluzând referințe notabile precum cele ale lui Heslot F. (1994), Baumberger T. (1996), Caroli C. și Noziers P. (1995) și Baumberger et al. (1995), evidențiază o relație logaritmică clară între coeficientul de frecare static și timpul de lipire (t_{stick}). Aceasta sugerează că coeficientul de frecare static μ_s nu este doar o proprietate instantanee, ci este influențat de „memoria” materialului sau de istoria contactului și deformării. Dependența statică a COF de timpul de lipire (t_{stick}) poate fi observată în Fig. 4.7.

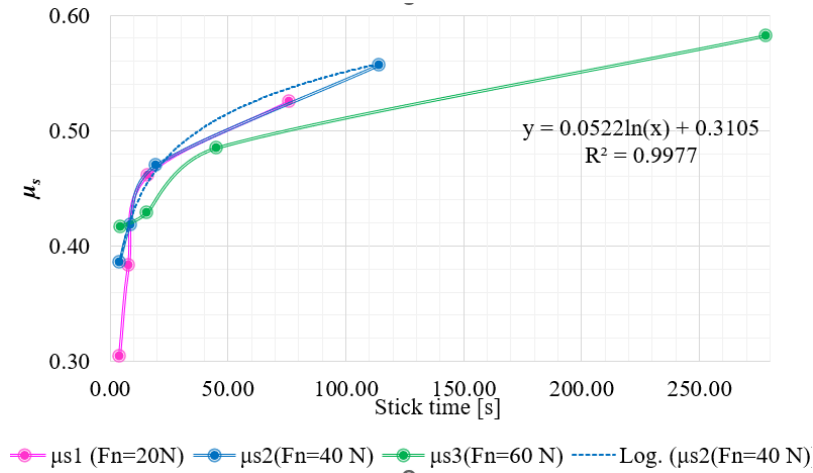


Fig. 4.12. The stick time and normal force influence the static friction coefficients.

Dupa cum se observa in Fig. 4.12, μ_s crește treptat cu durata contactului staționar înainte de inițierea mișcării. Acest răspuns descrie modul în care fenomenul de alunecare-bruscă în contactul cilindru-plan este influențat semnificativ de interacțiunile microscopice la nivelul suprafeței. Teoria lui Hertz sugerează că zonele mici de contact sub presiune concentrată conduc la deformare elastică, crescând forța de aderență și coeficientul de frecare static. Procese la nivelul suprafeței, cum ar fi difuzia, adsorbția și reacțiile chimice, amplifică acest lucru. Coeficientul de frecare dinamic (μ_k) variază în funcție de viteza de alunecare: scade logaritmic la viteze mici și crește la viteze mai mari, indicând o schimbare către un nou regim de disipare. Această tranziție de la un regim de "curgere lentă" la unul dominat de inerția alunecării este capturată în lucrările lui Rabinowicz (1965), Ruina A. L. (1983) și Rice J. R. (1983). Ei propun o lungime caracteristică, L_{mc} , care encapsulează această tranziție. În acest context, se poate defini o lungime caracteristică L_{mc} .

$$\mu_k \left(\frac{v}{v_0} \right) = a_k - b_k \ln \left(\frac{v}{v_0} \right) ; \mu_k \left(\frac{v}{v_0} \right) = \mu_s \left(\frac{t}{t_0} \right) = \mu_s \left(\frac{L_{mc}}{v} \right). \quad (4.1)$$

unde, v_0 este o constantă arbitrară de normalizare.

În studiul fenomenului de frecare și alunecare în contactul Hertzian, lungimea de memorie (L_{mc}) servește ca un parametru esențial, reflectând „memoria” sau „vârsta” interacțiunilor microscopice. Mai mult, L_{mc} este direct asociată cu durata de timp în care suprafețele în contact rămân într-o stare de aderență, cunoscută ca „timp de lipire”, și poate fi interpretată ca deplasarea medie necesară pentru

Chapter 4: Stick-Slip Phenomena and Acoustic Emission in the Hertzian Linear Contact

a reînnoi sau „reseta” populația de micro-contacte, marcând astfel o tranziție între seturi de contacte la nivel microscopic (Dieterich J. H., 1994). Coeficienții de frecare statică obținuți experimental la o viteză de 10^{-4} mm/s au fost comparați și validați cu cei determinați prin metoda fractală, așa cum este detaliat în Capitolul 3, cu rezultatele găsite în Tabelul 4.2.

Table 4.1. Comparison of static friction coefficients from experimental method against the fractal method.

Driving Speed (mm/s)	$F_n = 20$ N			$F_n = 40$ N			$F_n = 60$ N		
	μ_{s1}^*	μ_{sf1}^{**}	Relative error [%]	μ_{s2}^*	μ_{sf2}^{**}	Relative error [%]	μ_{s3}^*	μ_{sf3}^*	Relative error [%]
0.0001	0.751	0.749	0.267	0.813	0.816	0.369	0.851	0.856	0.587

* Static friction coefficients. ** Static friction coefficients from fractals.

Capitolul 5

Concluzii si lucrari viitoare

. În acest capitol, este prezentat un rezumat al principalelor constatări ale tezei. De asemenea, sunt propuse diverse recomandări pentru cercetări viitoare pe această temă.

5.1. Concluziile tezei

Inițial, tehnici de modelare fractală au fost utilizate pentru a reprezenta caracteristicile rugozității șinelor la Centrul de Testare Făurei din România. Atât funcția de structură, cât și funcția Weierstrass-Mandelbrot au fost folosite pentru a capta în mod eficient natura complexă a rugozității șinelor. Analiza a evaluat 41 de parametri statistici convenționali și compararea cu rugozitatea acustică a șinei obținută din măsurători și cu parametrii fractali simulați.

Patru secțiuni de testare a rugozității șinei, fiecare de 7.5 metri, au fost evaluate sistematic și segmentate de la 1 m la 7.5 metri. A fost făcută o comparație între parametrii statistici ai măsurătorilor experimentale și parametrii simulați folosind funcția W-M, dezvăluind că un număr reprezentativ dintre acești parametri se încadra într-o eroare relativă de 10%. Totuși, s-a observat că potrivirea numărului de parametri simulați cu parametrii mășurați a scăzut pe măsură ce lungimea măsurată a scăzut.

În mod specific, când s-au luat în considerare parametrii de amplitudine, spațiali și hibridi pentru o rugozitate măsurată de 7.5 m, corespondența lor cu rugozitatea simulată la aceeași lungime a fost găsită a fi de 100%. Dar pe măsură ce lungimea măsurată a scăzut, potrivirea numărului de parametri a scăzut treptat la 66.6% pentru o distanță de 2.5 m și apoi la 50% pentru o lungime de 1m.

Pentru o rugozitate măsurată de 30 m, parametrii de rugozitate din măsurătorile experimentale s-au potrivit cu parametrii simulați în proporție de 83.33% pentru aceeași lungime. Pe măsură ce lungimea de măsurare a crescut, atât profilurile de rugozitate măsurate, cât și cele simulate s-au observat că au distribuții gaussiene aproape simetrice.

Convergența măsurătorilor experimentale și a profilurilor simulate a subliniat eficacitatea abordării fractale în decriptarea comportamentului complex al rugozității șinei.

Continuând, tehnici de modelare fractală au fost folosite pentru a evalua coeficientul de frecare static în contextul mecanicii contactului Hertzian roată-șină, luând în considerare rugozitatea suprafeței. Parametrii fractali D și G_{fs} s-au dovedit a influența regimul elastic, afectând aria de contact critică, deformarea critică și forța de contact elastică.

Chapter 5: Conclusion and further work

Tranziția între regimurile elastic și elastoplastic a fost caracterizată de parametrii fractali D și G_{fs} , care s-au constatat că influențează rugozitatea suprafeței și interacțiunile dintre asperități. Când materialul a atins starea sa complet plastică, au fost observate deformări substanțiale ale asperităților, diminuând importanța caracteristicilor suprafeței inițiale și a parametrilor fractali.

În ceea ce privește forța totală de contact, au fost identificate impacturi semnificative asupra regimurilor elastic și elastoplastic prin variații ale parametrilor fractali D și G_{fs} , dar nu s-a observat niciun efect asupra regimului complet plastic. În contextul contactului Hertzian roată-șină, s-a observat că parametrul fractal D influențează aria reală de contact și mărimea maximă a spotului, afectând indirect emisiile acustice și generarea zgomotului.

S-a constatat că încărcătura normală totală interacționează cu parametrul fractal D , în special în intervalul 1.4-1.8. Coeficientul de frecare static a fost influențat de factori precum mărimea maximă a spotului, factorul de scară G_{fs} , forța aplicată și parametrul fractal D . Variații în D și G_{fs} s-au observat că influențează coeficientul de frecare static între 1.4 și 1.9. Totuși, în afara acestui interval, s-a observat că acesta ar putea fi umbrat de interacțiuni specifice de suprafață sau de un contact insuficient al asperităților.

Aceste observații subliniază importanța înțelegerii și luării în considerare a acestor parametri atunci când se evaluează interacțiunile de suprafață.

În faza finală a cercetării, fenomenul stick-slip pentru contactul Hertzian a fost examinat îndeaproape.

Semnalele de emisie acustică generate în timpul mișcării relative a eșantioanelor cilindru-plan au fost capturate de un sistem de achiziție multifuncțional și au fost procesate folosind parametri de bază bazati pe semnalul RMS. Obiectivul a fost de a determina dacă debutul și sensibilitatea fenomenului stick-slip pot fi detectate și prezise prin achiziția și analiza AE folosind echipamente și software cu cerințe reduse. Testele au fost efectuate în diverse condiții, inclusiv încărcături normale și viteze de alunecare. Deși testele nu au fost exhaustive, acestea au confirmat fezabilitatea utilizării parametrilor AE ne-complecși ca metodă nedistructivă pentru detectarea fenomenului stick-slip.

În toate testele efectuate, prezența fenomenului stick-slip a fost confirmată de variația coeficientului de frecare și coincidența acestuia cu exploziile de AE. S-a constatat că influențe semnificative asupra coeficientului de frecare sunt viteza de antrenare, viteza de alunecare și încărcătura normală. S-a observat că încărcături normale mai mari și viteze de antrenare mai mici cresc viteza de alunecare.

În ceea ce privește emisiile acustice, s-a observat o activitate AE redusă în timpul fazei de stick, în timp ce explozii de activitate de amplitudine mare au fost prezentate în timpul fazei de alunecare. Prezența fenomenului stick-slip a fost detectată prin măsurarea amplitudinii și energiilor emisiei acustice, care au fost evidențiate printr-o corelație pozitivă puternică între ele.

S-a constatat că amplitudinile și energiile generate de emisia acustică sunt semnificative și au confirmat o dependență directă de fenomenul stick-slip pentru contactul Hertzian liniar nelubrifiat. Astfel, emisia acustică detectată prin analiza parametrilor a fost identificată ca un indicator esențial pentru detectarea și monitorizarea fenomenului stick-slip.

Dintr-o altă perspectivă, analiza experimentelor a evidențiat că un coeficient de frecare static (COF) a fost derivat din fenomenul stick-slip. Acesta a fost perceput ca o reflectare a comportamentului specific al perechii de materiale în anumite condiții. În plus, un COF corespunzător regimului saturat a fost dedus folosind metode statistice. Când a fost comparat cu COF obținut prin modelarea fractală, coerența și relevanța utilizării teoriei fractale în evaluarea și predicția comportamentului de frecare al materialelor în contact au fost demonstrate. Concluzia este că emisia acustică, împreună cu modelarea fractală, oferă un cadru robust și eficient pentru studiul și înțelegerea fenomenului stick-slip și a proprietăților sale de frecare asociate.

5.2. Contributii

- Analiza calității suprafeței de rulare a căii ferate, cu accent pe dimensiunile fractale specifice ale rugozității șinelor și a roților motrice, utilizând geometria fractală și deducând parametrii fractali unici D și G_f , care sunt independenți de scara de măsurare;
- Utilitatea funcției Weierstrass-Mandelbrot pentru simularea înălțimii rugozității este argumentată prin compararea acesteia cu 41 de parametri clasici de măsurare a rugozității, accentuând relevanța dimensiunilor fractale ale suprafețelor pentru Contactul Hertzian;
- Stabilirea lungimii minime pentru măsurarea rugozității șinei, asigurându-se că rezultatele sunt concludente și aliniate la standardele internaționale privind rugozitatea acustică (EN 15610: 2019), reflectând dimensiunile fractale ale rugozității;
- Determinarea experimentală a coeficientului de frecare static pentru contactul Hertzian, urmată de validarea acestuia prin aplicarea unui model teoretic care utilizează abordări fractale.
- Detectarea Emisiilor Acustice (AE) ca un indicator crucial și o metodă nedistructivă eficientă pentru identificarea și monitorizarea fenomenului stick-slip (SS) în contactele Hertziene liniare nelubrificate. Utilizarea AE permite observarea directă și instantanee a tranzițiilor între fazele de stick și slip, oferind astfel o înțelegere profundă a dinamicii fricțiunii și a interacțiunilor de suprafață.
- Definirea lungimii memoriei ca factor determinant pentru coeficientul de frecare static în raport cu timpul de lipire și determinarea vitezei critice de tranziție între faza de lipire și faza de alunecare;

5.3. ecomandari si lucrari viitoare

Diagnosticarea degradării șinelor și a fenomenului stick-slip folosind traductoare de emisii acustice (AE).

Diagnosticarea degradării șinelor și captarea fenomenului stick-slip folosind traductoare AE. Utilizarea traductoarelor AE permite detectarea precisă și monitorizarea în timp real a degradării șinelor și captează complexitățile fenomenului stick-slip. Această perspectivă mai profundă facilitează intervenții mai eficiente și o gestionare îmbunătățită a întreținerii infrastructurii.

Corelarea diferitelor modele de uzură ale șinelor și roților cu schimbările în dimensiunile fractale.

Prin efectuarea unei examinări detaliate și modelarea utilizând metoda fractală a diferitelor modele de uzură, putem obține o înțelegere mai clară asupra modului în care aceste modele de uzură influențează dimensiunile fractale și, în consecință, comportamentul dinamic al șinelor și roților. Înțelegerea acestei relații poate deschide calea pentru elaborarea unor strategii mai eficiente de prevenire și reparare a degradării șinelor și roților.

Sugestii pentru implementarea dimensiunilor fractale în caracterizarea standardizată a rugozității acustice.

Includerea dimensiunilor fractale ca standard în analiza rugozității acustice ar putea oferi o metrică mai coerentă pentru evaluarea performanței șinelor și roților. Aceasta ar putea, de asemenea, să faciliteze comunicarea și compararea datelor între diferite studii și aplicații.

Evidențierea influenței parametrilor fractali ai rugozității echivalente ale șinelor și roților asupra vibrațiilor verticale de rulare.

. Evaluând rigiditatea suprafețelor Hertziene cu rugozitate fractală, putem obține cunoștințe esențiale despre cum modificările parametrilor fractali influențează vibrațiile verticale. Această cunoaștere este esențială, deoarece interacțiunea parametrilor de rugozitate fractală, dinamica de contact, distribuția sarcinii și proprietățile materialelor influențează împreună aceste vibrații. Înțelegerea acestor interacțiuni ar putea conduce la dezvoltarea de soluții pentru reducerea vibrațiilor și prelungirea duratei de viață a șinelor și roților.

Stabilirea unei metode pentru evaluarea parametrilor fractali unici folosind dispozitive de sondare a suprafeței cu rezoluții variabile.

Această metodă ar putea oferi o examinare mai detaliată și nuanțată a suprafeței, dezvăluind cu precizie variațiile de rugozitate și structura acesteia. În plus, ar putea îmbunătăți acuratețea și fiabilitatea măsurătorilor și oferi un cadru pentru verificarea rezultatelor rugozității acustice. În

Chapter 5: Conclusion and further work

contextul întreținerii căilor ferate, această abordare ar putea fi crucială pentru elaborarea unui plan strategic de întreținere. Cu capacitatea de a anticipa precis variațiile de rugozitate și parametrii fractali, ar putea fi determinat momentul optim pentru rectificarea șinelor, asigurând funcționarea eficientă și prelungirea duratei de viață a infrastructurii feroviare.

References

- [1] Baumberger et al., Nonlinear analysis of stick-slip bifurcation in the cree-controlled regime of dry friction, *Physical Review E*, 51(5), 1995, pp. 4005-4010.
- [2] Benabdallah H. S., Aguilar D. A., Acoustic Emission and its Relationship with Friction and wear for Sliding Contact. *Tribol. Trans.*, 2008, 51, 738 - 747.
- [3] Berry M. V. and Lewis Z. V., On the Weierstrass - Mandelbrot fractal function, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 370, 1980, 459 - 484.
- [4] Bhushan B., Majumdar A., Elastic-plastic contact model for bifractal surfaces, *Wear*, 153, 1992, 53 - 64.
- [5] Caroli C., Nozieres P., Persson B. N. J., Tossatti E., Dry friction as a hysteretic elastic response. In *Physics of Sliding Friction*, Springer: Dordrecht, The Netherlands, 1995, pp. 27 - 49.
- [6] Chang W. R., Etsion I., Bogy B. D., An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces. *ASME J. Tribol.*, 1987, 109, 257 - 263.
- [7] Chang W. R., Etsion I., Bogy D. B., Static friction coefficient model for metallic rough surfaces. *ASME J. Tribol.*, 1988, 110, 57 - 63.
- [8] Diehl R. J., Holm P., Roughness measurement-have the necessities changed?, *Journal of Sound and Vibrations*, 293, (2006), 777 - 783.
- [9] Eid H., Adams G. G., McGruer N. E., Fortini A., Buldyrev S., Srolovitz D., A Combined Molecular Dynamics and Finite Element Analysis of Contact and Adhesion of a Rough Sphere and a Flat Surface. *Tribol. Trans.*, 2011, 54, 920 - 928. <https://doi.org/10.1080/10402004.2011.615638>.
- [10] Esveld C, *Modern Railway Track*, MRT-Productions, 2001, Chap 2.
- [11] Gadelmawla E. S. et al., Roughness parameters, *J. Mater. Process. Technol*, 123, 2002, 133 - 145.
- [12] Ganti S., Bhushan B., Generalized fractal analysis and its surfaces applications to engineering surfaces, *Wear*, 180, 1995, 17 - 34.
- [13] Green I., Exact Spectral Moments and Differentiability of the Weierstrass-Mandelbrot Fractal Function, *J. Tribol.*, 142(4), 2020, 041501.
- [14] He L. and Zhu J., The fractal character of processed metal surfaces, *Wear*, 208, 1997, 17 - 24.
- [15] He P. et al., Analysis of the best roughness surface based on the bearing area curve theory, *Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology* ,2021, 1 - 14.

References

- [16] Heslot F., Baumberger T., Perrin B., Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics: Experiments and a heuristic model. *Am. Phys. Soc.*, 1994, 49, 4973 - 4950.
- [17] Johnson K. L., *Contact mechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [18] Kogut L., Etsion I., A semi-analytical solution for the sliding inception of a spherical contact. *ASME J. Tribol.*, 2003, 125, 499 - 506.
- [19] Kogut L., Etsion I., A static friction model for elastic-plastic contacting rough surfaces. *ASME J. Tribol.*, 2004, 126, 34 - 40.
- [20] Kogut L., Etsion I., Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat. *ASME J. Appl. Mech.*, 2002, 69, 657 - 662.
- [21] Lontin K., Khan M., Interdependence of friction, wear, and noise. *Friction*, 2021, 9, 1319 - 1345. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0500-x>.
- [22] Majumdar A. and Bhushan B., Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces, *J. Tribol.*, 112, 1990, 205 - 216.
- [23] Majumdar A., Bhushan B., Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *ASME J. Tribol.*, 1991, 113, 1 - 11.
- [24] Majumdar A., Bhushan B., Fractal model of elastoplastic contact between rough surfaces, *J. Tribol.* 113, 1991, 1 - 11.
- [25] Majumdar A., Bhushan B., Role of fractal geometry in roughness characterisation and contact mechanics of surfaces *J. Journal of Tribology*, 1990, 112(2): 205 - 216.
- [26] Majumdar A., Tien C. L., Fractal characterization and simulation of rough surfaces, *Wear*, 136, 1990, 313-327.
- [27] Majumdar A., Tien C. L., Fractal Network Model for Contact Conductance, *J. Heat Transfer.*, 113 (3), 1991, 516 - 525.
- [28] Mandelbrot B. B., Self-affine fractals and fractal dimension, *Phys. Scr.* 32, 1985, 257 - 260.
- [29] Mandelbrot B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, eds. Echo Point Books & Media, (Brattleboro, Vermont, 2021).
- [30] Mulakaluri N., Persson B. N. J., Adhesion between elastic solids with randomly rough surfaces: Comparison of analytical theory with molecular-dynamics simulations. *EPL* 2011, 96, 66003. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/96/66003>.
- [31] Nayak P. R., Some aspects of surface roughness, *Wear*, 26, 1973, 165 - 174.
- [32] Otero Yugat J., *Contribución al estudio de las vibraciones producidas por el contacto rueda-carril y su transmisión al entorno*, M. S. thesis, Universitat Politècnica De Catalunya, 2009.
- [33] Ozaki S., Matsuura T., Maegawa S., Rate, state and pressure-dependent friction model based on the elastoplastic theory. *Friction*, 2020, 8, 768 - 783.

References

- [34] Persson B. N. J., Sliding Friction. In Physical Principles and Applications, Springer-Verlag: New York, NY, USA, 2000.
- [35] Persson B. N. J., Tossati E., Physics of sliding friction, 1995, Series E, Applied Science, 311.
- [36] Popov V. L., Contact Mechanics and Friction, Physical Principles and Applications, Springer, 2009.
- [37] Singh A. N., The theory and construction of non-differentiable functions, in Squaring the Circle and Other Monographs, Chelsea Publishing, 1953.
- [38] Thomas T. R., Thomas A. P., Fractals and engineering surface roughness, Surf. Topogr., 1, 1988, 1 - 10.
- [39] Thompson D. J., Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier Ltd, 2009,
- [40] Thompson D. J., The influence of the contact zone on the excitation of wheel/rail noise, Journal of Sound and Vibrations, 267 (2003) 523 - 536.
- [41] Verheijen E., A survey on roughness measurements, Journal of Sound and Vibrations, 293 (2006), 784 - 794.
- [42] Villamarin R. A., A model for railway induced ground vibrations in the frame of preliminary assessment studies, M. S. thesis, Universitat Politècnica De Catalunya, 2011.
- [43] You J. M., Chen T. N., A static friction model for the contact of fractal surfaces, Proc. IMechE Vol. 224 Part J: J. Engineering Tribology, 2010, pg. 513 - 518, DOI: 10.1243/13506501JET760
- [44] Yuan Y., Gan L., Liu K., & Yang X., 2016. Elastoplastic contact mechanics model of rough surface based on fractal theory. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30(1), 207 - 215.
- [45] Zhang C. et al., Static friction coefficient model of joint surface based on the modified fractal model and experimental investigation, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124 (11-12), 1 - 15
- [46] Zhang W. et. al., Wheel / rail adhesion and analysis by using scale roller rig, Wear, 253, (2002), 82 - 88.
- [47] Zhang X., Xu Y. and Jackson R. L., An analysis of generated fractal and measured rough surfaces in regards to their multi-scale structure and fractal dimension, Tribol. Int., 105, 2017, 94 - 101.
- [48] Zhang Y., Zhang X., Jiang L., et al. Fractal Model of Static Frictional Coefficient on Joint Surface Considering Elastic-plastic Deformation. Journal of Taiyuan University of Science and Technology of China, 2014, 25(4): 294 - 301.
- [49] Zhao B., Xu H. & Lu X., 2019. Sliding Interaction for Coated Asperity with Power-Law Hardening Elastic-Plastic Coatings. Materials, 12(15), 2388.

References

- [50] Zhao Y. W., Maietta D. M., L. Chang, An asperity micro-contact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow. *ASME J. Tribol.*, 2000, 122, 86 - 93.
- [51] Zhou G. Y. et al., Fractal geometry model for wear prediction, *Wear*, 170, 1993, 1 - 14
- [52] Zhou G. Y., Leu M. C., Blackmore D., Fractal geometry model for wear prediction. *Wear*, 1993, 170, 1 - 14.
- [53] Zhou G., Statistical, random and fractal characterizations of surface topography with engineering application, A Dissertation Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical and Industrial Engineering, 1993.
- * EN ISO 21920 - 2: 2023 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- ** EN 15610: 2018 Railway applications. Acoustics. Rail and wheel roughness measurement related to noise generation.
- *** ISO 3095: 2013 Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by rail bound vehicles.