



UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS" DIN GALAȚI
Școala doctorală de Inginerie

TEZĂ DE DOCTORAT

ANALIZA COMPORTĂRII DINAMICE
A RULOURELOR COMPACTOARE VIBRATOARE
PENTRU LUCRĂRI DE DRUMURI

REZUMAT

Doctorand,
Ing. Gigel-Florin CĂPĂȚĂNĂ

Conducător Științific,
Prof.univ.dr.ing.dr.h.c. Polidor-Paul BRATU

Seria I6: Inginerie mecanică Nr. 10
Galați 2013

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Școala doctorală de Inginerie



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

ANALIZA COMPORTĂRII DINAMICE A RULOURELOR COMPACTOARE VIBRATOARE PENTRU LUCRĂRI DE DRUMURI

Doctorand

Ing. Gigel-Florin CĂPĂȚÂNĂ

**Conducător științific
Referenți științifici**

Prof.univ.dr.ing.dr.h.c. Polidor-Paul BRATU

Prof.univ.dr.ing. Gilbert-Rainer GILLICH

Prof.univ.dr.ing. Petre ZAFIU

Prof.univ.dr.ing. Gavril AXINTI

Seria I6: Inginerie mecanică Nr. 10

GALAȚI

2013

Seriile tezelor de doctorat sustinute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

Seria I 6: **Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8. **Ingineria sistemelor**

Domeniul ȘTIINȚE ECONOMICE

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul ȘTIINȚE UMANISTE

Seria U 1: **Filologie-Engleză**

Seria U 2: **Filologie-Română**

Seria U 3: **Istorie**



DECIZIA

nr. 2550 / 24.11.2013

În conformitate cu prevederile Legii Educației Naționale nr. 1/05.01.2011, ale Codului studiilor universitare de doctorat și ale Regulamentului instituțional privind organizarea și desfășurarea studiilor universitare de doctorat;

în baza referatului conducătorului științific **Prof.univ.dr.ing. Polidor-Paul BRATU**;

conform aprobării Consiliului școlii doctorale din data de **25.11.2013**;

în baza Ordinului Ministrului Educației, Cercetării, Tineretului și Sportului nr. 3288/20.02.2012 privitor la numirea rectorului;

Rectorul universității decide:

Art. 1. Se numește comisia pentru evaluarea și susținerea publică a tezei de doctorat de către doctorandul(a) **ing. CĂPĂȚĂNĂ I. GIGEL-FLORIN**, domeniul **Inginerie mecanică**, în următoarea componență :

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Președinte | Conf.univ.dr.ing. Cristian SIMIONESCU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați |
| 2. Conducător de doctorat | Prof.univ.dr.ing. Polidor-Paul BRATU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați |
| 3. Referent oficial | Prof.univ.dr.ing. Gilbert-Rainer GILLICH
Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița |
| 4. Referent oficial | Prof.univ.dr.ing. Petre ZAFIU
Universitatea Tehnică de Construcții din București |
| 5. Referent oficial | Prof.univ.dr.ing. Gavril AXINTI
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați |

Art. 2. Școala doctorală, Secretariatul doctorat, Compartimentul salarizare și Biroul financiar vor duce la îndeplinire prevederile prezentei decizii.

Rector,
Prof. univ. dr. ing. Iulian Gabriel BÎRSAN



CUPRINS

NOTAȚII ȘI ABREVIERI.....	1	
LISTĂ FIGURI. LISTĂ TABELE.....	5	
CAPITOLUL I		
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND PROCESUL DE COMPACTARE A PĂMÂNTURILOR ȘI MIXTURILOR ASFALTICE.....	9	3
1.1. Introducere.....	9	3
1.2. Noi direcții în stabilirea legilor de comportare mecanică a masivelor de pământ.....	9	3
1.3. Considerații privind practica actuală în domeniul compactării prin vibrații.....	12	3
1.4. Considerații privind monitorizarea inteligentă a compactării.....	18	8
1.5. Oportunitatea, necesitatea, scopul și obiectivele tezei.....	20	10
CAPITOLUL II		
VARIETATEA CONSTRUCTIVĂ, FUNCȚIONALĂ ȘI TEHNOLOGICĂ A RULOUREILOR VIBRATOARE PENTRU COMPACTAREA STRATURILOR RUTIERE	23	11
2.1. Generalități.....	23	11
2.2. Compactoare autopropulsate cu un singur rulou vibrator.....	25	12
2.3. Compactoare autopropulsate cu două rulouri vibratoare.....	27	12
2.4. Caracteristici dinamice și de vibrații pentru compactoare vibratoare.....	30	14
2.5. Capabilitatea tehnologică a echipamentelor de compactare.....	38	15
CAPITOLUL III		
MODELE DINAMICE STRUCTURALE PENTRU COMPACTOARE VIBRATOARE.....	41	16
3.1. Generalități.....	41	16
3.2. Modelul cu un singur grad de libertate al unui compactor vibrator.....	42	17
3.3. Modelul cu două grade de libertate al unui compactor vibrator.....	43	17
3.4. Modelul cu trei grade de libertate al unui compactor vibrator.....	44	18
3.5. Concluzii parțiale.....	50	19
CAPITOLUL IV		
MODELE REOLOGICE ALE STRUCTURILOR RUTIERE.....	51	20
4.1. Modele reologice uzuale folosite în studiul comportării materialelor (pământ/mixtură asfaltică) supuse acțiunii vibratorii.....	51	20
4.2. Stadiul actual al modelării complexe a comportării elasto-plastice a materialelor supuse compactării prin vibrație.....	53	20
4.3. Particularități ale relațiilor tensiune-deformație utilizate în studiul reologic al terenurilor supuse compactării vibratorii.....	61	22
4.4. Model reologic avansat pentru simularea compactării terenurilor cu evidențierea fenomenului de consolidare.....	70	23
4.5. Concluzii parțiale.....	79	25
CAPITOLUL V		
LEGITĂȚI FUNCȚIONALE DE DEPENDENȚĂ ÎNTRE PARAMETRII CARACTERISTICI AI PĂMÂNTURILOR STABILITE PE BAZA DETERMINĂRIILOR EXPERIMENTALE.....	81	26

5.1.	Dependența modulului static de deformare liniară a pământului funcție de densitatea sa în stare uscată.....	81	26
5.2.	Dependența lățimii amprenteii de contact dintre ruloul utilajului de compactare și teren, funcție de densitatea în stare uscată a pământului...	82	26
5.3.	Dependența grosimii optime a stratului de pământ care se compactează, funcție de densitatea în stare uscată a pământului.....	83	26
5.4.	Dependența tasării stratului de pământ funcție de densitatea sa în stare uscată..	83	27
5.5.	Dependența modulului static de deformare liniară funcție de tasarea terenului....	86	27
5.6.	Dependența coeficientului de rigiditate funcție de tasarea terenului.....	87	27
5.7.	Dependența forței de rezistență a terenului funcție de tasarea acestuia.....	89	27
5.8.	Dependența efortului unitar axial de compactare funcție de tasarea terenului.....	89	27
5.9.	Dependența globală a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor-teren.....	90	28
CAPITOLUL VI			
ANALIZA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN VIBRARE..		93	29
6.1.	Date inițiale.....	93	29
6.2.	Metode experimentale pentru determinarea parametrilor specifici procesului de compactare.....	93	29
6.3.	Plan de încercări experimentale.....	94	29
6.4.	Rezultate obținute.....	96	31
6.5.	Prelucrarea datelor experimentale.....	100	31
6.6.	Analiza spectrală a semnalului deplasare în concordanță cu realizarea gradului de compactare.....	122	33
6.7.	Concluzii parțiale.....	122	33
CAPITOLUL VII			
ANALIZA DINAMICĂ A INTERACȚIUNII RULOU –TEREN ÎN PROCESUL DE COMPACTARE PRIN VIBRAȚII.....		123	34
7.1.	Introducere.....	123	34
7.2.	Model dinamic cu un grad de libertate pentru studiul interacțiunii rulou-teren în procesul de compactare prin vibrații.....	124	34
7.3.	Modele dinamice cu mai multe grade de libertate pentru studiul interacțiunii rulou-teren în procesul de compactare prin vibrații.....	126	36
7.4.	Optimizarea modelului vâsco-elasto-plastic al terenului pe baza încercărilor experimentale in situ.....	129	36
7.5.	Model dinamic propus pentru simularea compactării terenurilor cu evidențierea fenomenului de propagare a undelor de compresiune.....	143	44
7.6.	Concluzii parțiale.....	147	45
CAPITOLUL VIII			
CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII GENERALE DE CERCETARE.....		149	46
8.1.	Concluzii.....	149	46
8.2.	Contribuții personale.....	149	46
8.3.	Direcții generale de cercetare.....	150	47
LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE.....		151	48
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....		153	49

INTRODUCERE

Scopul acestei teze de doctorat constă în evaluarea instrumentală și informatică a legităților structurale și funcționale care guvernează interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul compactat în scopul elaborării unui set de modele aplicative care să asigure interfața utilaj – proces tehnologic prin monitorizarea și controlul parametrilor funcționali și menținerea acestora în zona de optim.

Ținând cont de necesitatea și de oportunitatea acestei teze de doctorat, următoarele **obiective principale** au fost urmărite pe parcursul cercetărilor și anume:

- evaluarea multicriterială a nivelului actual ale cercetărilor în domeniu pe baza analizei critice a realizărilor relevante atât pe plan național, cât și la nivel internațional;
- stabilirea setului de elemente reologice care să contituie baza teoretică pentru dezvoltarea și fundamentarea modelelor finale, cu rol aplicativ, ținând cont de caracteristicile elastice și disipative ale mediilor analizate și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat;
- analiza comparativă a comportării atât în regim static, cât în special în regim dinamic a modelelor reologice în scopul identificării și evidențierii elementelor de specificitate privind capacitatea acestora de a simula intimitatea (profunzimea) fenomenologică a interacțiunii organ de lucru – material procesat;
- asamblarea la nivel teoretic a setului de modele de interfață, prin compunerea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu urmărirea, în scopul optimizării, a următorilor parametri esențiali: complexitatea structurală versus fidelitatea simulării, nivelul de detaliere versus disponibilitatea de rezolvare (calculabilitate numerică);
- elaborarea unui set de teste instrumentale „in situ” completate cu o serie de încercări experimentale de laborator care, pe baza unui plan sistemic de analiză multi-corelativă, să asigure baza de date pentru procesul de armonizare comportamentală și acordare parametrică a modelelor matematice/numerice cu realitatea identificabilă și măsurabilă;
- stabilirea configurației finale, acordarea caracteristicilor de lucru și validarea setului de modele de interfață cu evaluarea nivelului de performanță obținut.

Teza de doctorat este structurată în 8 capitole dezvoltate pe 159 pagini conținând 123 figuri, 25 tabele și 143 referințe bibliografice.

În cele ce urmează, este prezentată o descriere a conținutului capitolelor tezei.

Capitolul 1 cuprinde stadiul actual privind nivelul cunoașterii și al cercetărilor recente în domeniul compactării straturilor rutiere (de ex. pământ, mixtură asfaltică).

În **capitolul 2** este prezentată varietatea constructivă, funcțională și tehnologică a organelor de lucru ale compactoarelor, punând accent pe cele care folosesc vibrațiile în procesul tehnologic de compactare a straturilor rutiere. De asemenea, este argumentată pe considerente teoretice și practice importanța corelației între natura terenului, soluția tehnologică și utilajul utilizat, astfel încât să se obțină un anumit nivel de performanță impus la executarea lucrărilor specifice de drumuri.

Capitolul 3 cuprinde o gamă variată de modele dinamice folosite la simularea compactoarelor vibratoare, fiind prezentate în ordinea complexității constitutive a acestora, începând de la cel cu un singur grad de libertate (modelarea simplificată a unui singur rulou vibrator tractat/autopropulsat) până la cel cu trei grade de libertate (modelarea unui compactor cu un singur rulou vibrator și cu două trepte de izolare a vibrațiilor). Pentru aceste modele dinamice s-au scris ecuațiile diferențiale de mișcare, determinându-se deplasările instantanee ale maselor sau punctelor de interes ale compactorului (modelat ca un rigid). Expresiile acestor deplasări sunt necesare în

capitolele următoare când se studiază interacțiunea organ de lucru – teren în vederea obținerii unui grad de compactare impus, reprezentând evaluarea tasării straturilor compactate.

În **capitolul 4** sunt prezentate modele reologice folosite în studiul comportării materialelor (supuse acțiunii vibratorii) din componența structurilor rutiere. În prima parte sunt prezentate modelele mecanice simple ale pământului, alcătuite din câte un singur element (Hooke, Newton, Saint-Venant, Bathelt simplu), iar apoi din compunerea acestora (Maxwell, Voigt, P-E Bathelt, P-E-D Hartmann, etc.), finalizând cu propunerea unui model reologic avansat pentru simularea compactării terenurilor cu evidențierea fenomenului de consolidare. Acest capitol mai conține și particularitățile relațiilor tensiune-deformație specifice acestor modele, argumentând pe baza unei analize structurale cum se manifestă legile reologice la structuri rutiere și semnificația diferiților coeficienți și a relațiilor matematice utilizate în mecanica pământurilor. Apoi, s-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de coeficientul de rigiditate, de forța de rezistență, precum și de efortul unitar axial de compactare a terenului. În final, pe baza acestor legități s-a determinat dependența globală a tuturor parametrilor enumerați anterior care au implicare directă în procesul de interacțiune compactor-teren.

În **capitolul 5** sunt deduse legitățile funcționale între parametrii caracteristici ai pământurilor stabilite pe baza determinărilor experimentale. În primul rând s-a stabilit dependența densității pământului în stare uscată funcție de modulul static de deformare liniară, de lățimea amprentei de contact dintre rulou și teren, de grosimea optimă, precum și de tasarea stratului din componența sistemului rutier. Apoi, s-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de coeficientul de rigiditate, de forța de rezistență, precum și de efortul unitar axial de compactare a terenului. În final, pe baza acestor legități s-a determinat dependența globală a tuturor parametrilor enumerați anterior care au implicare directă în procesul de interacțiune compactor-teren.

În **capitolul 6** este descrisă metodologia și planul de realizare a testelor experimentale în cazul compactării pământurilor, indicându-se metodele de experimentare utilizate, precum și aparatura specifică pentru monitorizarea parametrilor esențiali ai procesului de compactare. Testele experimentale au fost făcute pe terenuri de umplutură în cadrul șantierelor de construcții hidrotehnice din țara noastră de la Siret și Argeș. Prin aceste teste s-au determinat parametrii fizico-mecanici ai terenului (umiditate, densitate, tasare plastică, grad de compactare) după treceri succesive, precum și spectrul în frecvență al vibrațiilor în timpul desfășurării procesului tehnologic de compactare. Evaluarea acestor parametri era necesară deoarece o parte dintre ei reprezintă mărimi de intrare în modelul dinamic al interacțiunii compactor-teren propus în teză, iar cealaltă parte este utilă pentru validarea modelului, reprezentând mărimi de ieșire ai acestuia. Suplimentar, analiza spectrală efectuată permite furnizarea unor date utile pentru realizarea concepției unui aparat special pentru determinarea gradului de compactare în timp real care are implicații directe asupra optimizării parametrilor tehnologici și operaționali ai utilajului.

În **capitolul 7** sunt prezentate rezultatele simulării numerice a interacțiunii compactor-teren pe baza modelului reologic complex și neliniar propus în teză, care ține seama de caracteristicile reale ale terenului (elastice, disipative și plastice) și de cele ale utilajului de compactat. Modelul a fost armonizat și acordat în conformitate cu rezultatele obținute la prelucrarea datelor experimentale. Pentru simularea modelului a fost utilizat pachetul software specializat Matlab. Rezultatele obținute au evidențiat comportarea reală a utilajului și acțiunea sa asupra terenului supus compactării.

Capitolul 8 cuprinde concluzii finale, contribuții personale în domeniul tezei și direcțiile viitoare de cercetare.

CAPITOLUL I

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND PROCESUL DE COMPACTARE A PĂMÂNTURILOR ȘI MIXTURILOR ASFALTICE

1.1. Introducere

La lucrările de terasamente, terenul natural utilizat în umplutură, este caracterizat de următorii factori: umiditate, porozitate, compactitate. Pentru anumite valori ale factorilor ce descriu starea pământurilor, se remarcă o anumită comportare a terenului sub acțiunea forțelor exterioare prin solicitări mecanice. Pământul are în componența sa particule solide minerale, produse prin degradarea fizică sau chimică a rocilor care pot conține sau nu materii organice.

Prin compactare se înțelege procesul fizico-mecanic prin care, sub acțiunea unui lucru mecanic transmis din exterior, se obține întrepătrunderea prin așezarea particulelor fazei solide, cu efecte asupra micșorării fazei lichide și gazoase din structura scheletului mineral. La sfârșitul procesului de compactare se obține o reducere a volumului de goluri dintre particulele solide, o creștere a caracteristicilor mecanice prin modulul de deformație și rezistența la compresiune, reducându-se permeabilitatea apei în stratul compactat.

1.2. Noi direcții în stabilirea legilor de comportare mecanică a masivelor de pământ

În cazul modelării și simulării comportării pământului sub acțiunea sarcinilor exterioare este impetuos necesar cunoașterea tendințelor moderne de dezvoltare a reologiei completate de unele realizări actuale din punct de vedere teoretic, precum și dificultățile care apar în stabilirea unor legi de guvernare mecanică a pământurilor.

Ținând cont de studiile teoretice de determinare a legilor de comportare mecanică a pământurilor se disting următoarele modele reologice:

- a) Modelele microreologice în care se consideră mediul granular ca un ansamblu de elemente discrete, între care contactele se schimbă în timpul mișcării, considerând fenomenul apropiat de curgerea turbulentă a unui fluid sau cu o mișcare browniană.
- b) Modelele fenomenologice numite de unii autori „tradiționale” [85,100], care consideră pământurile ca materiale omogene, izotrope și monofazice. Proprietățile lor fizico-mecanice sunt caracterizate prin parametri constanți care concretizează comportarea lor elastică, plastică sau vâscoasă. În legile de comportare nu intervin decât componentele tensorilor tensiunilor, deplasărilor și a derivatelor în raport cu timpul, corelate prin relații polinomiale dependente de parametri constanți. Comportarea mecanică a pământului este descrisă de un sistem de ecuații cu derivate parțiale, liniare sau neliniare, în raport cu componentele tensorilor, cu coeficienți constanți, constante în timp.

1.3. Stadiul actual în domeniul compactării prin vibrații

Proctor a propus în 1933 o procedură pentru determinarea densității maxime a solului funcție de conținutul de apă și efortul de compactare [16, 77, 112]. Încercarea Proctor [107] normală se folosește în general pentru stabilirea caracteristicilor de compactare ale terasamentelor fundațiilor cu destinație specială cum sunt cele de la drumuri, căi ferate, aeroporturi, etc. Încercarea Proctor modificată se folosește la stabilirea caracteristicilor de compactare ale straturilor de bază, ale straturilor și substraturilor fundațiilor pentru drumuri sau din pământuri stabilizate mecanic, ale digurilor și barajelor din pământ. Gradul de compactare maxim se obține la umiditatea optimă la care se realizează o anumită densitate aparentă a pământului în stare uscată maximă (Fig. 1.1).

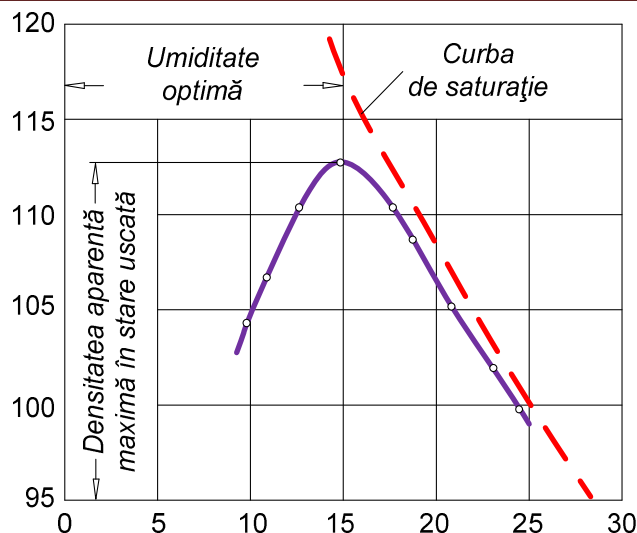


Fig. 1.1 Curba de variație a densității aparente în stare uscată funcție de umiditate [83]

Altfel spus, gradul de compactare reprezintă raportul dintre densitatea aparentă în stare uscată efectivă a terenului și densitatea de referință determinată prin metoda Proctor, în conformitate cu prevederile STAS 1913/13-83.

De-a lungul timpului, numeroși cercetători au corelat metoda de compactare cu principalii parametri care influențează comportamentul la compactarea solurilor precum: conținutul optim de apă, energia de compactare și tipul solului. Influența metodei de compactare utilizată se poate observa în Figura 1.2.

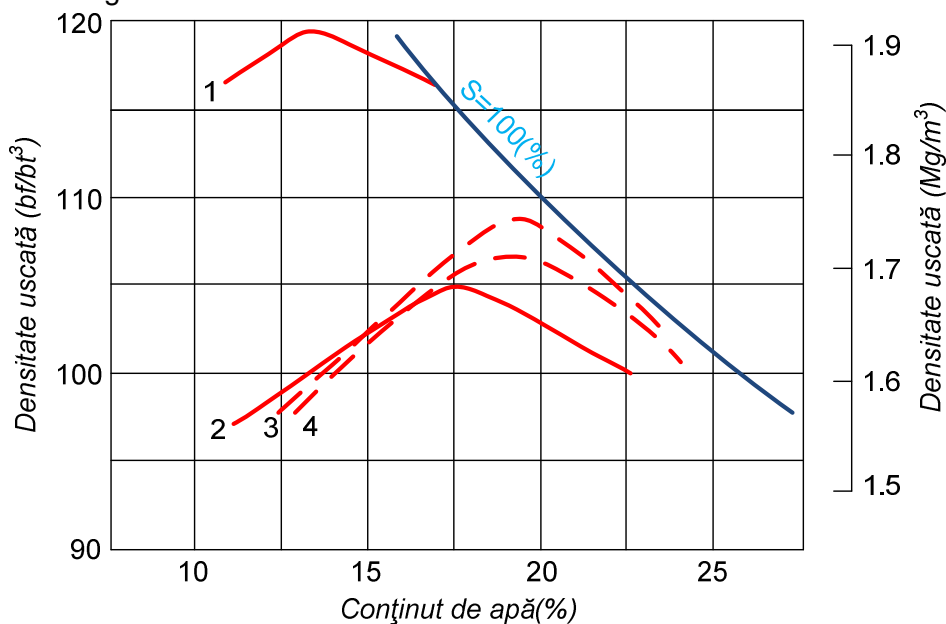


Fig. 1.2 Curbe de compactare obținute astfel [71]:

- 1, 2 - în laborator prin compactare statică (cu forță constantă sau variabilă);
- 3 - pe teren prin compactare cu tren de pneuri după 6 treceri;
- 4 - pe teren prin compactare cu ruloare cu crampe după 6 treceri.

Stabilirea metodei de compactare depinde în principal de tipul de sol și de disponibilitatea echipamentelor aflate pe șantierul de construcții [16, 72]. Nu există reguli fixe pentru selectarea celei mai adecvate metode de compactare, ci doar linii directoare justificate de determinările efectuate „in situ”, pe teren. În literatura de specialitate, sunt recunoscute ca fiind cele mai frecvente metode de compactare folosite în construcții cele care se bazează pe apăsare, frământare, presiune, vibrație și compactare dinamică. Astfel, pentru compactarea terenurilor cu compoziție granulară grosieră se recomandă folosirea forțelor dinamice generate de echipamentele tehnologice prin vibrații sau impact, iar pentru soluri prăfoase utilizarea

rulourilor cu crampoane [112]. Pentru compactarea stratului de bază și a substraturilor din infrastructura fundațiilor de autostrăzi, parcuri, etc. Holtz și alții [72] recomandă folosirea rulourilor vibratoare. Zou și alții [124] pledează pentru utilizarea compactării dinamice a rambleelor rutiere înalte.

Tabelul 1.1 conține o centralizare a recomandărilor privind metodele și echipamentele tehnologice de compactare pentru diferite tipuri de soluri.

Tabelul 1.1 Metodele și echipamentele tehnologice de compactare recomandate de Rollings and Rollings [112]

Sol	Prima alegere	A doua alegere
Umplutură de rocă	Rulou vibrator	Rulou pe pneuri
Soluri plastice	Rulou cu crampoane tip picior de oaie	Compactor pe pneuri
Soluri cu plasticitate mică	Rulou cu crampoane tip picior de oaie	Compactor vibrator mixt
Nisipuri și pietrișuri plastice	Rulou vibrator, compactor cu pneuri	Rulou cu crampoane
Nisipuri și pietrișuri nămoase	Rulou vibrator	Rulou cu crampoane tip picior de oaie, compactor cu pneuri
Nisipuri curate	Rulou vibrator	Compactor cu impact, compactor cu pneuri

Una din variabilele cu control asupra procesului de compactare este conținutul de apă din sol a cărei valoare optimă este stabilită prin testul Proctor. Cu toate acestea, în unele cazuri este recomandat să se realizeze compactarea solurilor prin adăugarea unei cantități de apă peste conținutul optim de apă deoarece acest lucru conferă o gamă mai variată de proprietăți solului și prin apariția fenomenelor de aspirație și de conducție, cum ar fi conductivitatea hidraulică și termică.

Daniel și Benson [54] propun diferite intervale ale conținutului de apă și ale densității în stare uscată a solului compactat astfel încât acesta să fie folosit ca o barieră impermeabilă (cu conductivitate hidraulică scăzută) sau zonele în care solul compactat poate fi folosit ca rambleu în cazul în care este nevoie de compresibilitate redusă și rezistență mare la forfecare. Figura 1.3 prezintă în mod schematic diferitele intervale ale conținutului de apă formate în funcție de proprietățile și aplicațiile solului.

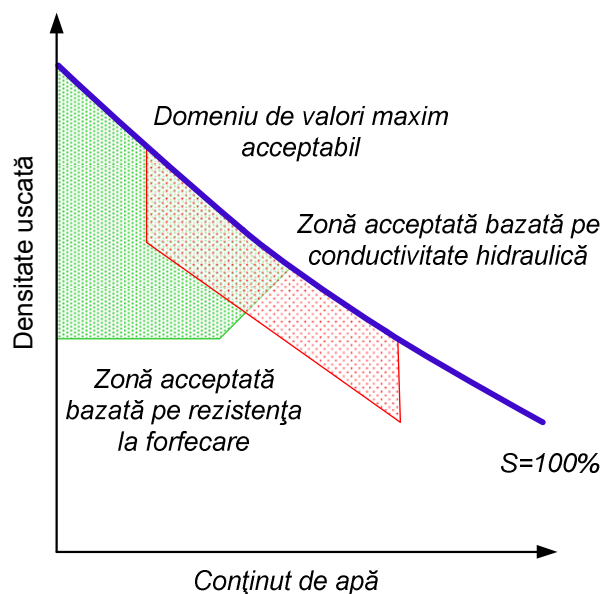


Fig. 1.3 Schema zonelor cu proprietățile solului și aplicabilitatea acestora funcție de conținutul de apă [54]

Proiectarea sistemelor rutiere se face folosind metode empirice bazate pe valorile mici ale efortului de forfecare din sol [117,118]. Figura 1.4 arată modul în care variația efortului de forfecare este influențat de conținutul de apă.

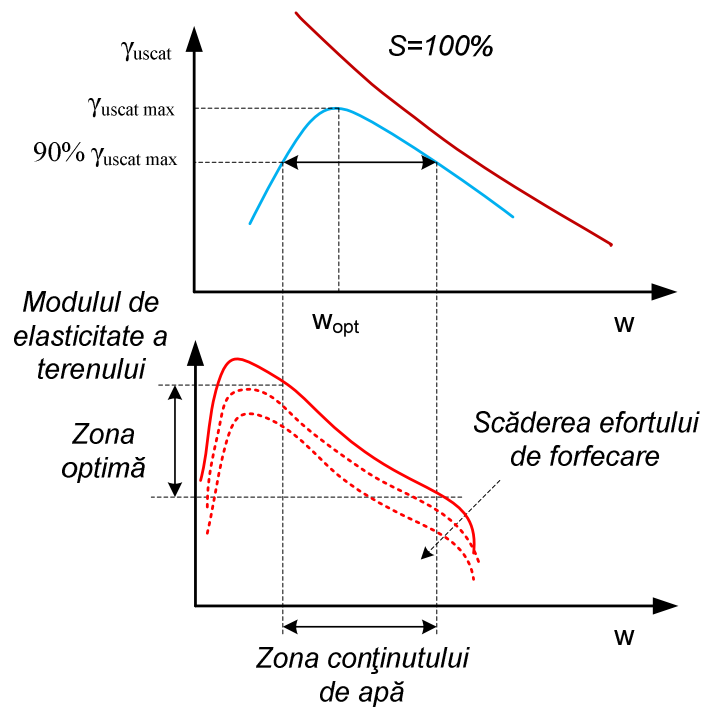


Fig. 1.4 Variația efortului de forfecare funcție de conținutul de apă din sol

Parametrii solului precum densitatea inițială în stare uscată, distribuția granulometrică, forma particulelor și conținutul de apă sunt cei mai importanți factori care oferă informații cu privire la eficacitatea procesului de compactare. Astfel, variate tipuri de soluri au diferite curbe de compactare, după cum se poate observa în Figura 1.5.

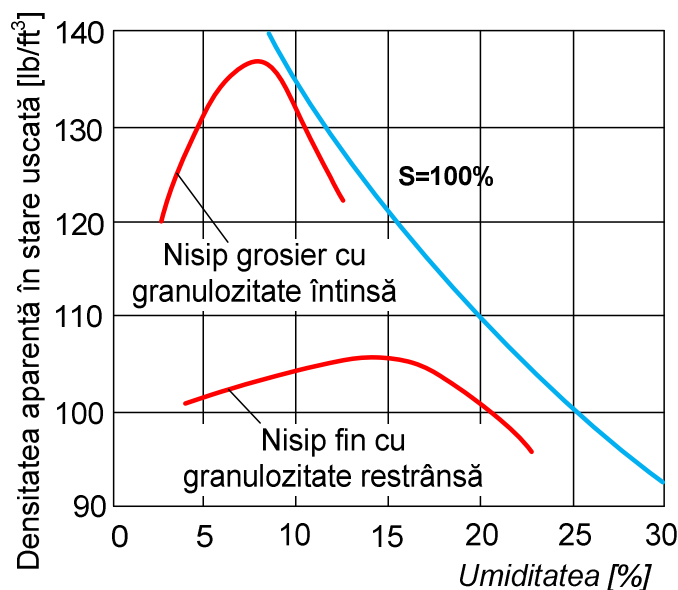


Fig. 1.5 Curbele de compactare pentru diferite tipuri de teren funcție de umiditate [83]

În compactarea dinamică cantitatea de energie aplicată solului precum și gradul de compactare și adâncimea la care se resimte efectul de compactare sunt direct influențate de masa corpului care cade, de forma și de numărul de căderi ale acestuia [124]. Figura 1. 6 arată creșterea gradului de compactare odată cu numărul de lovituri și scăderea acestuia odată cu adâncimea, în cazul căderii unui corp cu masa de 10000 kg, având aria circulară egală cu 4 m², care cade de la o înălțime de 10 m [51].

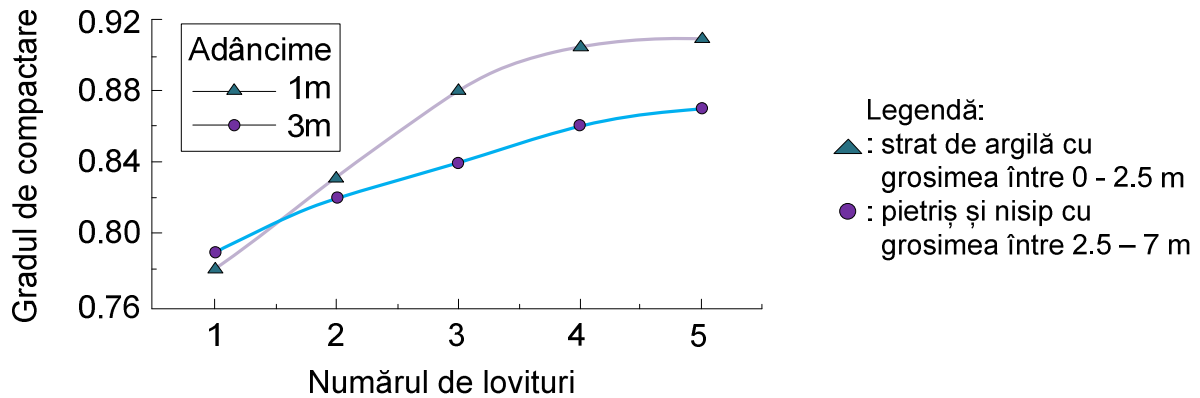


Fig. 1.6 Gradul de compactare funcție de înălțimea de cădere a corpului și numărul de lovituri [51]

Greutatea ruloului, dimensiunea acestuia, numărul trecerilor și frecvența de lucru sunt parametri importanți care depind de echipamentul de compactare utilizat. De altfel, după alegerea metodei și a utilajului de compactat, rezultatul final al procesului de compactare este în principal influențat de procedurile de punere în operă a procesului tehnologic [71, 72].

Când solul este compactat, energia statică sau dinamică a compactorului este transmisă în sol ca o combinație de unde P, S și Rayleigh care se propagă în direcții radiale față de compactor [109]. În timp ce undele se deplasează de compactor, frecarea din interiorul solului scade energia undelor până când se disipă. Când unda interacționează cu solul, aceasta produce comprimarea și distorsiunea particulelor prin rearanjarea acestora având ca efect creșterea densității solului.

Santamarina [113] argumentează (în fig. 1.7*) că mișcarea particulelor pe direcție orizontală este atenuată mai rapid decât a celei pe direcție verticală.

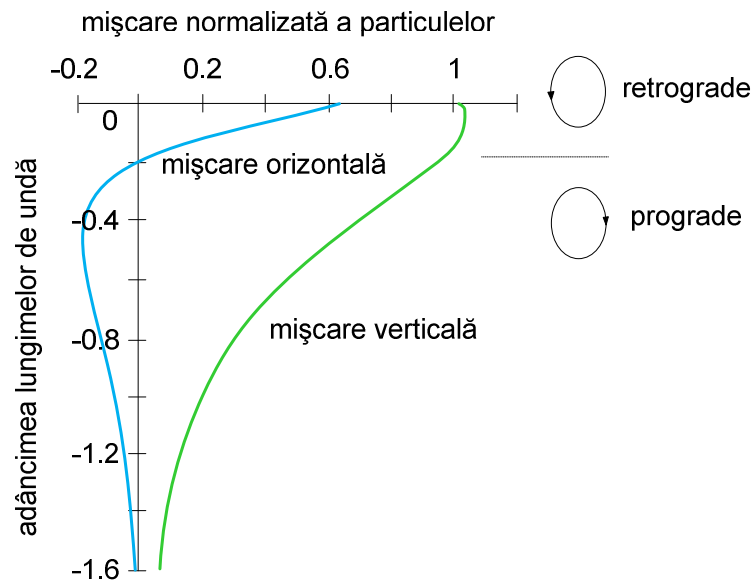


Fig. 1.7*(Fig.1.8) Mișcarea pe direcție orizontală și verticală a particulelor funcție de adâncime

Figura 1.8* arată cum componenta dinamică a forței folosită în cazul materialelor macrogranulare ajută la creșterea densității în stare uscată a solului față de compactarea acestuia fără vibrații care sunt generate de rotația unor mase excentrice montate în interiorul ruloului.

În concluzie, efectul conjugat al factorilor geodinamici ai terenului precum compresibilitatea, elasticitatea, frecarea internă, coeziunea, capacitatea de drenare, etc. conduce la o influență semnificativă a parametrilor procesului de compactare individualizând astfel fiecare tip de teren în parte.

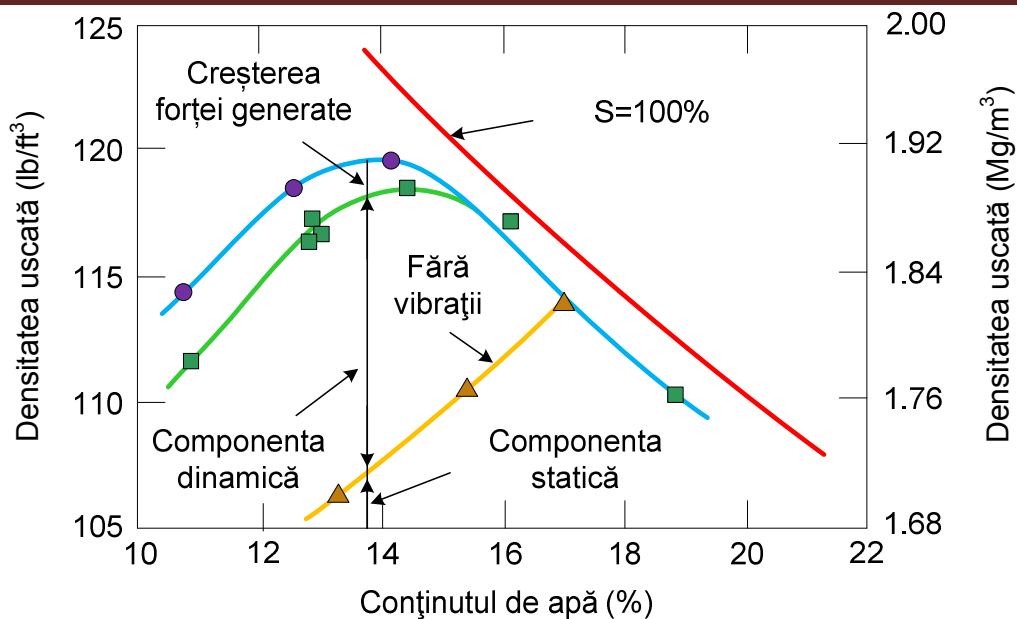


Fig. 1.8* (Fig. 1.9) Curbe de compactare a solului compactat cu și fără efect dinamic [71, 72]

1.4. Monitorizarea inteligentă a procesului de compactare prin vibrare

Monitorizarea inteligentă a compactării este o tehnologie este de ultimă noutate prin care se controlează diferiții parametri ai compactorului în timpul desfășurării procesului tehnologic, precum: amplitudine, frecvență și viteza de lucru (sau chiar și distanța până la care se resimte efectul de compactare).

Firma Bomag din Germania a introdus tehnologia Variocontrol (Figura 1.9*) pe compactoarele vibratoare, care are rolul de a optimiza parametrii tehnologici ai ruloului vibrator în funcție de gradul de compactare al terenului.

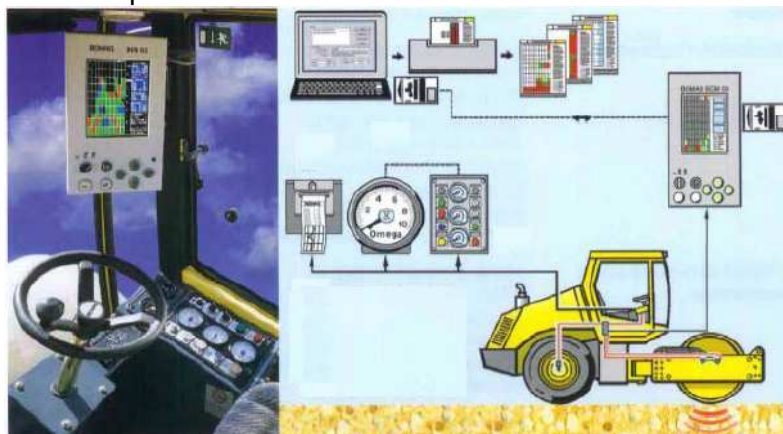


Fig. 1.9* (Fig. 1.10) Sistem inteligent de monitorizare a compactării folosit de Bomag [15], [2]***

Sistemul de monitorizare inteligentă a compactării (*Intelligent Compaction System*) conține o gamă largă de valori ale modului de elasticitate ale pământurilor și reglează în mod automat setările ruloului vibrator al compactorului pentru a realiza modulul impus dacă informațiile preluate „in situ”, nu se găsesc în câmpul de toleranță admis. Prin introducerea noii tehnologii denumită Terrameter, firma BOMAG implementează un nou sistem care monitorizează un alt parametru esențial al procesului de compactare și anume modulul dinamic E_{din} , măsurat în MN/m^2 . În cazul în care valoarea minimă presetată a lui E_{din} este atinsă sistemul Variocontrol scade valoarea forței dinamice de compactare, iar un semnal vizual apare pe ecran și indică sfârșitul compactării. În cazul compactoarelor vibratoare, pentru compactarea straturilor groase ale solurilor moi se utilizează vibrații cu amplitudini mari și frecvențe mici, iar în cazul compactării mixturilor asfaltice se utilizează vibrațiile cu amplitudini mici și frecvențe mari.

Pentru monitorizarea continuă a parametrilor specifici compactării mixturii asfaltice, Bomag a implementat un sistem analog, care se numește Variomatic.

Firma AMMANN din Elveția a implementat un sistem (denumit *AMMANN Compaction Expert – ACE*) care se montează la pupitrul de comandă al compactorului cu rolul de a afișa rigiditatea instantanee a terenului (Figura 1.10*). Astfel, compactorul vibrator realizează un număr de treceri pe teren până în momentul în care se ajunge la valoarea rigidității limită impusă a fi obținută în teren. După ce se atinge la această valoare, compactorul continuă să monitorizeze rigiditatea terenului însă fără să-l mai compacteze

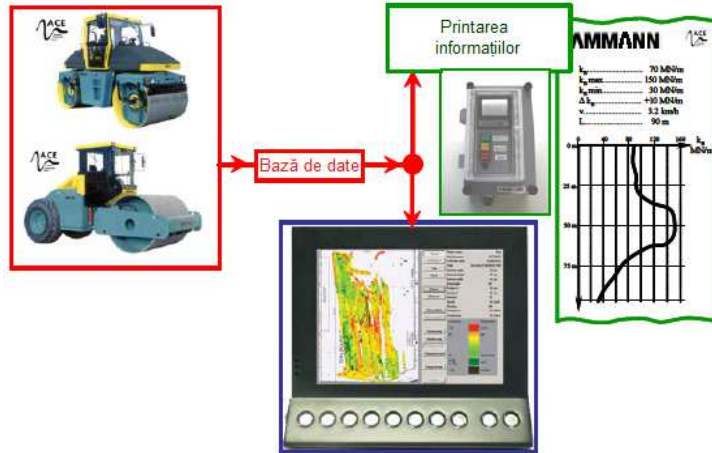


Fig.1.10*(Fig.1.12) Monitorizarea rigidității terenului prin sistemul ACE implementat de firma Ammann [5],[1]***

Firma Geodynamik din Suedia produce un sistem informatic denumit Compactometer utilizat la controlul permanent al compactării (Figura 1.11*). Acesta constă în montarea unui senzor pe cadrul ruloului vibrator al compactorului pentru a măsura accelerațiile vibrațiilor generate. Valorile înregistrate ale acestui parametru sunt variabile și cresc pe măsură ce terenul devine mai rigid (mai compactat). Un senzor montat pe lagărul tambur măsoară continuu accelerații când tamburul vibratoare este în funcțiune. Semnalele măsurate astfel sunt apoi convertite într-o mărime care indică valoarea relativă a capacității portante a terenului (denumită CMV). Toate informațiile culese in situ sunt păstrate și prelucrate de un sistem informatic (*Compaction Documentation System*), iar pe un display montat la bordul pupitrului de comandă al compactorului sunt afișate pe zone din teren valorile gradului de compactare obținut. În felul acesta, operatorul deservent al utilajului cunoaște câte treceri mai are de realizat și unde sunt zonele în care gradul de compactare este mai mic decât cel indicat a fi atins prin documentația tehnică a lucrării de terasamente.

În cazul compactării mixturii asfaltice există sisteme informatice speciale (*Continuous Asphalt Compaction – CAC* și *Asphalt Compaction Documentation System - ACD*) care realizează același lucru ca și în cazul compactării pământului.

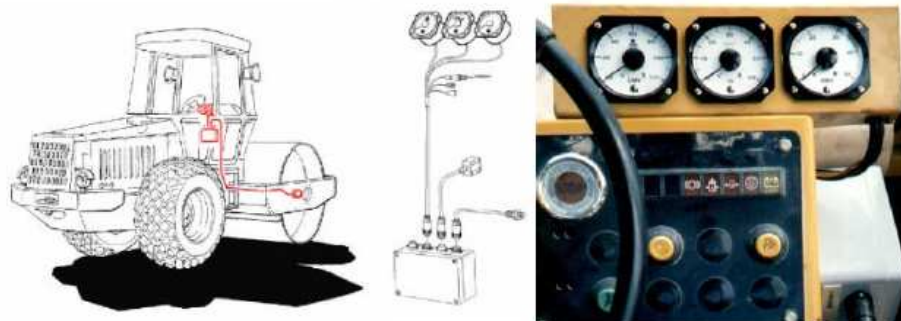


Fig. 1.11*(Fig.1.13) Monitorizarea accelerației pe verticală a ruloului cu compactometrul [4]***

Compactarea inteligentă oferă o evaluare instantanee și completă a terenului în timp ce acesta este compactat. Acest sistem informatic de monitorizare prezintă avantajul remedierii compactării în zonele unde gradul de compactare este inferior celui limită impus, evitându-se în consecință supra-compactarea terenului. De asemenea, se reduce numărul de treceri al utilajului, numărul de teste in situ și se cunoaște permanent valoarea modulului solului în toate

zonele pe unde a trecut compactorul, rezultând în final un strat uniform compactat. Singurul dezavantaj al acestui sistem este prețul acestuia. Începând cu sfârșitul anilor șaptezeci, introducerea acestui proces de monitorizare a compactării a luat amploare în întreaga Europă.

1.5. Oportunitatea și obiectivele tezei

Oportunitatea acestei teze de doctorat este justificată prin următoarele elemente:

- cerința permanentă referitoare la creșterea nivelului de performanță al echipamentelor tehnologice în general și a celor din domeniul construcțiilor în special;
- cercetarea permanentă în domeniu, dezvoltarea continuă a unor utilaje și echipamente tehnologice specifice prin înglobarea unor sisteme inovative cu impact asupra creșterii eficienței energetice și a capacității tehnologice;
- reglementările normative din România cu privire la indicatorii de performanță impuși parametrilor operaționali esențiali care trebuie să caracterizeze, la nivel global, gradul de performanță a lucrărilor de compactare realizate;
- automatizarea pe scară cât mai largă a proceselor tehnologice, prin utilizarea unor tehnici avansate și a unor metode moderne care prin implementare asigură suport decizional în condiții de independență față de intervenția operatorului deservent al utilajului.

Analiza critică a stadiului actual în domeniul utilizării vibrațiilor pentru optimizarea procesului tehnologic de compactare împreună cu elementele de oportunitate enunțate anterior relevă și susțin **necesitatea** acestei teze de doctorat.

În baza analizei de oportunitate și a cerințelor care fundamentează necesitatea acestor cercetări, **scopul** acestei teze de doctorat rezultă din exprimarea sintetică după cum urmează: *„Evaluarea instrumentală și informatică a legităților structurale și funcționale care guvernează interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul compactat în scopul elaborării unui set de modele aplicative care să asigure interfața mașină – proces tehnologic prin monitorizarea și controlul parametrilor funcționali și menținerea acestora în zona de optim”.*

Ținând cont de necesitatea și de oportunitatea acestei teze de doctorat, pentru îndeplinirea scopului enunțat anterior se propun următoarele **obiective principale** ce vor fi urmărite pe tot parcursul cercetărilor și anume:

- evaluarea multicriterială a nivelului actual ale cercetărilor în domeniu pe baza analizei critice a realizărilor relevante atât pe plan național, cât și la nivel internațional;
- stabilirea setului de elemente reologice care să contituie baza teoretică pentru dezvoltarea și fundamentarea modelelor finale, cu rol aplicativ, ținând cont de caracteristicile elastice și disipative ale mediilor analizate și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat;
- analiza comparativă a comportării atât în regim static, cât în special în regim dinamic a modelelor reologice în scopul identificării și evidențierii elementelor de specificitate privind capacitatea acestora de a simula intimitatea (profundzimea) fenomenologică a interacțiunii organ de lucru – material procesat;
- asamblarea la nivel teoretic a setului de modele de interfață, prin compunerea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu urmărirea, în scopul optimizării, a următorilor parametri esențiali: complexitatea structurală versus fidelitatea simulării, nivelul de detaliere versus disponibilitatea de rezolvare (calculabilitate numerică);
- elaborarea unui set de teste instrumentale „in situ” completate cu o serie de încercări experimentale de laborator care, pe baza unui plan sistemic de analiză multi-corelativă, să asigure baza de date pentru procesul de armonizare comportamentală și acordare parametrică a modelelor matematice/numerice cu realitatea identificabilă și măsurabilă;
- stabilirea configurației finale, acordarea caracteristicilor de lucru și validarea setului de modele de interfață cu evaluarea nivelului de performanță obținut.

CAPITOLUL II

VARIETATEA CONSTRUCTIVĂ, FUNCȚIONALĂ ȘI TEHNOLOGICĂ A RULOUIRILOR VIBRATOARE PENTRU COMPACTAREA STRATURILOR RUTIERE

2.1 Generalități

Compactarea reprezintă operația de îndesare a pământului (sau a oricarui material de umplură), ca rezultat al acțiunii echipamentelor tehnologice. Astfel, prin aplicarea succesivă a unor forțe de compresiune sau a unor sarcini dinamice pe suprafața terenurilor de fundație sau a straturilor puse în operă în lucrările de terasamente, care are drept scop redistribuirea particulelor solide prin eliminarea parțială a aerului și apei din structura internă a terenului. Funcție de felul în care este aplicată sarcina de compactare asupra terenului se deosebesc următoarele metode de compactare: statică și dinamică. În unele situații aceste metode pot fi combinate între ele. În figura 2.1 sunt prezentate o gamă variată de utilaje de compactare care nu folosesc vibrațiile în procesul de lucru.



Fig. 2.1 Exemple de utilaje care realizează compactarea prin acțiune statică asupra terenului

Compactarea dinamică reprezintă o metodă mult mai eficientă și are o gamă largă de aplicabilitate. Aceasta constă în transmiterea vibrațiilor în stratul de pământ supus compactării, provocând o deplasare relativă a particulelor și o reaşezare mai compactă a lor. Compactarea prin vibrație dă rezultate foarte bune în cazul unor materiale neomogene și necoezive (nisipuri, pietrișuri, bolovănișuri, anrocamente) sau slab coezive. Prin vibrații repetate, granulele de material sunt puse în mișcare de forțe de inerție proporționale cu masele lor, reducându-se frecarea dintre acestea, ceea ce permite o aşezare mai densă pe măsura micșorării golurilor.

Pe baza analizei caracteristicilor tehnice ale compactoarelor vibratoare produse atât în țară, cât și pe plan mondial, se deosebesc câteva clase constructive, în principal, după tehnologia de lucru și natura terenului, astfel:

- a) compactoare vibratoare tractate;
- b) compactoare vibratoare autopropulsate, cu șasiu monobloc (nearticulat) și două rulouri netede. Vibrarea se realizează fie cu un singur rulou, fie pe ambele rulouri, iar tracțiunea cu un singur rulou, sau totală, pe ambele rulouri;
- c) compactoare vibratoare autopropulsate cu două rulouri profilate cu șasiu articulat. Vibrarea se realizează pe ambele rulouri sau numai pe unul singur, iar tracțiunea pe ambele rulouri;
- d) compactoare vibratoare autopropulsate cu două rulouri netede și șasiu articulat. Vibrarea se realizează fie cu un singur rulou, fie pe ambele rulouri, iar tracțiunea pe un singur rulou sau pe ambele rulouri;
- e) compactoare vibratoare autopropulsate mixte cu șasiu articulat. Vibrarea se realizează cu un rulou amplasat în față, iar tracțiunea pe două sau patru pneuri plasate în spate. Sunt utilizate și sisteme cu tracțiune totală simultan pe rulou și pneuri.

În paragrafele care urmează vor fi detaliate informații cu privire la fiecare tip de compactor autopropulsat (cu un rulou vibrator și cu două rulouri vibratoare).

2.2 Compactoare autopropulsate cu un singur rulo vibrator

Principalele elemente constructive care se reflectă în funcționalitatea unui compactor vibrator se regăsesc în subsamblăe vitale ca: sistemul de vibrare, sistemul de deplasare, sistemul de izolare și amortizare a vibrațiilor, structura metalică, sistemul de acționare.

Cu ajutorul compactoarelor autopropulsate cu un singur rulo vibrator se poate realiza compactarea unei game variată de pământ. Cele mai reprezentative exemple constructive de rulouri vibratoare sunt date în Figura 2.2.



Fig. 2.2 Utilaje de compactare autopropulsate cu un singur rulo vibrator:[2]***
a) rulo vibrator neted; b) rulo vibrator profilat (cu cramioane).

În cazul compactoarelor cu rulo vibrator profilat, dimensiunile proeminențelor (cramoanelor) sunt corelate cu tipul de pământ ce trebuie compactat. Astfel, pentru pământuri argiloase suprafața laterală a unui crampon trebuie să fie de 30-40 cm², iar pentru nisipuri, de 40-65 cm². Compactării prin vibrare îi este specific un parametru denumit coeficientul de vibro-îndesare care este influențat de umiditate și de compoziția granulometrică, îndesarea maximă realizându-se atunci când umiditatea are valoarea $w=1-1,2 \times w_{opt}$. La umidități reprezentând $0,7w$ eficacitatea compactării prin vibrare este redusă. Efectul compactării prin vibrare scade totodată cu creșterea conținutului de argilă.

2.3 Compactoare autopropulsate cu două rulouri vibratoare

Cilindrii compactori vibrator tandem (Figura 2.3) au o largă utilizare în toate tipurile de lucrări și în special în cele de punere în operă a mixturilor asfaltice, unde realizează o mare productivitate și o bună calitate a lucrărilor executate.



Fig. 2.3 Utilaje de compactare cu două rulouri vibratoare
a) model Caterpillar; b) model Bomag; c) model Hamm; d) model Ammann.

Acest tip de utilaje sunt dotate cu ambele rulouri vibratoare cu posibilitatea modificării frecvenței vibrațiilor în corelație cu tipul de teren ce necesită compactarea.

Soluțiile constructive adoptate la nivelul tehnologiei de vârf se caracterizează prin:

- transmisie integrală hidrostatică, în circuit închis, cu turație variabilă continuu;
- șasiu articulat, direcție hidrostatică integrală față-spate;
- vibrații acționate hidrostatic în circuit închis, integral față-spate, cu trei trepte de amplitudine și două trepte de frecvență;

- control automat al frecvenței, vitezei de deplasare, comenzii vibratorului și determinării efectului de compactare;
- echipament și dotări auxiliare: rulou față secționat (compus din două semirulouri), dispozitiv de tăiere-teșire a marginilor, post comandă rotativ și deplasabil pe direcție transversală cu axa principală a mașinii.

Vibrogeneratoarele concepute și construite de firma Hamm generează oscilații pe orizontală, care determină o alură a diagramei accelerației (Figura 2.4), îmbunătățind considerabil efectul de compactare (Figura 2.5), față de cazul vibrații [84].

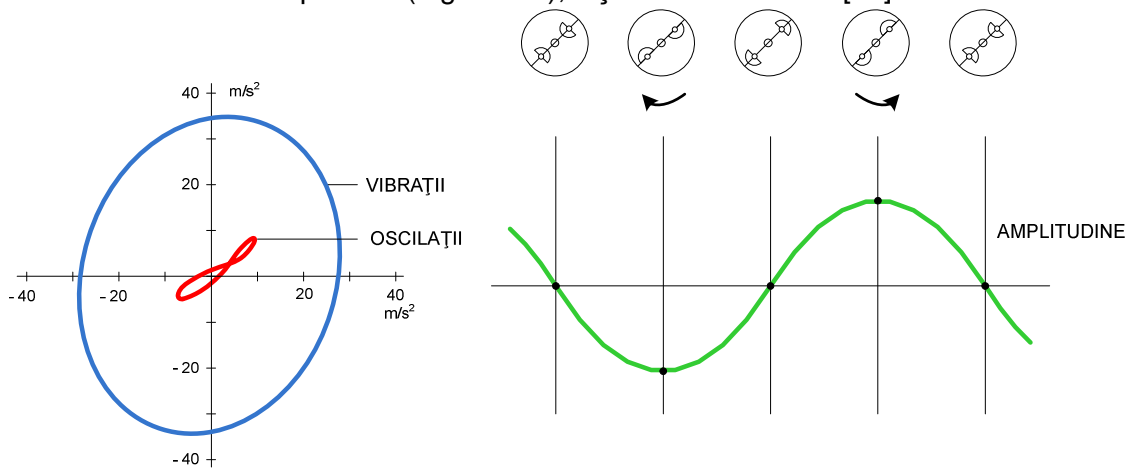


Fig. 2.4 Oscilațiile produse de vibrogeneratoarele concepute de firma Hamm [84]

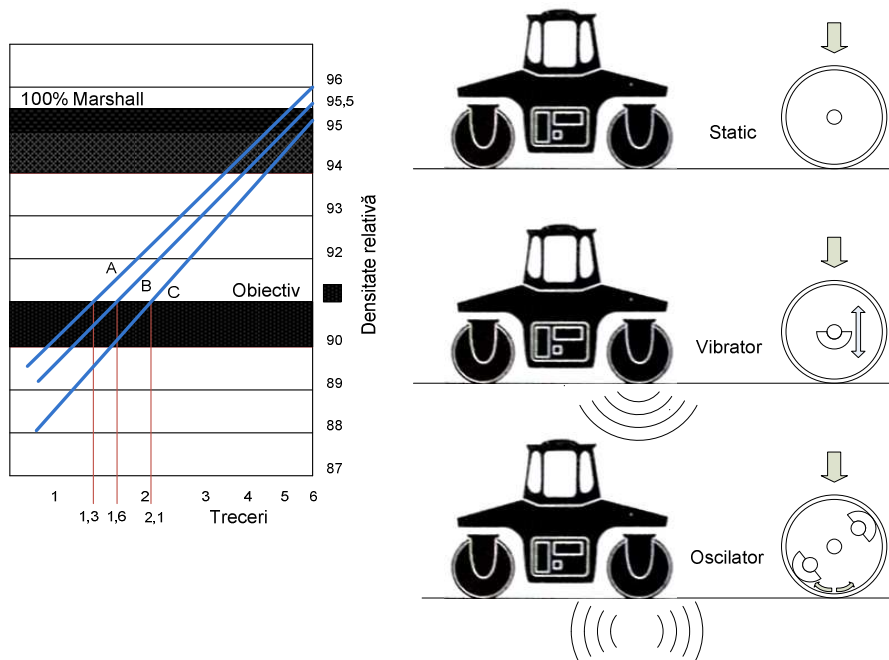


Fig. 2.5 Influența oscilațiilor asupra efectului de compactare [84]

Aceste oscilații sunt generate de oscilația cilindrului în raport cu axa de rotație. Pentru aceste echipamente tehnologice de compactare prin vibrații, problema cea mai importantă impusă inginerului specializat în acționări hidraulice este asigurarea parametrilor necesari pentru obținerea unui anumit regim de vibrații tehnologice care să permită efectuarea unei lucrări la care regimul de vibrații să asigure condițiile tehnologice necesare procesului de compactare a pământurilor [10, 11].

În primele soluții de acționare utilizate pentru vibratoarele de mică putere predominau acționările cu pompe cu cilindree fixă, reglarea regimurilor de lucru cu reglatoare de debit rezistive și amplitudinea forțelor perturbatoare între 30 - 100 kN cu frecvențe între 30-60 Hz. Cea mai simplă soluție utilizată efectiv pe rulouri compactoare este cea fără nici un reglaj concret de debit sau cu reglare rezistivă a debitului pe distribuitorul de cuplare a vibratorului.

2.4 Caracteristici dinamice pentru compactoare vibratoare

Principalii parametri tehnologici care influențează caracteristicile dinamice și de vibrații ale utilajelor de compactare prin vibrare vor fi prezentați succint în continuare.

a) *Frecvența vibrațiilor* este factorul primar care se stabilește atât funcție de tehnologia de compactare, cât și funcție de implicațiile funcționale și constructive ale utilajului. În tabelul 2.1 se prezintă valorile recomandate ale frecvenței vibrațiilor funcție de natura terenului.

Tabelul 2.1 Valorile recomandate pentru frecvența vibrațiilor la utilajele de compactat

Nr. crt.	Natura terenului	Frecvența vibrațiilor, în Hz
1	Pământuri necoezive	25 ~ 35
2	Pământuri coezive	20 ~ 30
3	Mixturi asfaltice	35 ~ 50
4	Beton proaspăt	45 ~ 70

Regimul vibrațiilor tehnologice este caracterizat prin trepte dinamice stabile, cu funcționarea rulourilor vibratoare în postrezonanță (Figura. 2.6*) astfel încât $f/f_0=3...6$, iar $A_j=(m_0r)_j/m_1$, $j=1,2,...$

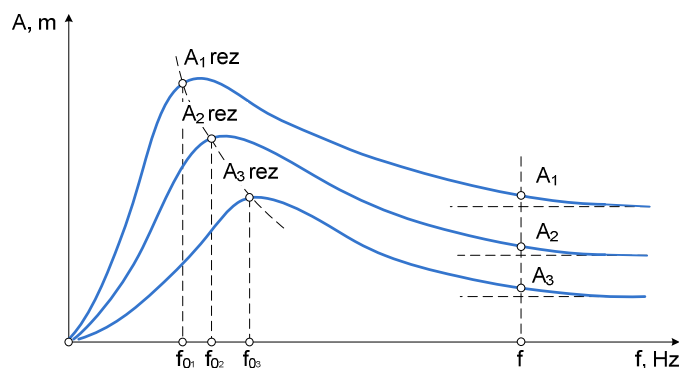


Fig.2.6*(Fig.2.8) Regimul vibrațiilor tehnologice

b) *Amplitudinea vibrațiilor* este factorul care influențează adâncimea de compactare. Pentru diversele categorii de pământ se recomandă valorile date în tabelul 2.2.

Tabelul 2.2 Valorile recomandate pentru amplitudinea vibrațiilor de lucru la compactoare

Nr. crt.	Natura terenului	Amplitudinea vibrațiilor, în mm
1	Pământuri necoezive	0,3 ~ 0,8
2	Pământuri coezive	1,5 ~ 5,0
3	Mixturi asfaltice (la cald)	0,25 ~ 0,40
4	Straturi de rezistență stabilizate cu bitum	0,50 ~ 0,65
5	Straturi de rezistență stabilizate cu ciment	0,30 ~ 0,60

c) *Accelerația vibrațiilor*. Pentru vibrații armonice, accelerația maximă a organului de compactare, dată de relația $A\omega^2$, are o influență decisivă asupra modificării porozității. Astfel, dacă se modifică atât amplitudinea cât și pulsația vibrațiilor așa încât accelerația să se mențină constantă, se va obține aceeași porozitate la aceeași durată de vibrare. Aceasta arată că indiferent de valoarea separată pentru amplitudine sau frecvență, gradul de porozitate scade odată, cu creșterea accelerației sau a raportului $\Gamma = A\omega^2/g$. În Figura 2.7* este ilustrată variația porozității funcție de raportul accelerațiilor Γ pentru trei pământuri de aceeași natură dar cu granulometrii diferite. Se constată că de la valoarea $\Gamma = 5 ... 7$ în sus, gradul de porozitate se menține constant.

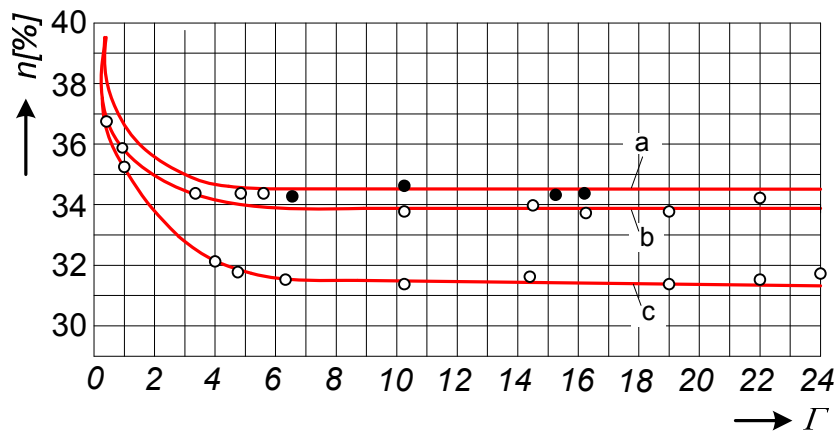


Fig.2.7*(Fig.2.9) Variația porozității funcție de raportul accelerațiilor și granulozitatea pământului a, b, c.

d) *Forța perturbatoare* constituie factorul dinamic fundamental, pentru un utilaj de compactare prin vibrație, deoarece pe de-o parte aceasta determină mărimea amplitudinii, iar pe de altă parte, presiunea dinamică în sol și regimul de compactare (vibrații sau vibropercuții) la zona de contact dintre ruloul vibrator și mediul de compactat.

Viteza de deplasare și numărul de treceri constituie parametri tehnologici cu ponderea cea mai mare în determinarea productivității. Acești parametri sunt stabiliți funcție de natura materialului de compactat, gradul de compactare și tipul utilajului. Astfel, pentru utilajele cu un singur rulou vibrator se recomandă o viteză de lucru cuprinsă în intervalul (1,2 — 3) km/h, iar pentru utilajele cu ambele ruloare vibratoare viteza este cuprinsă între 3 km/h și 6 km/h.

Momentul static al maselor excentrice din sistemul de generare al vibrațiilor constituie caracteristica fundamentală funcțională a vibroexcitatorului inerțial, care determină mărimea forței perturbatoare și a amplitudinii deplasării ruloului vibrator.

Turația maselor excentrice este realizată fie pe cale mecanică (la utilaje mai vechi care au transmisii cu lanțuri, curele, axe), fie hidrostatic (la utilajele moderne). Acest parametru funcțional determină atât forța perturbatoare, cât și frecvența vibrațiilor de lucru.

Turația organelor de deplasare și tracțiune este determinată direct de debitul livrat de pompă și capacitatea specifică (cilindreea) a motorului hidrostatic. Se menționează că viteza de deplasare a utilajului este afectată de alunecarea organelor de deplasare pe teren care trebuie compensată printr-un spor de turație.

Forța de tracțiune constituie un indicator privind modul de realizare a parametrilor tehnici și menținerea acestora în timpul exploatarei la toate subsamblele componente ale sistemului de deplasare. Pentru a mări capacitatea de trecere prin forța de tracțiune ridicată, compactoarele sunt concepute cu tracțiune totală pe ambele axe (față/spate) ale mașinii.

2.5 Capabilitatea tehnologică a echipamentelor de compactare

Capabilitatea tehnologică a echipamentelor de compactare reprezintă nivelul de performanță tehnică caracterizat de parametri constructivi și funcționali care au rol determinant în calitatea și eficiența procesului de compactare. Astfel, capabilitatea tehnologică poate fi caracterizată prin nivelurile de performanță ale următorilor parametri:

- Parametri constructivi: diametrul ruloului/pneului; lățimea ruloului/pneului; distanța dintre axe (ampatamentul); razele de viraj; garda la sol; dimensiunile de gabarit (lungime, lățime, înălțime); suprafața; greutatea totală; greutatea repartizată la nivelul suprafeței de sprijin pe organele de compactare și/sau rulare (sprijinire/deplasare).
- Parametri funcționali: încărcarea statică liniară la contactul rulou-suprafață de compactare; factorul de apăsare tehnologică (factorul Nijboer); viteza de deplasare în timpul compactării; regimul vibrațiilor tehnologice.
- Parametri capacității de lucru: realizarea parametrilor geometrici, a parametrilor de finisare și a productivității.

CAPITOLUL III

MODELE DINAMICE STRUCTURALE PENTRU COMPACTOARE VIBRATOARE

3.1. Generalități

În general, un sistem mecanic este alcătuit dintr-un ansamblu de elemente rigide și/sau elastice prin intermediul cărora se realizează mișcări relative între legăturile elementelor componente. Sistemele mecanice au în componența sa elemente de mișcare și articulații. Rolul articulațiilor este acela de a realiza posibilitatea mișcării elementelor sau de a impune restricții sau constrângeri ale mișcărilor relative ale elementelor componente ale sistemului mecanic. Analiza unui sistem mecanic se face sub următoarele trei aspecte: structural, cinematic și dinamic. Prin analiza structurală a unui sistem mecanic se urmărește identificarea dimensiunilor și modul de dispunere al elementelor sistemului în raport cu funcția impusă acestuia. Analiza cinematică cuprinde studiul mișcării fiecărui element component al sistemului mecanic considerat fiind necesară cunoașterea în orice moment de timp a valorilor și orientărilor vectorilor de poziție, viteză, accelerație, fără a ține seama de cauzele care produc mișcarea. La rândul ei, analiza dinamică cuprinde studiul mișcării elementelor sistemului mecanic sub acțiunea forțelor exterioare aplicate, prin luarea în considerare și a forțelor și momentelor de inerție care apar ca efect al mișcării sistemului. Finalitatea acestui studiu constă în determinarea forțelor și deformațiilor care apar în elementele componente ale sistemului mecanic în timpul mișcării sale [64].

Prin modelarea unui sistem mecanic se înțelege descrierea matematică a comportamentului sistemului, ordinea firească fiind cea prezentată mai jos.

Fenomen real ingineresc FRI

Model fizic MF

Model matematic MM

Analiza MM

Prin calculul dinamic al unui sistem mecanic se înțelege determinarea răspunsului acestuia la acțiunea unor deplasări sau sarcini impuse, care sunt variabile în timp, numite excitații sau perturbații [19]. Răspunsul sistemului este influențat, pe de o parte, de caracteristicile mecanice ale sale și, pe de altă parte, de parametrii excitației. În general, problemele de dinamica sistemelor constau în stabilirea relațiilor dintre excitație, caracteristicile dinamice ale sistemului mecanic analizat și răspunsul acestuia [78].

Pentru început, se scrie ecuația de mișcare a sistemului mecanic sub următoarea formă

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (3.1)$$

unde: $[M]$ este matricea masei; $[C]$ - matricea de amortizare vâscoasă (de obicei semipozitivă, constantă și simetrică); $[K]$ - matricea de rigiditate (semipozitivă și simetrică); $\{u\}, \{\dot{u}\}, \{\ddot{u}\}$ - vectorul deplasărilor, vitezelor, accelerațiilor modale; $\{F(t)\}$ - vectorul excitațiilor sau încărcărilor modale; t - variabila timp.

Problemele de dinamica sistemelor se împart după modul de abordare în: directe și inverse [30]. Problema directă este cea în care se știu ecuațiile care descriu comportarea dinamică a sistemului, se cunoaște excitația și se cere răspunsul acestuia. Problema inversă are două variante:

- când este cunoscut răspunsul sistemului la o excitație dată și nu se cunosc ecuațiile de mișcare, configurația sistemului sau unii parametri specifici ai acestuia;
- când se știe sistemul și răspunsul acestuia, dar nu se cunoaște excitația.

În acest capitol al tezei de doctorat autorul abordează studiul comportării dinamice al unui compactor vibrator folosind problema directă aplicată pe modele cu 1, 2 și 3 grade de libertate, cu variație neliniară a parametrilor specifici procesului de compactare.

3.2. Modelul cu un singur grad de libertate al compactorului vibrator

Cel mai simplu model dinamic pentru modelarea comportării dinamice a unui compactor cu un rulou vibrator este cel cu un grad de libertate concretizat în deplasarea ruloului vibrator pe direcție verticală, notată cu x_1 , așa cum este ilustrat în Figura 3.1.

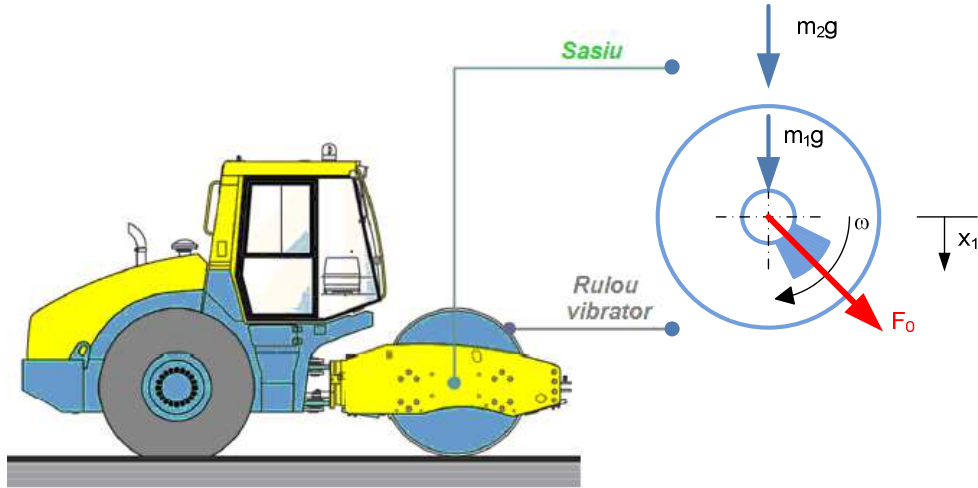


Fig. 3.1. Modelul cu un singur grad de libertate al unui compactor

Notațiile modelului din fig. 3.1 sunt: m_1 este masa ruloului vibrator; m_2 – masa șasiului mașinii; m_0r – momentul static al pieselor excentrice; ω – pulsația forței de excitație; x_1 – deplasarea pe verticală a ruloului.

3.3. Modelul cu două grade de libertate al unui compactor vibrator

Modelul de calcul pentru determinarea parametrilor dinamici la compactoarele vibratoare tractate este prezentat în Figura 3.2 [23, 36].

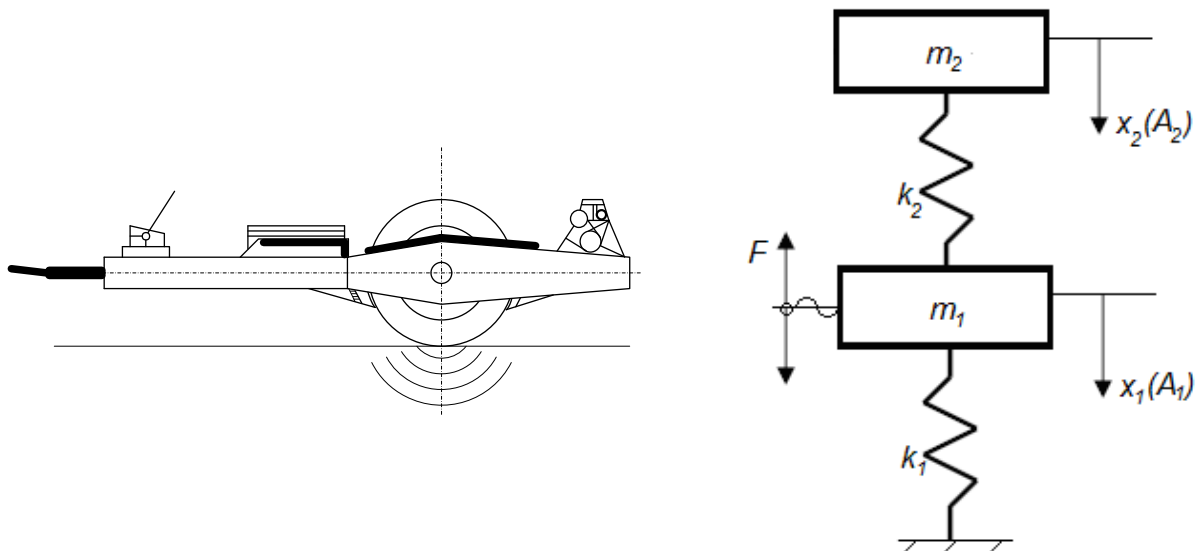


Fig. 3.2. Modelul cu două grade de libertate al unui compactor [83]

Pentru funcționarea în postrezonanță a utilajului se impune realizarea următoarei corelații între pulsații: $p_2 = \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{6}\right) \omega$. Valoarea calculată a amplitudinii ruloului vibrator se compară cu valorile din tabelul 2.2 din cap.2 al tezei, iar pentru amplitudinea șasiului se impune îndeplinirea următoarei condiții: $A_2 \leq (0,05 \div 0,10)A_1$.

3.4. Modele cu trei grade de libertate ale compactoarelor vibratoare

Se consideră structura constructivă și funcțională a unui compactor vibrator autopropulsat, cu o singură treaptă elastică și un singur rulou vibrator, conform Figura 3.3. Ruloul vibrator (1) de masă m_1 este legat elastic prin sistemul (4) de șasiul (2) al mașinii de compactat, având ruloul de tracțiune (3) de masă m'_3 articulat de șasiu. Forța perturbatoare este de forma $F = m_0 \omega^2 \sin \omega t$.

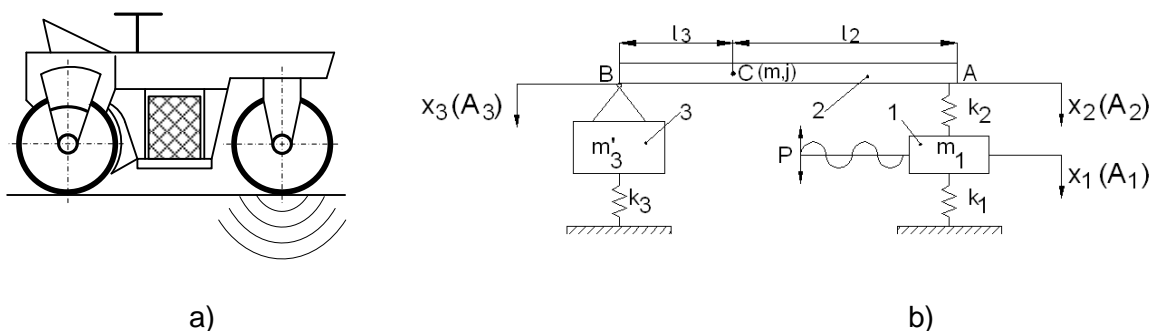


Fig. 3.3 Modelul cu trei grade de libertate al unui compactor vibrator autopropulsat cu o singură treaptă elastică și un singur rulou vibrator [83]
a) schematizare generală; b) modelul dinamic de calcul.

Modelul dinamic al compactorului este compus din elementele elastice k_1 și k_3 ce modelează terenul de compactat, k_2 ce caracterizează rigiditatea sistemului elastic de izolare a vibrațiilor transmise de la ruloul vibrator la șasiu, masa m_1 a ruloului vibrator, masa m și momentul de inerție masic J față de axa transversală care trece normal prin centrul de masă al șasiului (ambele fiind ale șasiului mașinii) și masa m'_3 a ruloului de tracțiune amplasat în spate.

Un alt tip constructiv de compactor este cel care are două trepte elastice și un singur rulou vibrator, așa cum este prezentat din Figura 3.4*.

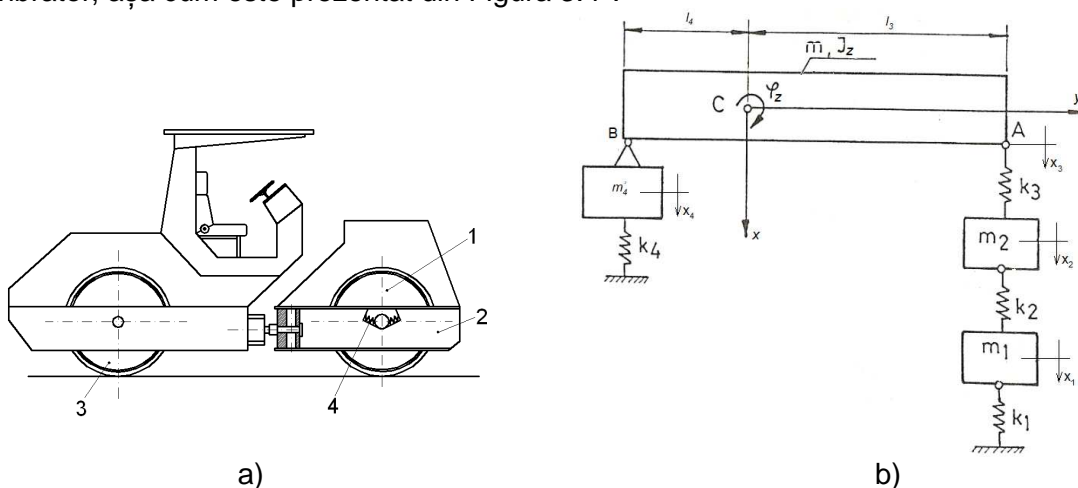


Fig.3.4*(Fig.3.7) Modelul cu trei grade de libertate al unui compactor vibrator autopropulsat cu două trepte elastice și un singur rulou vibrator [83]
a) schematizare generală; b) modelul dinamic de calcul.

În fig. 3.4* notațiile au semnificațiile: m_1 este masa ruloului vibrator; m_2 – masa șasiului anterior; m'_3 - masa ruloului din spate nevibrator; m_3 , m_2 și m_{23} – masele reduse ale părților vibratoare ale utilajului.

În continuare se abordează modelarea unui alt model constructiv de compactor vibrator autopropulsat care este ilustrat schematic în Figura 3.5*, având următoarea componență: rulou vibrator (1) cu masa m_1 , șasiu anterior (2) cu masa m_2 , sistem elastic (3), legătura elastică (4), șasiu posterior (5) cu masa m și moment de inerție J și rulou de tracțiune (6).

Datorită simetriei construcției față de planul longitudinal median, utilajul poate fi modelat ca un sistem de corpuri rigide legate elastic, toate dispuse într-un singur plan [18, 20, 21].

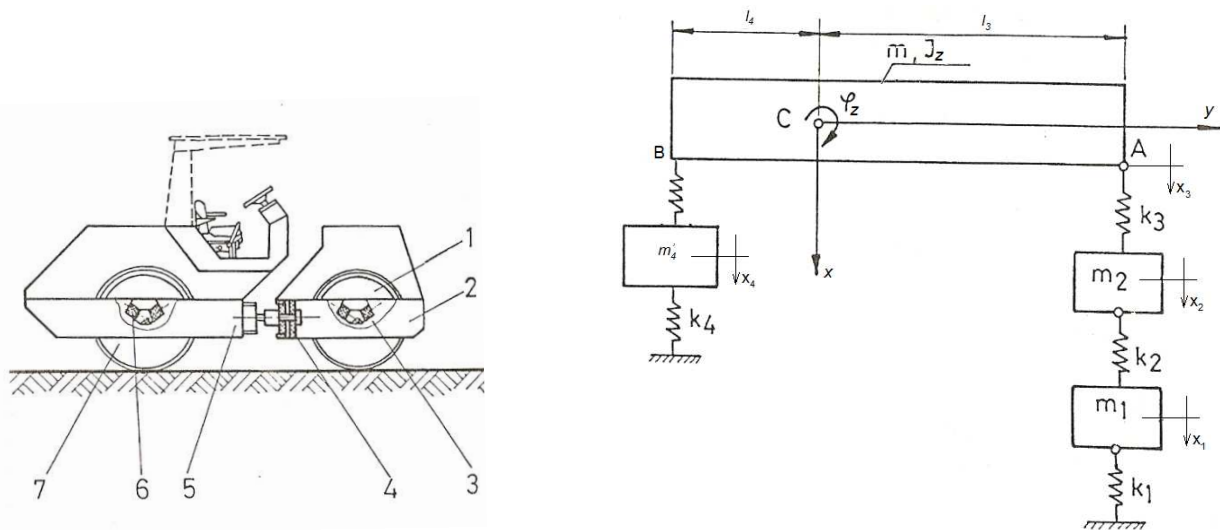


Fig. 3.5* (Fig. 3.8) Modelul cu trei grade de libertate al unui compactor vibrator autopropulsat cu două trepte elastice de izolare și cu ambele rulouri vibratoare
a) schematizare generală; b) modelul dinamic de calcul.

3.5. Concluzii parțiale

În cazul sistemelor cu mai multe grade de libertate, stabilitatea ecuațiilor diferențiale de mișcare pentru un rigid sau mai multe rigide legate elastic prezintă dificultăți deosebite. Din acest motiv s-a recurs la modalitatea de a determina deplasările instantanee ale punctelor rigidelor, în care se află prinse capetele elementelor elastice, cu ajutorul cărora se determină deformațiile acestora.

Pentru exemplificare au fost prezentate câteva cazuri concrete de mașini la care s-au stabilit ecuațiile diferențiale pe baza exprimării, fără dificultate, a energiei potențiale și energiei cinetice. Deși fiecare caz în parte prezintă particularități constructive și de modelare, se remarcă faptul că modalitatea de abordare este unitară, conferind un avantaj deosebit în aplicațiile curente din activitatea de proiectare a utilajelor de construcții complexe.

Pe baza relațiilor se poate stabili deplasarea oricărui punct al unui rigid aflat în mișcare vibratorie. De asemenea, pot fi stabilite și deformațiile elementelor elastice care sunt elemente de legătură între două sau mai multe rigide ce alcătuiesc un ansamblu aflat în mișcare vibratorie.

CAPITOLUL IV

MODELE REOLOGICE ALE STRUCTURILOR RUTIERE

4.1. Modele reologice uzuale folosite în studiul comportării materialelor (pământ/mixtură asfaltică) supuse acțiunii vibratorii

Acest paragraf al tezei de doctorat cuprinde teoria simplificată a compactării bazată pe modele reologice idealizate care permit să se facă determinări preliminare ale unor parametri caracteristici care la rândul lor se folosesc pentru determinarea altor parametri [41]. Pentru studiul compactării se consideră că pământul este semiinfini, omogen și izotrop, iar limita lui de elasticitate este infinit de mare [61, 89]. Inițial trebuie să se țină seama de proprietățile mecanice fundamentale ale pământului: elasticitatea, vâscozitatea, plasticitatea. Dacă se ține seama numai de una din aceste proprietăți, care se consideră predominantă și se neglijează celelalte, se obțin modelele mecanice simple ale pământului, alcătuite din câte un singur element: *Hooke*, *Newton*, *Saint-Venant*, *Bathelt simplu* (Fig.4.1 - 4.6). Datorită faptului că comportarea pământului nu poate fi redată cu suficientă aproximare de către modelele mecanice simple, s-au creat modelele mecanice compuse ale pământului care se obțin prin combinarea în serie, în paralel sau mixtă a două până la șase elemente, care țin seama de două sau chiar de toate cele trei proprietăți mecanice fundamentale ale pământului.

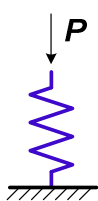


Fig.4.1
Model
Hooke

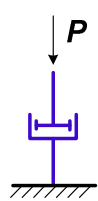


Fig.4.2
Model
Newton

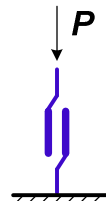


Fig.4.3
Model
Saint-
Venant

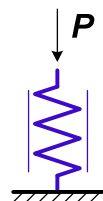


Fig.4.4
Model
Bathelt

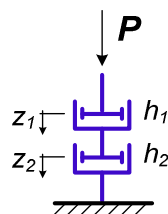


Fig.4.5 Două
modele
Newton
legate în serie

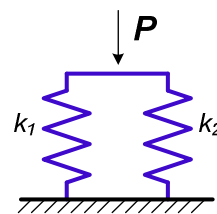
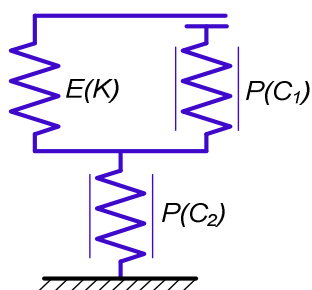


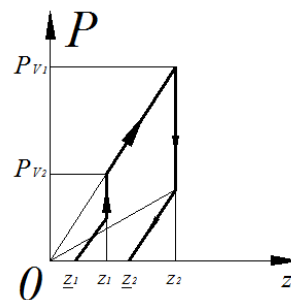
Fig.4.6 Două
modele
Hooke
legate în paralel

4.2. Stadiul actual al modelării complexe a comportării elasto-plastice a materialelor supuse compactării prin vibrație

Modelele compuse prezentate în acest paragraf sunt: Maxwell, Voigt, P-E Bathelt, *P-E-D Hartmann*, *V/(E-P)*. Pentru toate aceste modele sunt date relațiile dintre forța de comprimare și deformație pe baza coeficientului de elasticitate echivalent al fiecărui model în parte.



a)



b)

Fig.4.7 Model Bathelt (E/P)-P

a) reprezentare simbolică; b) curba caracteristică de deformare a pământului.

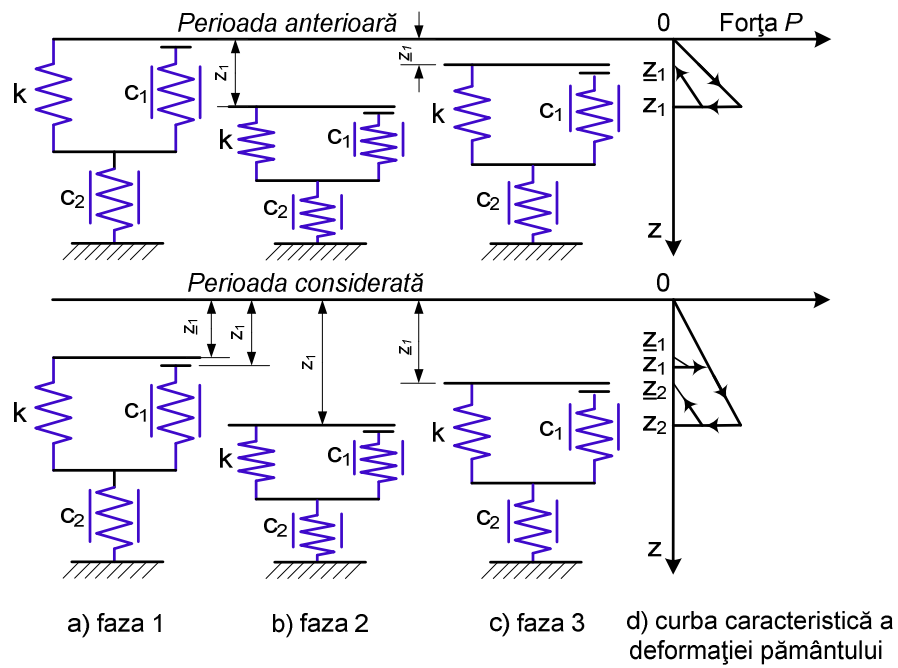


Fig.4.8 Comportarea în lucru a modelului P-E-Bathelt, simbol (E/P)-P

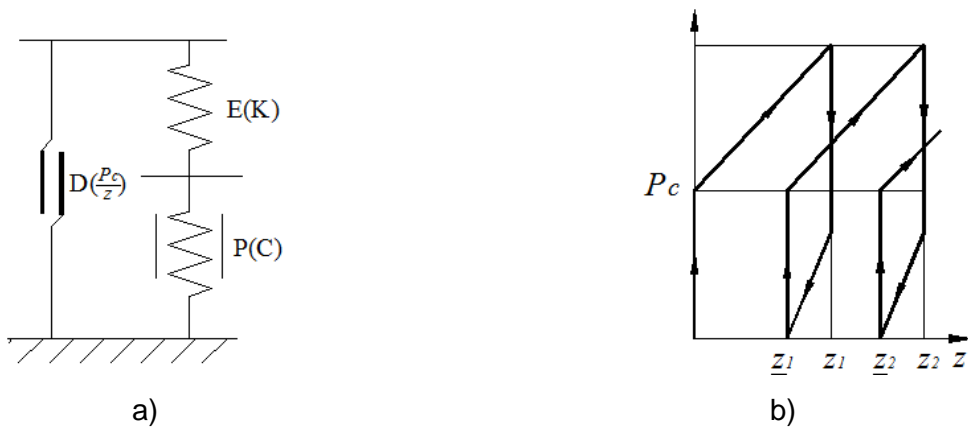


Fig.4.9 Model Hartmann D/(E-P)

a) reprezentare simbolică; b) curba caracteristică de deformare a pământului.



Fig.4.10 Model V/(E-P)

a) reprezentare simbolică; b) curba caracteristică de deformare a pământului.

Acest paragraf se finalizează cu prezentarea sistematizată a modelelor mecanice simple, precum și a modelelor mecanice compuse, funcție de numărul de elemente și de natura deformației lor. Apoi, sunt prezentate centralizat diagramele de încărcare și de deformare în timp, precum și curbele caracteristice de deformare pentru modelele simple și unele modele compuse.

4.3. Particularități ale relațiilor tensiune-deformație utilizate în studiul reologic al terenurilor supuse compactării vibratorii

Pământurile sunt medii complexe, cu legături de diferite naturi între particule, care sub acțiunea unor încărcări constante suferă modificări ale intensității tensiunilor și deformațiilor. Din această cauză apar o serie de aspecte specifice din punct de vedere reologic, care deosebesc pământurile de alte materiale cu proprietăți reologice. În acest paragraf se evidențiază, pe baza unei analize structurale, legile reologice așa cum se manifestă la structurile rutiere și semnificația diferiților coeficienți și a relațiilor matematice utilizate. Legăturile dintre particule la pământuri sunt de patru feluri: rigide, elastice, vâscoase și plastice. Relațiile stabilite între tensiuni și deformații țin seama în primul rând de aceste aspecte specifice pământurilor. Eforturile la care este supus un element (masiv) sunt reprezentate în Figura 4.11*, iar relațiile de calcul ale deformațiilor produse, pe cele trei axe sunt date în relațiile (4.1)* - (4.5)*.

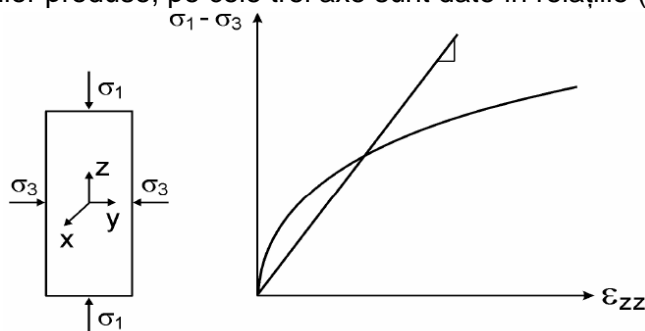


Fig.4.11* (Fig. 4.13) Eforturile la care este supus un model tridimensional

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) = \frac{1}{E} (\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)). \quad (4.52) \quad (4.1)^*$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) = \frac{1}{E} (\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)). \quad (4.53) \quad (4.2)^*$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu(\sigma_3 + \sigma_3)). \quad (4.54) \quad (4.3)^*$$

$$E = \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{\varepsilon_{zz}}. \quad (4.55) \quad (4.4)^*$$

$$\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{zz}} = \frac{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}. \quad (4.56) \quad (4.5)^*$$

Deoarece calculul tasărilor probabile se face în stadiu de exploatare când fenomenele plastice sunt mai reduse, se vor lua în considerare, într-o primă etapă, numai legăturile vâscoase și elastice care intră în componența celor două mari categorii în care au fost împărțite pământurile: nesaturate și saturate. Fiecare din aceste categorii pot fi considerate cu un schelet rigid-elastic (datorită cimentării unor particule care vor jalona direcția de scurgere a tensiunilor) și fără acest schelet. În acest paragraf sunt prezentate aspecte cu privire la:

- a) Modelarea pământurilor compresibile nesaturate (alcătuite din argile fine sau din prafuri argiloase sau nisipoase cu substanțe organice), forma diagramei de fluaj fiind dată în Figura 4.12*, iar variația tensiunii $\sigma(t)$ reprezentată în Figura 4.13*;

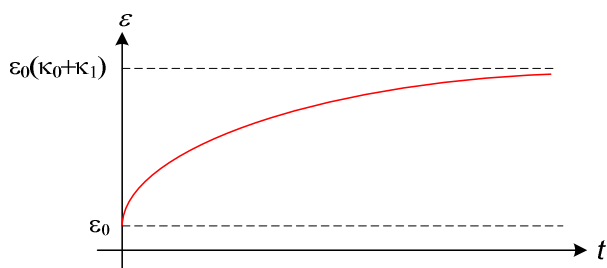


Fig. 4.12* (Fig. 4.15) Forma diagramei de fluaj

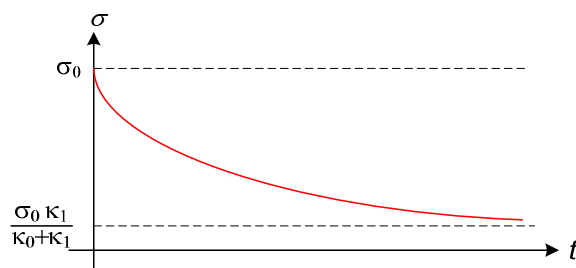


Fig. 4.13* (Fig. 4.16) Variația tensiunii în fluaj

- b) modelarea pământurilor fără schelet rigido-elastic saturate la care diagrama de fluaj este alcătuită dintr-o linie dreaptă urmată apoi de o curbă. După terminarea consolidării primare diagrama de fluaj este reprezentată numai de ecuația curbei. În mod similar se determină în acest paragraf și funcția de relaxare [121].

4.4. Model reologic avansat pentru simularea compactării terenurilor cu evidențierea fenomenului de consolidare

În acest paragraf vor fi prezentate patru modele reologice pe baza comportării elastice și disipative, capabile să simuleze comportarea terenului în interacțiune cu organul de lucru al unui echipament compactor vibrator [44, 46, 47]. Ținând cont de considerațiile teoretice din capitolele anterioare se propune, ca variantă inițială pentru dezvoltarea unei aplicații destinate simulării pe model virtual a comportării sistemului complex rului compactor – teren, un model elasto-plastic (Figura 4.14*) cu ecuația de stare dată în relația (4.6)*:

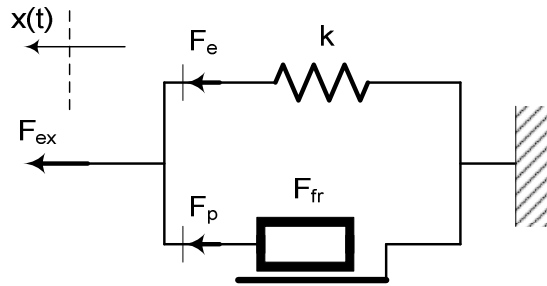


Fig.4.14*(Fig.4.19) Model elasto-plastic pentru analiza simulării comportamentului terenului în interacțiunea cu echipamentul compactor vibrator

$$F_{ex} = \begin{cases} k x(t) + F_{fr} \operatorname{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) & \text{pentru } F_{externa} > F_{fr} \\ 0 & \text{pentru } F_{externa} \leq F_{fr} \end{cases}, \quad (4.96) \quad (4.6)^*$$

unde k este rigiditatea componentei elastice F_e a modelului, F_{fr} este forța de frecare specifică componentei plastice F_p , iar sign semnifică funcția *signum*. În acest model nelinier elasto-plastic cu consolidare forța de frecare este de tip Coulombian, adică are o evoluție constantă cu viteza.

Răspunsul sistemului considerat la o excitație de tip armonic este dat în Figura 4.15*.

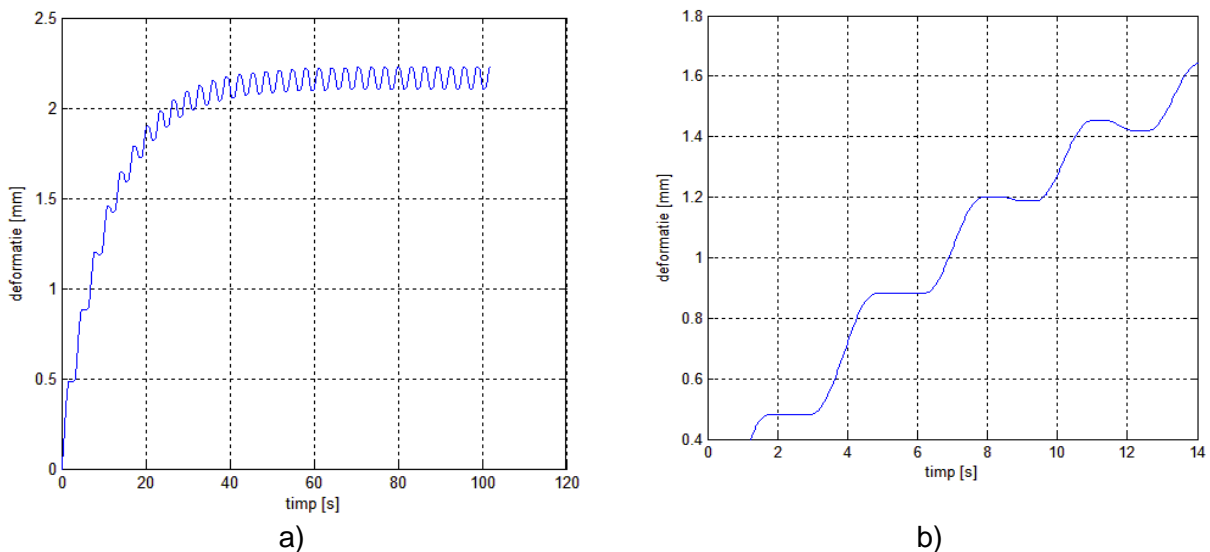


Fig.4.15*(Fig.4.24) Răspunsul sistemului la o funcție de excitație armonică
a) evoluția completă pe durata de aproximativ 100 s; b) detaliu pe zona de tasare.

În Fig.4.16* este reprezentată corelația dintre forța excitatoare și răspunsul sistemului.

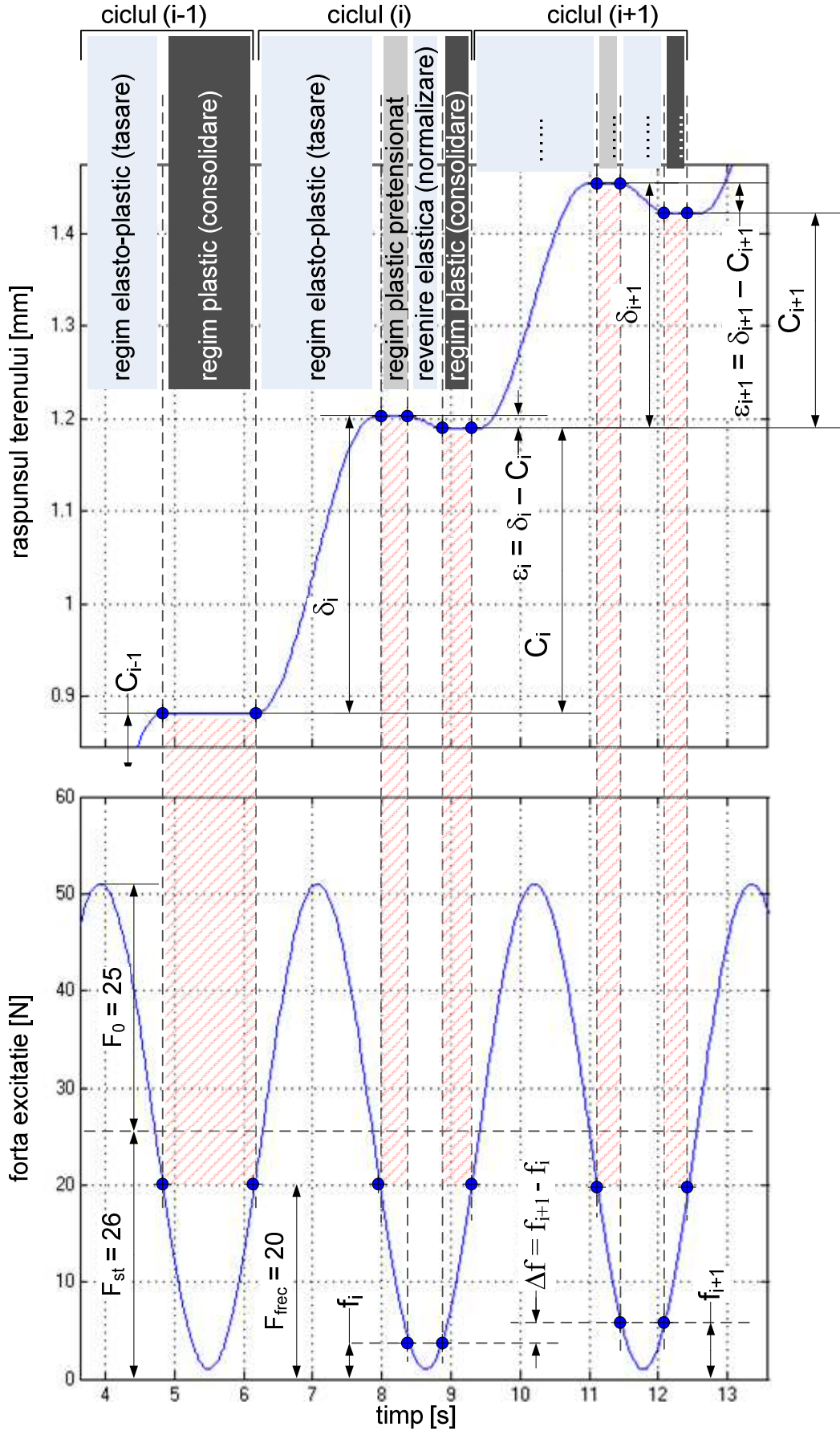


Fig.4.16*(Fig.4.25) Analiza regimurilor de lucru pentru trei perioade ale semnalului de intrare

În diagrama din Figura 4.17* sunt marcate cele două zone de lucru de interes și anume: zona elasto-plastică în care materialul este compactat și respectiv zona elastică în care materialul preia sarcinile dinamice exterioare exclusiv sub forma unor deformații elastice în cicluri succesive încărcare - descărcare, fără a mai prezenta deformații remanente. Practic această zonă corespunde atât unui regim de compactare post-consolidare, cât și regimului efectiv de exploatare. Cu ε_p a fost notată deformația plastică totală (consolidarea C_1), iar cu ε_e deformația elastică produsă de sarcinile dinamice perturbatoare.

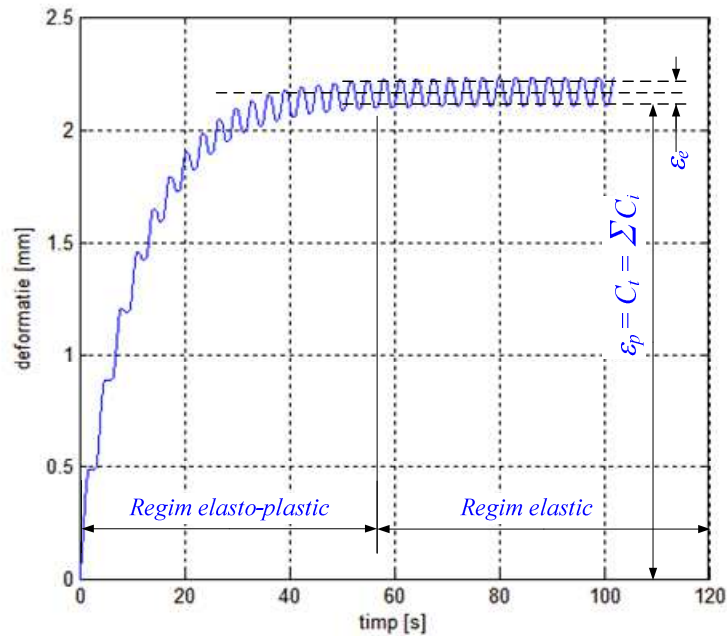


Fig.4.17*(Fig.4.26) Evidențierea regimurilor de lucru și a parametrilor esențiali ai procesului de compactare prin vibrație

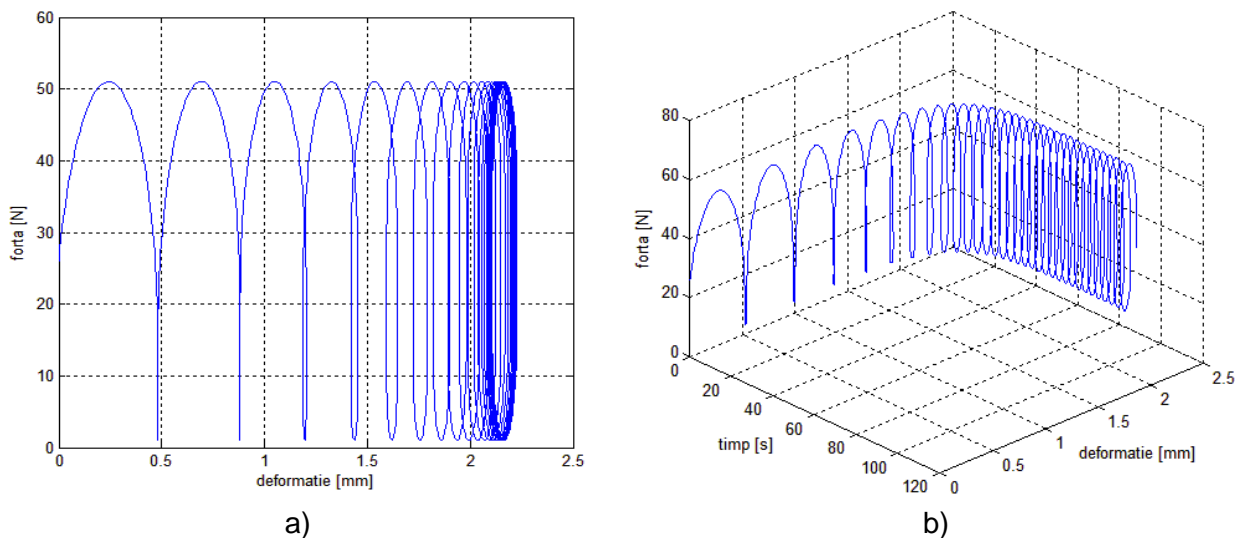


Fig.4.18*(Fig.4.27) Curba forță - deformație pentru cazul simulat
(a) reprezentare generală; (b) reprezentare 3D ținând cont și de variabila timp.

4.5. Concluzii parțiale

Scopul acestui studiu a fost stabilirea și verificarea unor modele de bază care să poată simula procesul de compactare a terenului sub acțiunea unei sarcini dinamice produsă de un rulu compactor vibrator. De asemenea, aplicația realizată pune în evidență aspecte importante ale interacțiunii ruloului vibrator - teren.

CAPITOLUL V

LEGITĂȚI FUNCȚIONALE ALE PĂMÂNTURILOR PE BAZA ÎNCERCĂRILOR EXPERIMENTALE

În cele ce urmează, se va evidenția, în special, evoluția parametrilor care caracterizează starea pământului considerând că parametrii utilajului sunt stabili în limitele domeniilor de reglare necesare, impuse de necesitățile finalizării corecte a procesului de compactare pentru tipul de pământ considerat, ceea ce corespunde situației în care utilajul de compactare a fost corect selectat în raport cu sarcina tehnologică de compactare.

5.1. Dependența modului static de deformare liniară a pământului funcție de densitatea sa în stare uscată

Trei tipuri de terenuri de fundare testate, cu umidități corespunzătoare, w întâlnite uzual sunt: nisip, pământuri necoezive: $w = (5...12)\%$; pământuri slab coezive: $w = (12...15)\%$; balast. Astfel, pentru cele trei tipuri principale de pământuri enumerate anterior s-au determinat expresiile pentru funcția $E_{st} = f(\rho_d)$.

Gradul de compactare a pământului se definește în literatura de specialitate cu ajutorul următoarelor relații:

$$D_c = \rho_d / \rho_{d \max}, \quad (5.4) \quad (5.1)^*$$

$$D_c = \left(100 \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \right), [\%], \quad (5.4) \quad (5.1')^*$$

unde D_c este gradul de compactare a pământului, adimensional sau în [%]; $\rho_{d \max}$ – densitatea maximă în stare uscată, caracteristică fiecărui tip de pământ, determinată prin încercarea Proctor, măsurată în $[g/cm^3]$.

În cele ce urmează, pe baza acestui indicator al eficienței procesului de compactare, sunt determinate funcțiile de variație ale celorlalți parametri specifici acestui proces tehnologic.

5.2. Dependența lățimii amprentei de contact dintre ruloul utilajului de compactare și teren, funcție de densitatea în stare uscată a pământului

Determinările experimentale efectuate până în prezent în condiții de șantier, pentru diferite tipuri de fundare, au evidențiat existența unei corelații între mărimea “urmei” lăsată de ruloul mașinii compactoare și gradul de compactare efectiv realizat în teren. La contactul dintre ruloul utilajului de compactare și pământ, sub acțiunea masei mașinii se produce o deformare a terenului pe toată lungimea ruloului numită *amprenta sau pata de contact* a utilajului. Pentru utilajul staționar acesta are, în proiecție pe planul orizontal, forma unui dreptunghi cu latura mare egală cu lungimea b^* (dată de relația 5.2*) a ruloului și o lățime dependentă de diametrul D_r al ruloului și de starea de îndesare existentă a pământului.

$$b^* = 0,667(1 - \rho_d / \rho_{d \max}) D_r [cm]. \quad (5.7) \quad (5.2)^*$$

5.3. Dependența grosimii optime a stratului de pământ care se compactează, funcție de densitatea în stare uscată a pământului

Din determinările experimentale efectuate până în prezent pentru diferite tipuri de terenuri, a rezultat de asemenea că există o grosime optimă h_c (dată de relația 5.3*) a stratului de pământ pentru care compactarea are o eficiență sporită, iar valoarea să poate fi corelată cu lățimea amprentei utilajului și cu gradul de compactare efectiv realizat în teren.

$$h_c = 4,44(1 - \rho_d / \rho_{d \max})^2 D_r [cm]. \quad (5.11) \quad (5.3)^*$$

5.4. Dependența tasării stratului de pământ funcție de densitatea sa în stare uscată

Pe baza observațiilor experimentale s-a stabilit că valoarea grosimii optime a stratului de pământ care trebuie compactat scade pe măsură ce procesul de compactare avansează. Tot în acest mod s-a constatat și faptul că tasarea pământului Δh (dată de relația 5.4*) în timpul procesului de compactare are o evoluție similară celei corespunzătoare grosimii optime a stratului de compactat, valoarea sa tinzând spre zero.

$$\Delta h = \frac{4,44 \cdot D_r}{\rho_{d \max}^2} \cdot (\rho_{di} - \rho_d) \cdot (\rho_{di} + \rho_d - 2 \cdot \rho_{d \max}) [cm]. \quad (5.13) \quad (5.4)^*$$

5.5. Dependența modului static de deformație liniară funcție de tasarea terenului

Relația de dependență a modului static de deformație liniară E_{st} (dat în relațiile 5.5*-5.6*) al pământului respectiv funcție de tasarea Δh la un moment dat a acestuia, are următoarea expresie:

a) pentru pământuri slab coezive (model tratat complet):

$$E_{st} = 711,221 \cdot \left\{ 1 - 1,3154 \sqrt{1,8386 - \rho_{d \max} - \sqrt{(\rho_{d \max} - \rho_{di})^2 - 0,9 \frac{\rho_{d \max}}{D_r} \Delta h}} \right\}, \left[\frac{daN}{cm^2} \right]. \quad (5.19) \quad (5.5)^*$$

b) pentru pământuri necoezive (nisip):

$$E_{st} = \left[\rho_{d \max} - \sqrt{(\rho_{d \max} - \rho_{di})^2 - 0,9 \cdot \frac{\rho_{d \max}^2}{D_r} \cdot \Delta h} \right] - 1175, [daN/cm^2]. \quad (5.20) \quad (5.6)^*$$

5.6. Dependența coeficientului de rigiditate funcție de tasarea terenului

Expresia matematică (dată de relația 5.7*) a dependenței dintre coeficientul de rigiditate k și tasarea Δh a terenului are forma

$$k = \frac{1,13 \cdot E(\Delta h)}{1 - \nu^2} \cdot \sqrt{0,667 \cdot B \cdot \sqrt{D_r^2 \cdot (1 - D_{ci})^2 - 0,9 \cdot D_r \cdot \Delta h}}, [daN/cm]. \quad (5.28) \quad (5.7)^*$$

ceea ce pune în evidență comportarea neliniară a pământului în timpul compactării.

5.7. Dependența forței de rezistență a terenului funcție de tasarea acestuia

Din ipoteza comportării elastice a terenului, în cazul tasărilor de valori mici, la compactarea pământului, rezultă faptul că forța de rezistență F_s opusă de teren în procesul de compactare este de tip elastic.

Curba $F_s - \Delta h$ reprezintă rezerva de capacitate portantă a terenului corespunzător tasării realizate la un moment dat în procesul de compactare.

5.8. Dependența efortului unitar axial de compactare funcție de tasarea terenului

Efortul unitar axial σ_c (dat de relația 5.8*) dezvoltat în teren de acțiunea dinamică a utilajului de compactat, cumulează atât efectul direct al acțiunii utilajului asupra terenului, cât și reacțiunea terenului supus compactării asupra utilajului. Acest parametru reflectă interacțiunea dintre compactor și teren în procesul tehnologic iar monitorizarea lui este un indiciu important în cunoașterea stadiului procesului de compactare.

$$\sigma_c = \frac{Q^*}{B \cdot D_r} \cdot \left[\frac{1,5 \cdot \sqrt{D_r}}{\sqrt{(1 - D_{ci})^2 \cdot D_r - \frac{0,9}{D_r} \cdot \Delta h}} - \frac{1,125 \cdot 10^{-5} \cdot t_c \cdot V_r}{(1 - D_{ci})^2 \cdot D_r - 0,9 \cdot \Delta h} \right] [\text{daN/cm}^2] \quad (5.30) \quad (5.8)^*$$

5.9. Dependența globală a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor-teren

Diagrama din Figura 5.1* (Figura 5.8 din teză) prezintă parametrii mai sus amintiți reprezentați simultan la scări diferite, corelate pentru a realiza încadrarea tuturor funcțiilor în limitele domeniului de valori 0 ... 100, pentru domeniul de variație al tasărilor cuprins între 0 și 8 cm, corespunzător valorii rotunjite a tasării maxime posibile din exemplul propus spre studiu.

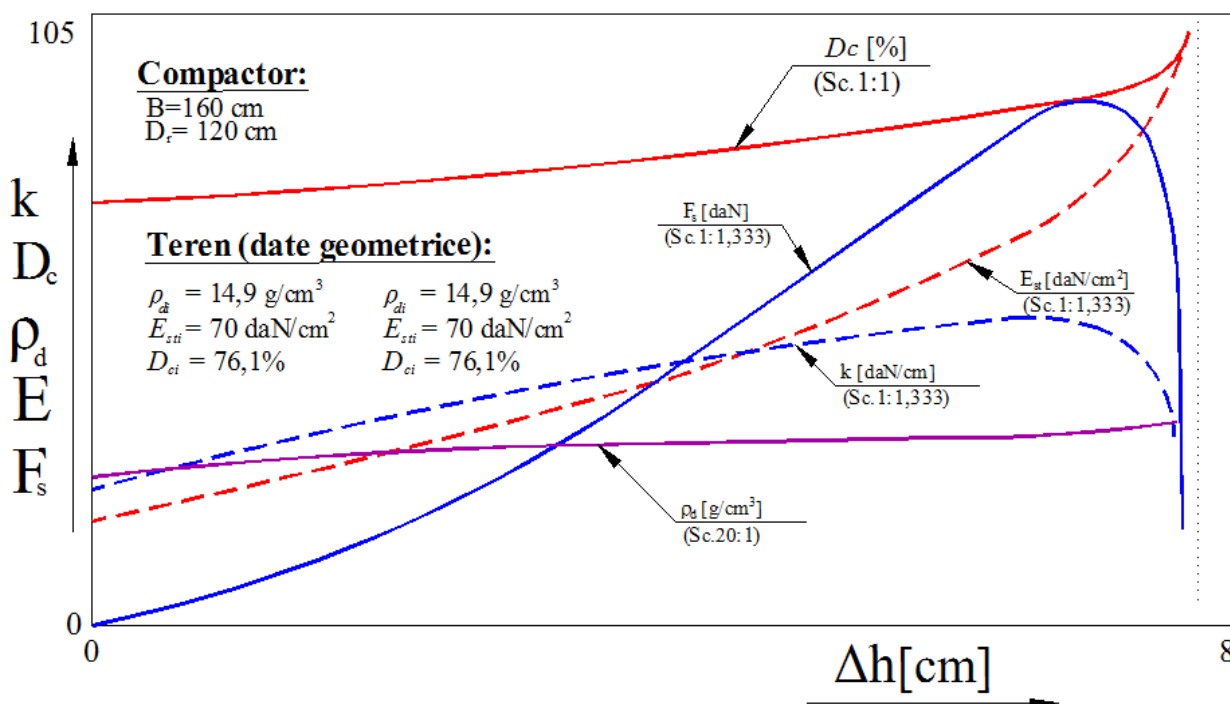


Fig. 5.1*(Fig.5.8) Dependența globală a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor-teren funcție de tasare, pentru un model de pământ slab coeziv

În diagrama din fig. 5.1* sunt trasate curbele de variație a parametrilor care definesc comportamentul terenului, pentru cazul particular al unui pământ caracterizat prin valoarea $\rho_{dmax} = 1,84$ g/cm³, compactarea pornind de la starea inițială corespunzătoare valorii $\rho_{di} = 1,4$ g/cm³ și fiind efectuată cu un utilaj de compactare având diametrul ruloului $D_r = 120$ cm.

Se observa din diagramă faptul că domeniul de existență al tuturor funcțiilor care descriu variația parametrilor reprezentați este limitat superior de valoarea tasării maxime a pământului pentru cazul particular considerat, respectiv $\Delta h = 7,616$ cm.

Acțiunea echipamentului tehnologic este urmărită prin valoarea parametrului *tasare realizată a terenului* Δh , parametru comun de referință al tuturor curbelor de variație reprezentate, care introduce în mod explicit numai influențele ce caracterizează contactul local rului compactor – teren asupra sa prin valorile particulare ale parametrilor constructivi ai organului activ de lucru (diametrul D_r și lungimea B ale ruloului vibrator).

CAPITOLUL VI

ANALIZA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN VIBRARE

6.1. Date inițiale

În acest capitol al tezei de doctorat se vor preciza metodele de experimentare necesare, modelul de analiză a rezultatelor experimentale obținute pe diverse șantiere de construcții din țara noastră, precum și evaluarea parametrilor de calcul care sunt necesari pentru definitivarea modelului dinamic al interacțiunii compactor-teren propus în următorul capitol al tezei. În acest sens, în continuare vor fi prezentate metodele experimentale utilizate de ICECON SA București (din a cărei echipă de specialiști face parte și autorul acestei teze de doctorat), care permit determinarea parametrilor fizico-mecanici ai terenului (umiditate, densitate, tasare plastică, grad de compactare), ai parametrilor elastici și de pierdere prin disipare a energiei, precum și stabilirea spectrului în frecvență a vibrațiilor în timpul compactării. Rezultatele experimentale au fost obținute pe terenuri de umplutură în cadrul șantiierelor de construcții de la Siret și Argeș ale firmei Hidroconstrucția.

6.2. Metode experimentale pentru determinarea parametrilor specifici procesului de compactare

Probele de compactare au fost prelevate direct din stratul de pământ slab coeziv supus procesului de compactare. Inițial s-au determinat parametrii: umiditate (w), densitate în stare umedă (ρ_w), volumul probei (V), densitatea materialului în stare uscată (ρ_d), densitatea maximă în stare uscată a pământului ($\rho_{d\max}$) [16, 17, 19]. Gradul de compactare s-a determinat prin metoda Proctor modificat, pentru probe recoltate, din stratul de pământ, după fiecare două treceri ale utilajului [15, 18]. Tasarea sau deformația plastică a terenului s-a măsurat în toate punctele (30 puncte) stabilite aprioric cu nivel de referință. În fiecare punct a fost stabilit reperul inițial, iar la două puncte de măsurări s-a plasat câte un fleximetru cu ac indicator și cadran de citire a valorii atinse. Coeficientul de rigiditate dinamic s-a determinat prin metoda răspunsului sistemului dinamic de rezonanță. Pentru aceasta a fost realizat un sistem de modificare continuă, pe cale hidraulică, a frecvenței forței perturbatoare. La rezonanță deplasarea vibrației devine maximă, iar înregistrarea instrumentală a făcut posibilă determinarea pulsației de rezonanță. Pe această cale s-a determinat coeficientul de rigiditate pentru cele câteva categorii de teren de unde s-au prelevat probele pentru compactare. Modulul de elasticitate static s-a determinat prin metoda folosirii plăcii de probă cu încărcare gradată (după fiecare două treceri ale utilajului), iar în laborator cu ajutorul aparatului triaxial [14].

În vederea evaluării globale a parametrilor caracteristici procesului de compactare au fost determinate experimental următoarele caracteristici tasarea terenului, gradul de compactare și spectrul de vibrații corelat cu starea de compactare. Pentru determinarea tasării terenului s-au efectuat experimentări în condițiile compactării unor straturi de pământ slab coeziv cu ușor conținut de argilă. Straturile au fost depuse cu buldozerul la grosimi aproximativ constante [12]. Pentru determinarea tasării au fost montate la distanța de 0,5 m în lungime și 0,5 m în lățime jaloane verticale (martori) cu nivel de referință marcat. La două treceri ale utilajului s-a măsurat tasarea rămasă (deformația remanentă).

6.3. Plan de încercări experimentale

Date cunoscute:

- a) Informații despre natura terenului supus compactării (de tip slab coeziv format din amestec de nisip, pietriș și conținut redus de argilă cu $\rho_{d\max} = 1,564 \text{ g/cm}^3$);
- b) Informații despre echipamentele de compactare (un compactor vibrator duplex autopulsat tip Bomag BW 80 AD-2 și un compactor vibrator tractat tip Weller).

Fig. 6.1*(Fig.6.2) Compactor
tip Bomag BW 80 AD-2Fig.6.2* (Fig.6.3) Compactor tractat
tip Weller WWW 500

c) Desfășurarea experimentărilor

S-au folosit treceri multiple ale utilajului de compactare: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16.

S-au testat straturi de pământ slab coeziv cu grosimi diferite (în cm): 10, 15, 20, 30, 40.

S-a prelevat număr mare de probe: 3 (pt. Bomag) și 8 (pt. Weller).

Viteza de deplasare a utilajului s-a menținut constantă: $v=1,4$ km/h.

Pentru determinarea tasării s-a urmărit planul de experimentare dat în tabelul 6.1*, valabil numai pentru utilajul Bomag.

Tabelul 6.1*(Tabelul 6.4) Planul nr.1 de experimentare

	2 treceri					4 treceri					6 treceri				
Grosime strat	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40
BOMAG (8 probe)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	

Continuarea Tabelului 6.1*

	8 treceri					10 treceri				
Grosime strat	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40
BOMAG (8 probe)	X	X	X	X		X	X	X	X	

Pentru determinarea parametrilor de compactare a terenului s-a urmărit planul de experimentare din tabelul 6.2*, valabil pentru ambele utilaje de compactare.

Tabelul 6.2*(Tabelul 6.5) Planul nr.2 de experimentare

	2 treceri					4 treceri					6 treceri					8 treceri					
Grosime strat	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40	
BOMAG (3 probe)								X	X		X	X							X	X	
WELLER (3 probe)			X		X			X		X			X		X				X		X

Continuarea Tabelului 6.2*

	10 treceri					12 treceri					16 treceri				
Grosime strat	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40	10	15	20	30	40
BOMAG (3 probe)	X	X		X				X			X	X			
WELLER (3 probe)			X		X			X		X			X		X

6.4. Rezultate obținute

Valorile măsurate ale parametrilor esențiali implicați în desfășurarea în condiții optime a procesului de compactare (umiditatea terenului și densitatea în stare uscată/umedă a terenului), precum și cele ale tasării și gradului final de compactare a terenului (D_c) sunt centralizate în tabelele din acest paragraf, pentru ambele tipuri de compactoare.

6.5. Prelucrarea datelor experimentale

Reprezentarea în plan și tridimensional a dependenței parametrilor număr de treceri (2, 4, 6, 8, 10 treceri) - grosime strat (10, 15, 20, 30 cm) și tasare medie este dată în Figura 6.3*.

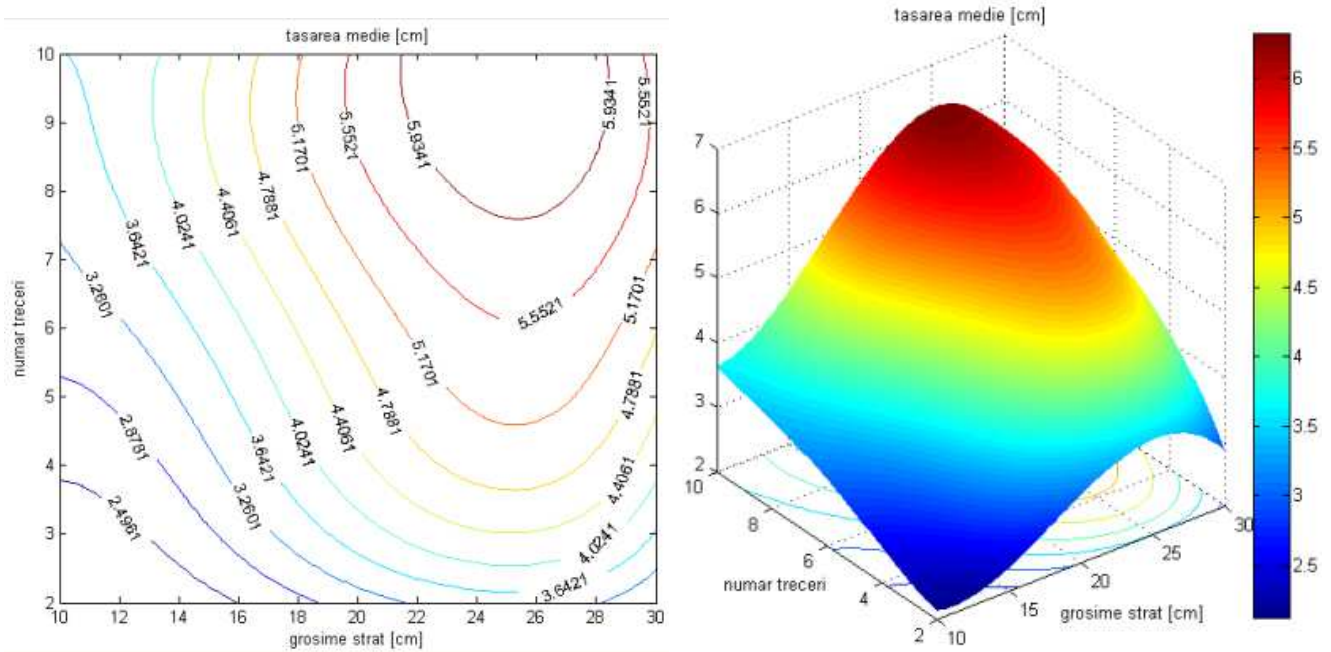


Fig. 6.3*(Fig.6.8) Dependența dintre numărul de treceri - grosime strat - tasare medie (pentru utilajul Bomag)

Reprezentarea în plan și tridimensional a dependenței parametrilor număr de treceri (2-16 treceri) - grosime strat (10-30 cm) și grad de compactare obținut este dată în Figura 6.4*.

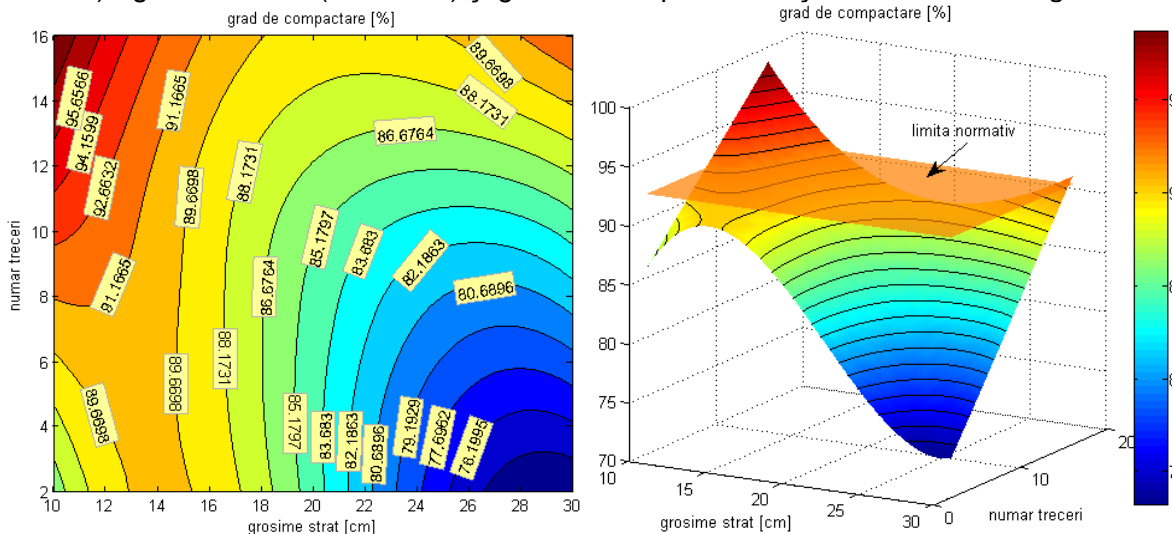


Fig. 6.4*(Fig.6.18) Dependența dintre numărul de treceri - grosime strat – grad de compactare (pentru utilajul Bomag)

Reprezentarea în plan și tridimensional a dependenței parametrilor grosime strat (0-40 cm), număr de treceri (2-10 treceri) și grad de compactare obținut este dată în Figura 6.5*.

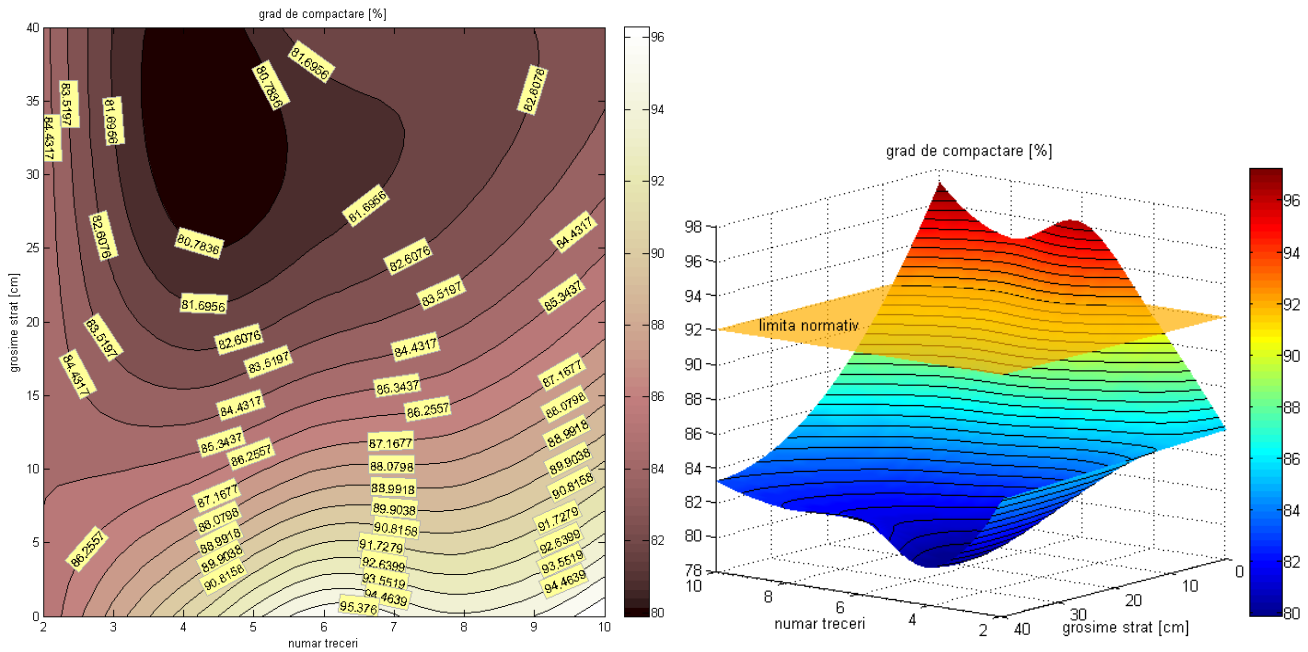


Fig. 6.5*(Fig.6.24) Dependența dintre numărul de treceri - grosime strat – grad de compactare (pentru echipamentul Weller)

Reprezentarea în plan și tridimensională a variației gradului de compactare funcție de numărul de treceri (2, 4, 6, 8, 10 treceri), pentru diferite adâncimi de testare (0, 20, 30, 40 cm) a stării terenului este dată în Figura 6.6*.

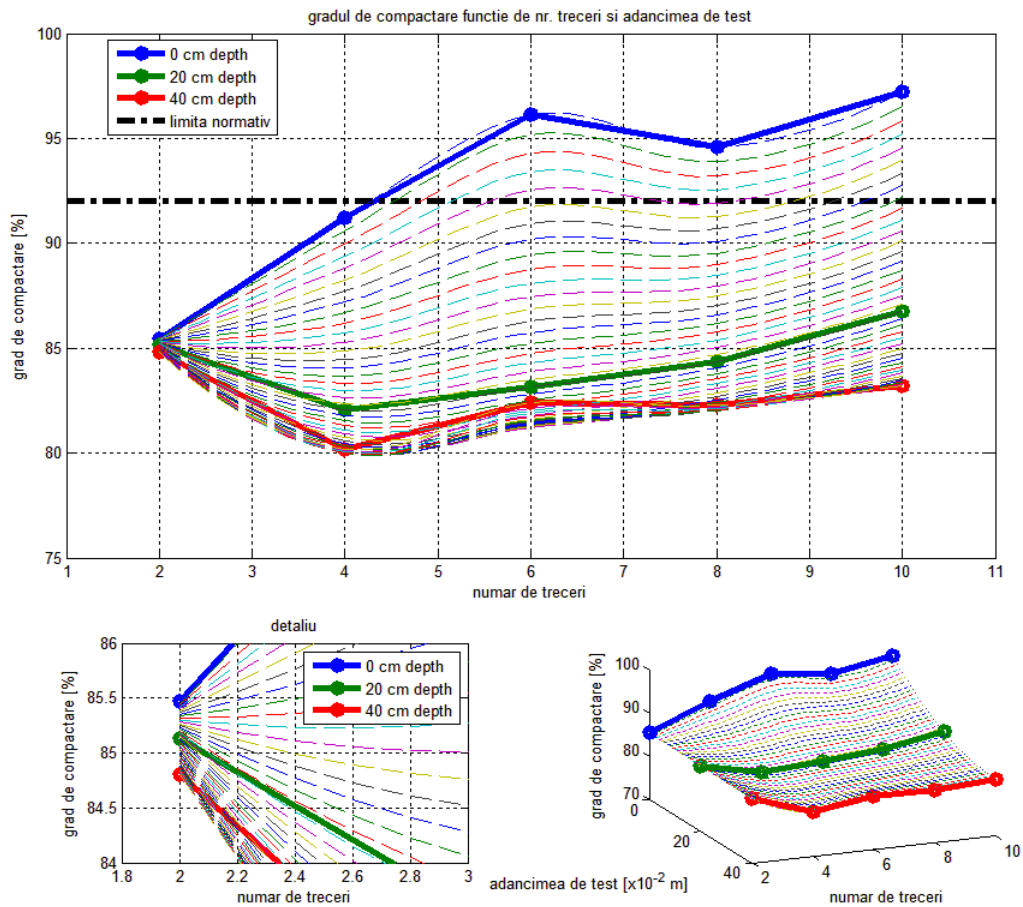
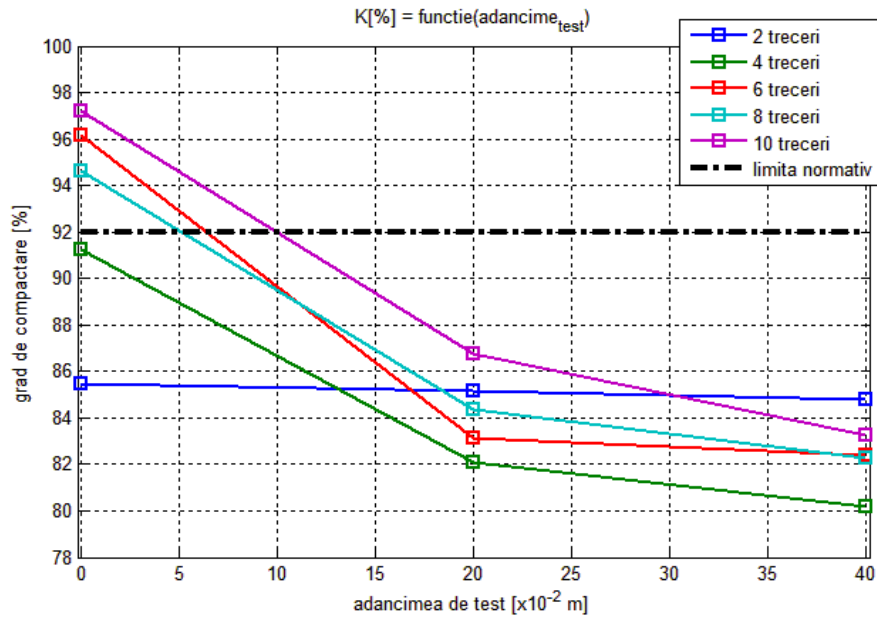


Fig. 6.6*(Fig.6.25) Variația gradului de compactare funcție de numărul de treceri, pentru diferite adâncimi de testare (pentru echipamentul Weller)



Continuarea Fig. 6.6*(Fig.6.8) Variația gradului de compactare funcție de numărul de treceri, pentru diferite adâncimi de testare (pentru echipamentul Weller)

6.6. Analiza spectrală a semnalului deplasare în concordanță cu realizarea gradului de compactare

Pentru a aprecia aportul componentei plastice a terenului în timpul procesului de compactare și a evidențierii caracterului nelinear al acestuia, s-a înregistrat în sistem informatic (achiziție-condiționare-procesare-analiză-management-prezentare) semnalul preluat de la un traductor plasat pe axul ruloului vibrator. Cu ajutorul software-ului LabView prin modulele specializate ale acestuia s-a realizat analiza spectrală obținându-se amplitudinile semnificative ale armonicilor fundamentală și de ordinul unu. Analiza regimului dinamic pentru diferite valori ale numărului de treceri a pus în evidență faptul că în compoziția spectrală a semnalului de deplasare apar două componente spectrale dominante. Prima dintre acestea apare la frecvența de 22 Hz, iar cea de a doua la frecvența de 44 Hz. Amplitudinea primei componente rămâne aproximativ constantă cu incrementarea numărului de treceri, în timp ce amplitudinea celei de a doua componente crește proporțional cu numărul de treceri.

6.7. Concluzii parțiale

Pe baza determinărilor experimentale, a prelucrării datelor și interpretării acestora rezultă următoarele:

- determinările experimentale pentru tasare și grade de compactare corelate cu parametri dinamici ai utilajului evidențiază posibilitatea modelării unor anumite categorii de pământuri ca medii vâscoelastice;
- măsurările instrumentale efectuate odată cu determinarea parametrilor de compactare demonstrează o bună concordanță între valorile obținute și posibilitatea aprecierii pe cale instrumentală a gradului de compactare;
- modelul propus în acest capitol a fost verificat pe pământ slab coeziv, urmând a se extinde domeniul, astfel încât să poată descrie compactarea mai multor categorii de teren.

Față de cele subliniate anterior se propune continuarea cercetărilor în condiții de laborator și teren pentru lărgirea gamei de parametri în vederea caracterizării cât mai exacte a procesului de compactare prin folosirea utilajelor de compactat prin vibrație.

CAPITOLUL VII

ANALIZA DINAMICĂ A INTERACȚIUNII RULOU –TEREN ÎN PROCESUL DE COMPACTARE PRIN VIBRAȚII

7.1. Introducere

Având în vedere orientarea acestei teze de doctorat spre aspectul tehnologic și operațional al utilajului în conexiune cu terenul, privit din punctul de vedere al realizării unei performanțe tehnologice impuse procesului de compactare cu implicații asupra calității finale a terasamentului realizat, se vor prezenta în acest capitol modele dinamice pentru studiul interacțiunii dintre echipamentul de compactare și teren.

7.2. Model dinamic cu un grad de libertate pentru studiul interacțiunii rulou-teren în procesul de compactare prin vibrații

Cel mai simplu model dinamic pentru modelarea interacțiunii dintre rulou și teren, în cazul unui compactor cu un singur rulou vibrator, este cel prezentat în Figura 7.1*. Modelul are un singur grad de libertate concretizat în deplasarea ruloului vibrator pe direcția verticală.

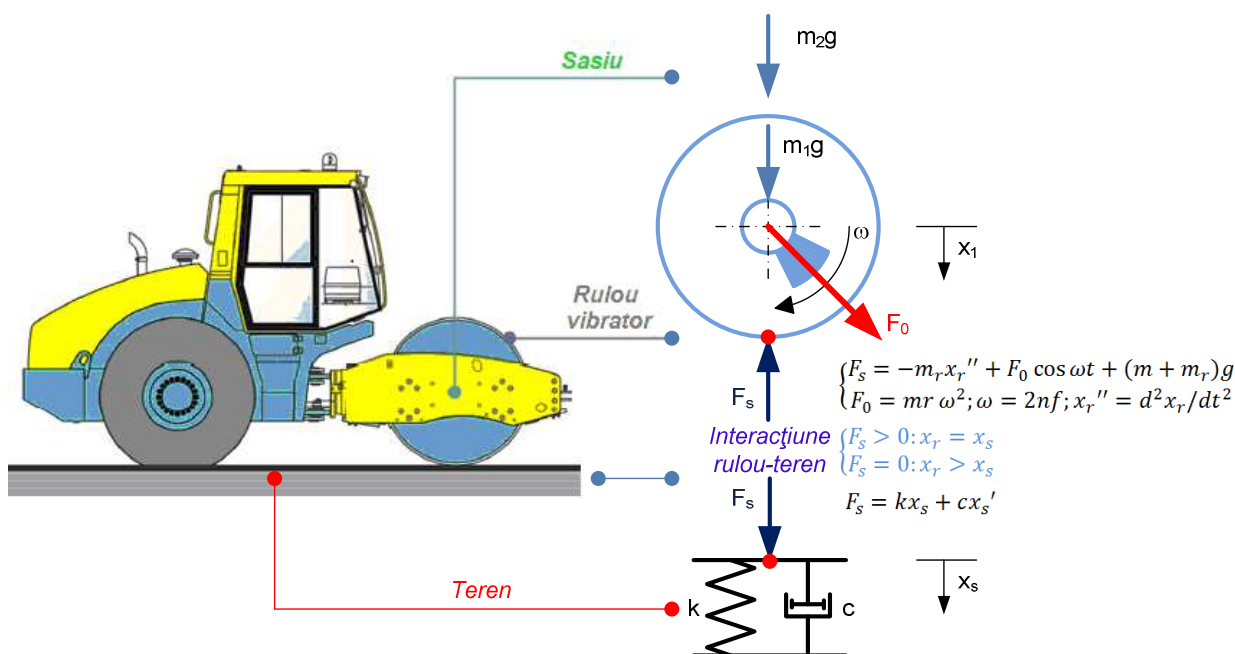


Fig. 7.1*(Fig.7.2) Model dinamic cu un grad de libertate pentru studiul interacțiunii rulou-teren pentru un compactor cu un rulou vibrator

Din analiza comparativă a diagramelor (rezultate în urma simulării) din fig. 7.3 și 7.4 și ținând cont de ipoteza inițială a liniarității caracteristicilor terenului rezultă următoarele *concluzii parțiale*:

- răspunsul în deplasare al sistemului se stabilizează după trecerea prin domeniul de rezonanță;
- odată cu creșterea amplitudinii forței excitatoare se observă o creștere a valorilor stabile ale amplitudinilor maxime ale deplasării ruloului pe verticală;
- valorile amplitudinilor deplasărilor corespund valorilor vârf la vârf maxime înregistrate pentru evoluțiile deplasărilor în timp corespunzătoare cazurilor analizate;
- la trecerea prin zona de rezonanță se constată că valorile maxime cresc odată cu creșterea amplitudinii forței perturbatoare.

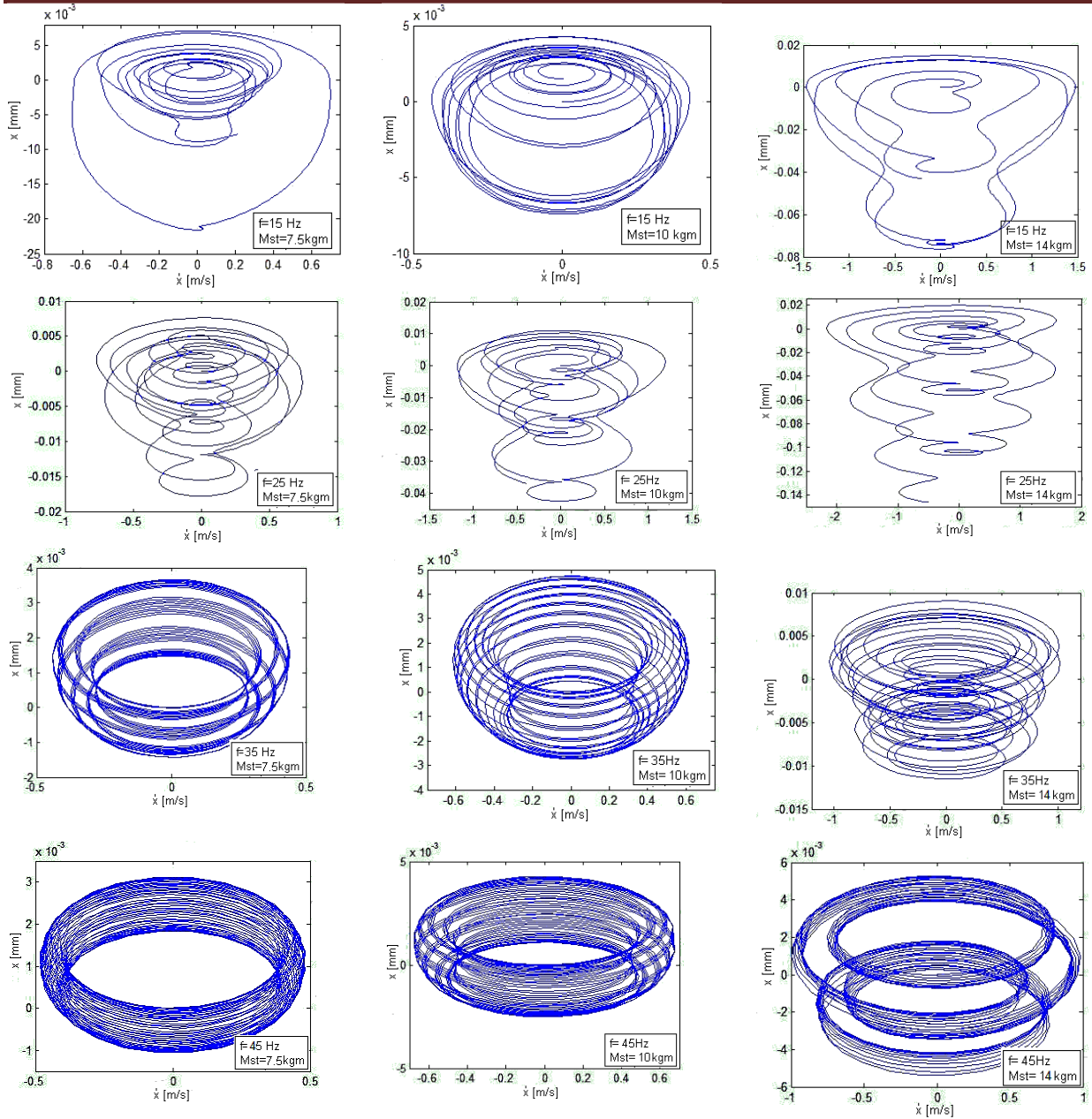
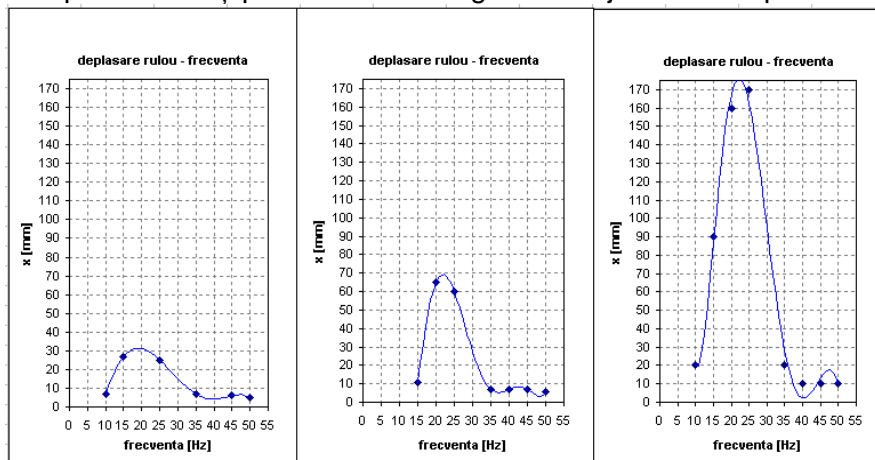


Fig. 7.3 Reprezentarea mișcării ruloului (planul fazelor) pentru diferiți parametri tehnologici ai utilajului de compactat



a) $M_{st}=7.5 \text{ kgm}$ b) $M_{st}=10 \text{ kgm}$ c) $M_{st}=14 \text{ kgm}$
 Fig. 7.4 Amplitudinea mișcării pe verticală a ruloului vibrator funcție de frecvență pentru diferite momente statice ale maselor excentrice

7.3. Modele dinamice cu mai multe grade de libertate pentru studiul interacțiunii rului-teren în procesul de compactare prin vibrații

Studiul mișcării sistemului rului vibrator – teren poate fi analizat atât pe modele simple cu comportare liniară, dar și pe modele neliniare. Acestea din urmă au fost elaborate cu grade de complexitate graduale (2, 3 sau mai multe grade de libertate).

Dacă se ia în considerare suspensia rului compactor, atunci modelul dinamic echivalent pentru studiul mișcării principalelor elemente structurale ale compactorului este prezentat în Figura 7.5.

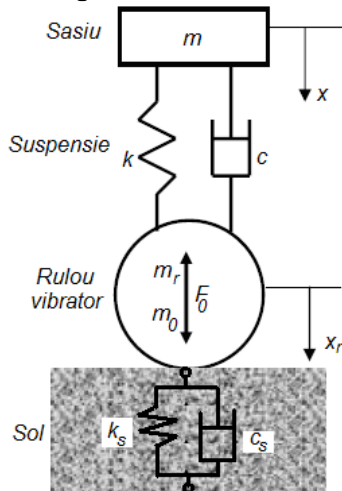


Fig. 7.5 Model dinamic cu două grade de libertate pentru studiul interacțiunii rului-teren pentru un compactor cu un rulu vibrator

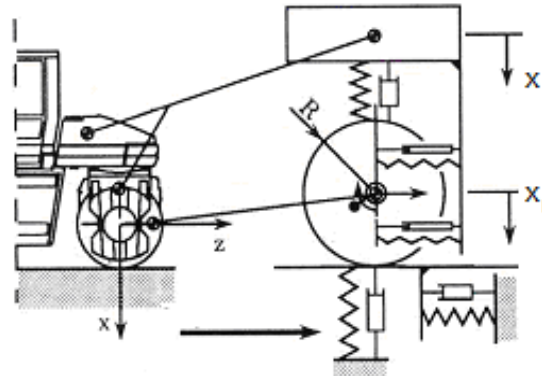


Fig. 7.6. Model neliniar pentru studiul interacțiunii rului vibrator – teren [6]

În paragraful care urmează sunt prezentate modele propuse de autor cu ajutorul cărora se poate studia fie comportarea vâsco-elasto-plastică a unei anumite categorii de pământuri, fie modelarea virtuală a interacțiunii rului-teren în timpul desfășurării procesului de compactare.

7.4. Optimizarea modelului vâsco-elasto-plastic al terenului pe baza încercărilor experimentale in situ

Pe baza determinărilor experimentale din capitolul 6 în corelație cu modelul analizat în paragraful 4.4 s-a adoptat un model dinamic vâsco-elasto-plastic ce urmează a fi implementat în modelarea interacțiunii mașină-teren. Pentru studiul interacțiunii utilaj-teren autorul propune modelul dinamic din Figura 7.7*, iar schematizarea 3D a utilajului considerat pentru studiu este prezentat în Figura 7.8* .

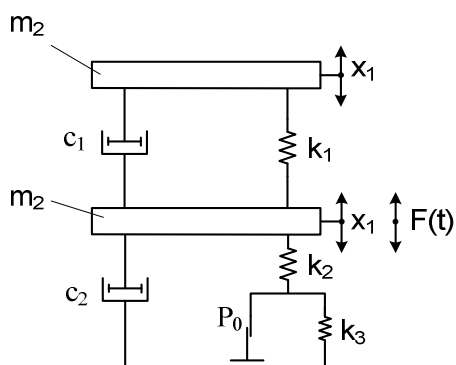


Fig. 7.7*(Fig.7.8) Modelul reologic avansat al interacțiunii teren-echipament [63]

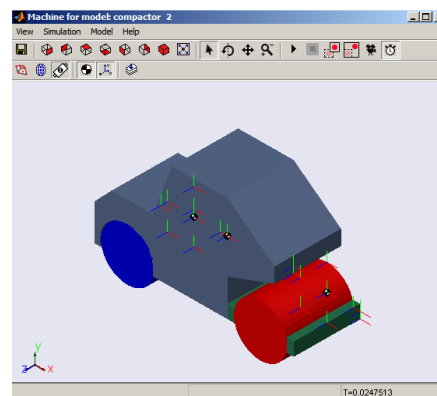


Fig. 7.8*(Fig.7.12) Schematizarea 3D a utilajului de compactare prin vibrare utilizat în cadrul simulatorului virtual

În figura 7.9* sunt prezentate evoluțiile deformațiilor totală și remanentă a terenului pe toată durata de test, cu evaluarea tasării estimate după fiecare ciclu complet de solicitare (trecere a ruloului vibrator peste zona de teren monitorizată), pentru un teren slab coeziv.

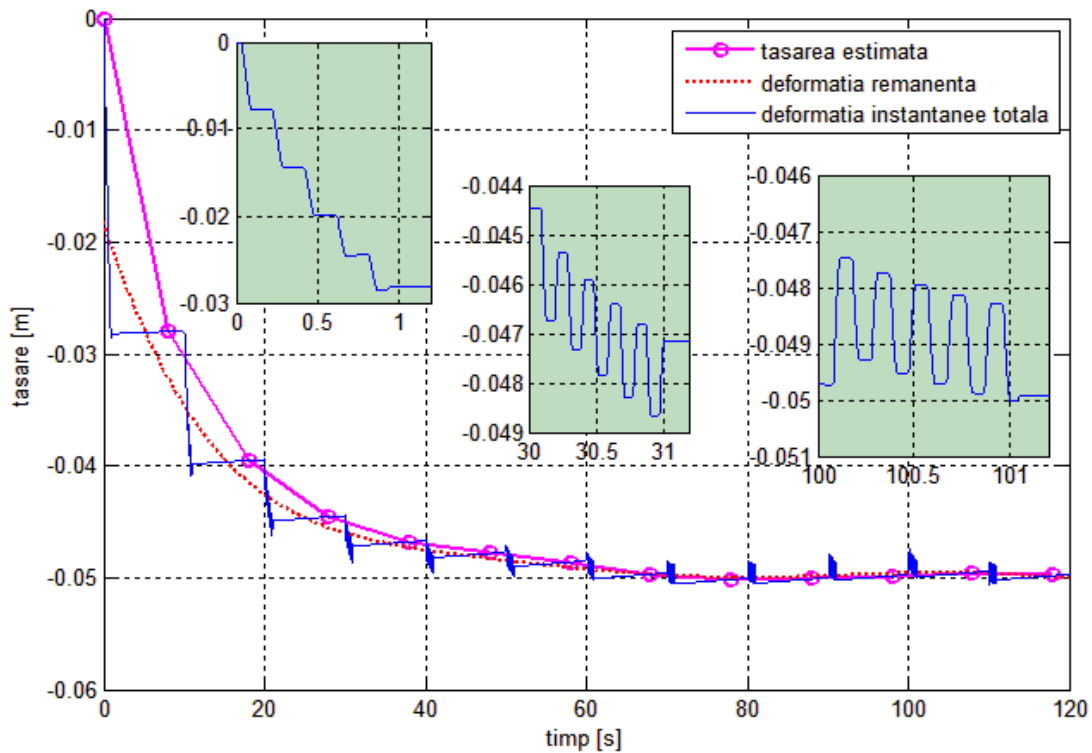


Fig. 7.9*(Fig.7.13) Evoluția deformațiilor totală și remanentă cu evaluarea tasării estimate pentru un teren slab coeziv

Componentele deformației instantanee a terenului slab coeziv considerat în această analiză (deformația vâsco-elastică și respectiv cea remanentă) sunt date în Figura 7.10*.

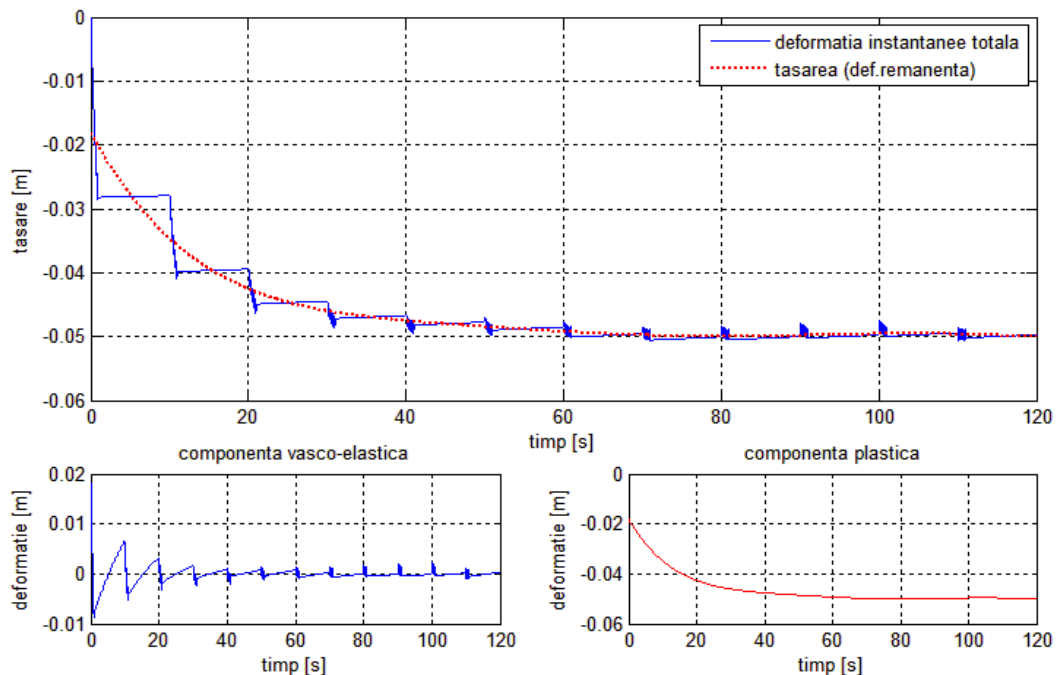


Fig. 7.10*(Fig.7.14) Componenta dinamică și cea remanentă a deformației instantanee a terenului pentru un teren slab coeziv

Valorile reziduale ale tasărilor pe ciclu înregistrate după cea de a noua trecere (și în general, înregistrate spre finalul analizei, după momentul în care nu mai apar modificări semnificative în ceea ce privește valoarea tasării) rezultă datorită erorilor cumulate, provenite din următoarele surse: prelucrarea seturilor de date reale, procedeul de mediere utilizat pentru obținerea valorilor finale, algoritmul de rezolvare a modelului matematic asociat simulatorului virtual, procedeele de optimizare a datelor în vederea prezentării grafice a acestora.

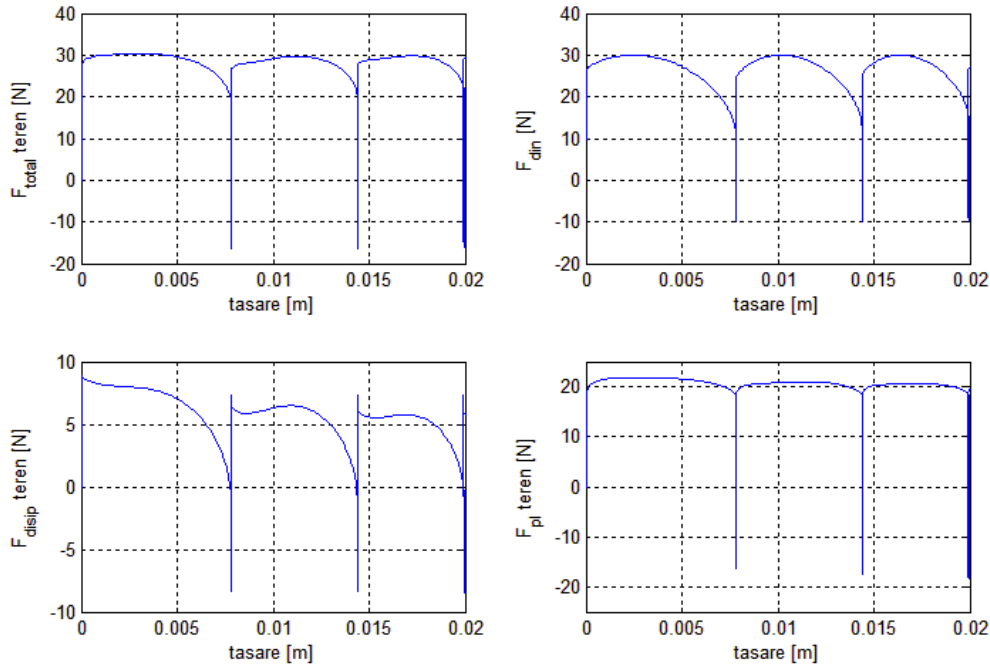


Fig. 7.11*(Fig.7.16) Curbele forță-tasare corespunzătoare acțiunii dinamice a ruloului, răspunsului total al terenului și componentelor disipativă și respectiv plastică ale răspunsului terenului, pentru primul ciclu de solicitare (prima trecere) - pentru un teren slab coeziv

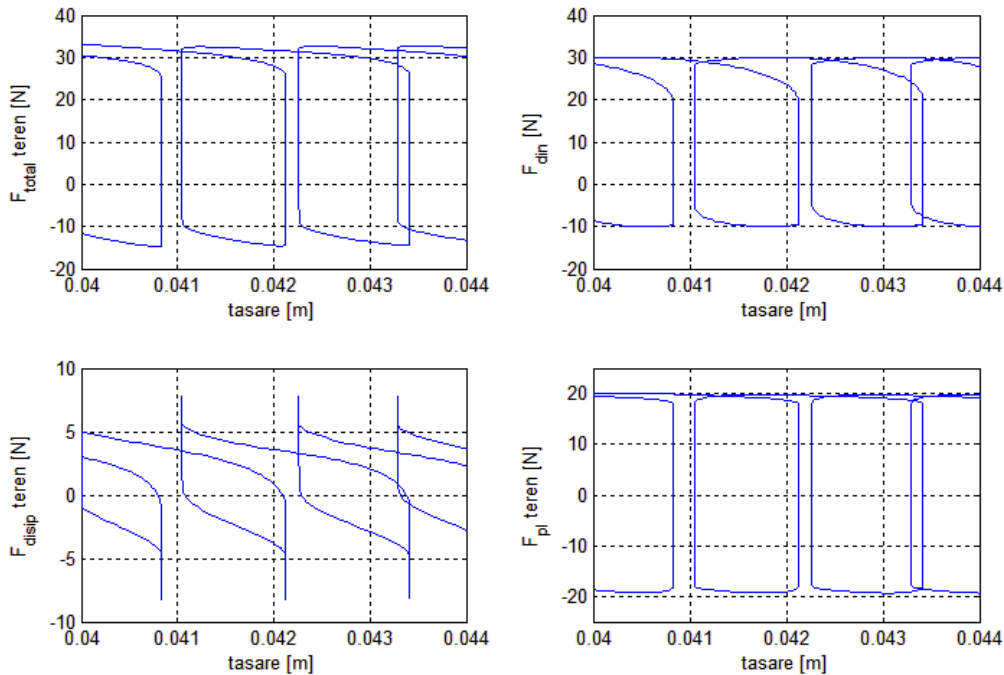


Fig. 7.12*(Fig.7.17) Curbele forță-tasare corespunzătoare acțiunii dinamice a ruloului, răspunsului total al terenului și componentelor disipativă și respectiv plastică ale răspunsului terenului, pentru cel de al treilea ciclu de solicitare (a treia trecere) - pentru un teren slab coeziv

În figura 7.13* sunt detaliate evoluțiile răspunsului total al terenului și a componentelor acestuia în funcție de viteza instantanee pentru un teren slab coeziv.

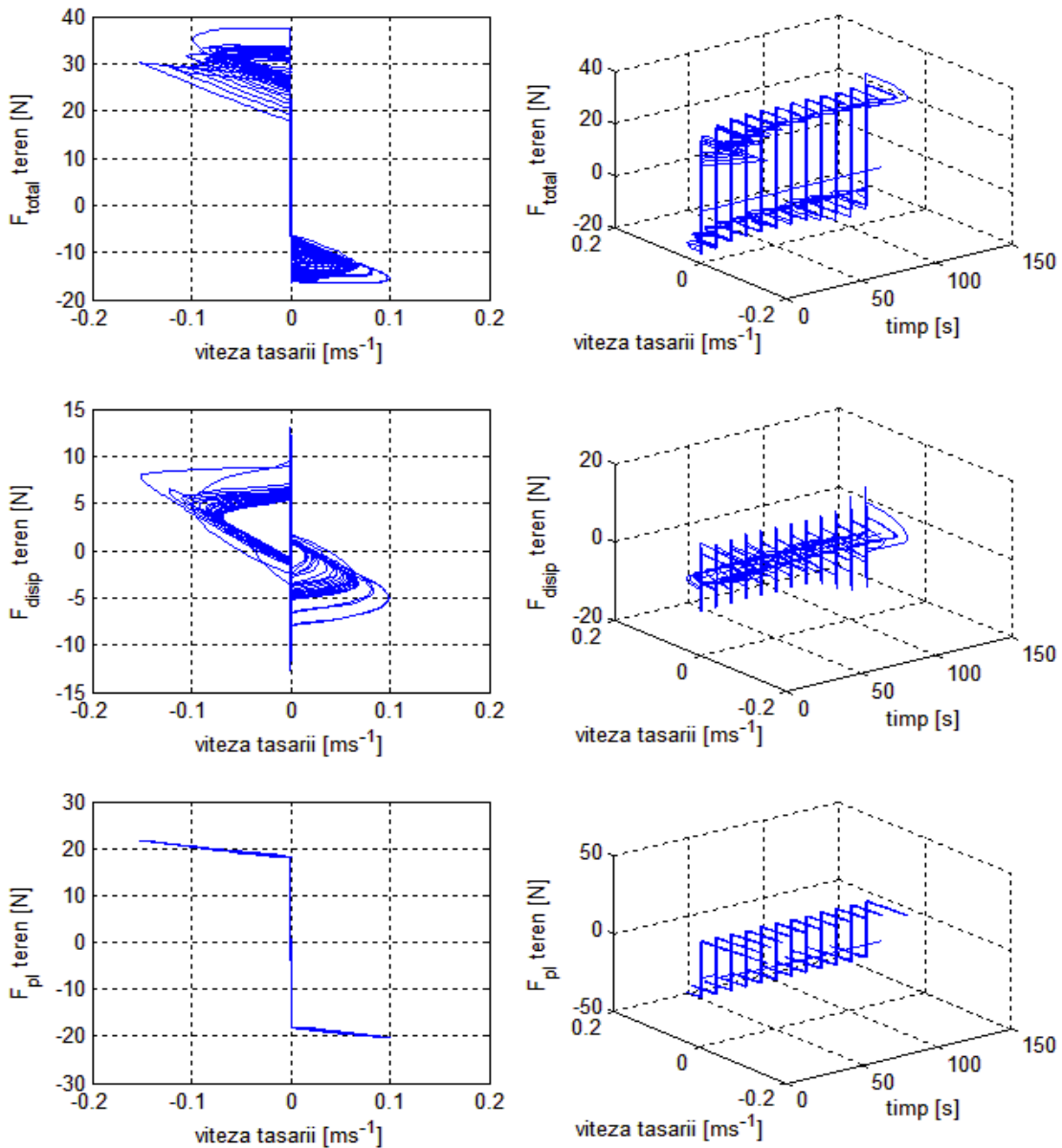


Fig. 7.13*(Fig.7.18) Evoluțiile răspunsului total al terenului și ale componentelor disipativă și respectiv plastică ale acestuia în funcție de viteza instantanee pentru un teren slab coeziv

În figura 7.14* sunt prezentate evoluțiile temporale și compozițiile spectrale corespunzătoare pentru următoarele patru semnale de interes și anume: acțiunea dinamică a ruloului, răspunsul total al terenului și componentele acestuia (disipativă și respectiv plastică). Pentru reprezentarea evoluției în timp a semnalelor a fost considerat un singur ciclu de solicitare, analiza în frecvență fiind realizată însă pentru întreg semnalul înregistrat. Se observă prezența unor componente spectrale dominante în zona frecvențelor de 8,3Hz, 24,9Hz și 41,3Hz, ceea ce înseamnă armonicile de ordin impar. Aceste valori ale frecvențelor se regăsesc pentru toate cele patru semnale evaluate, dar ponderea respectivelor componente spectrale în cadrul fiecărui semnal diferă. Se observă că ponderea majoră a componentelor armonice în răspunsul global al terenului este dată de componenta disipativă.

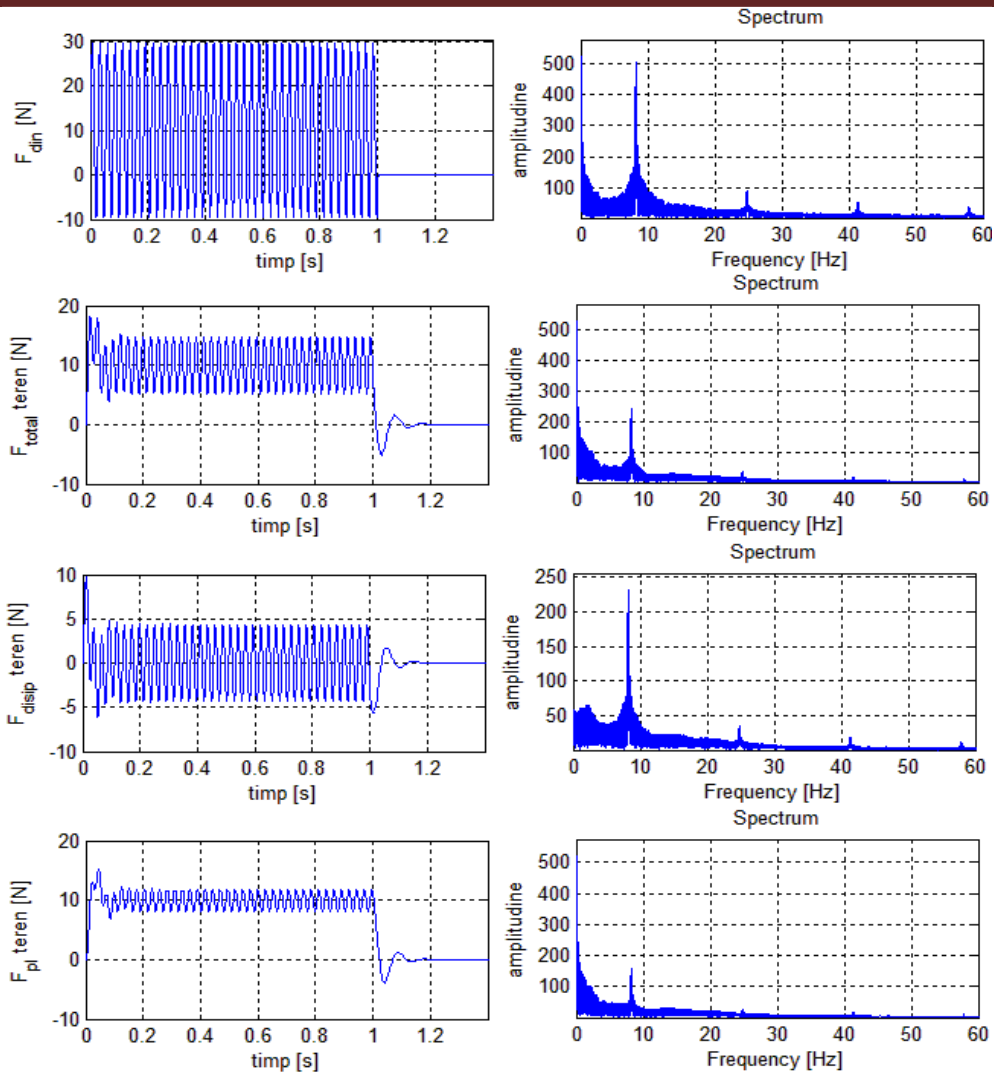


Fig. 7.14*(Fig.7.19) Evoluțiile temporale și compozițiile spectrale (pentru evoluția în timp a fost considerat un singur ciclu de solicitare) - pentru un teren slab coeziv

În figurile 7.15*...7.19* sunt date diagramele de variație ale parametrilor monitorizați.

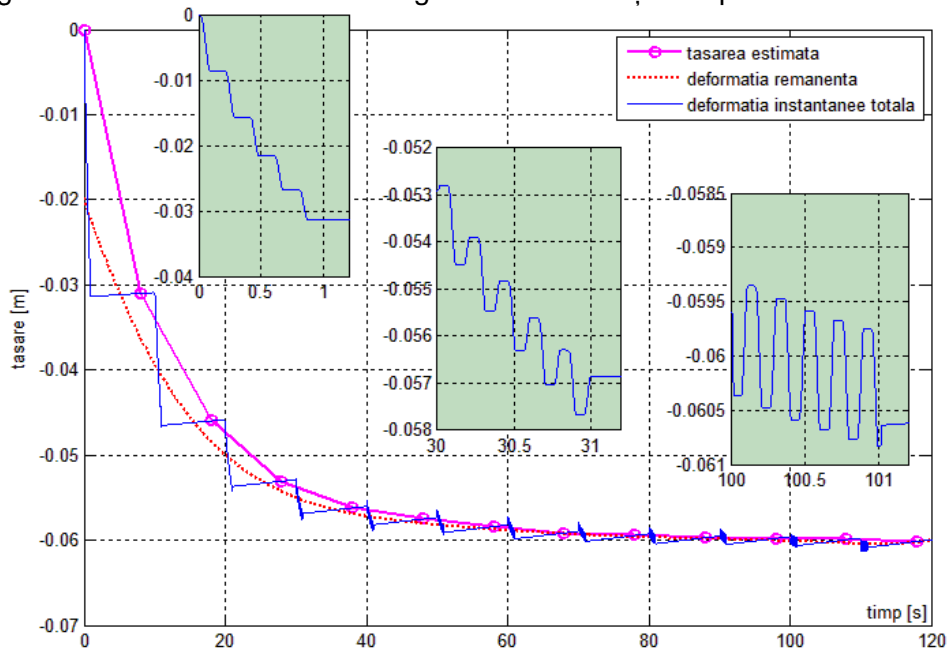


Fig. 7.15*(Fig.7.20) Evoluția deformațiilor totală și remanentă cu evaluarea tasării estimate pentru un teren coeziv

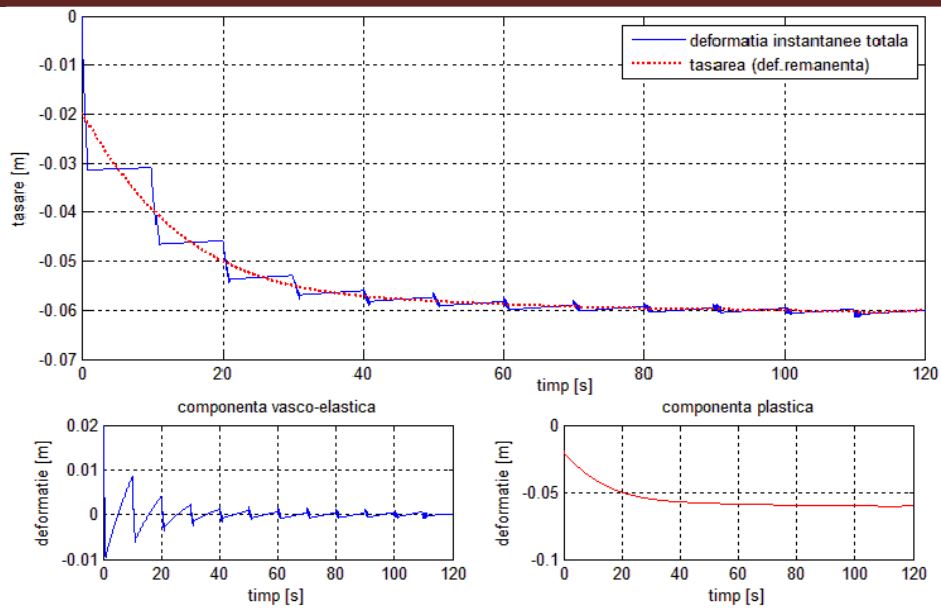


Fig. 7.16*(Fig.7.21) Componenta dinamică și cea remanentă a deformației instantanee a terenului pentru un teren coeziv

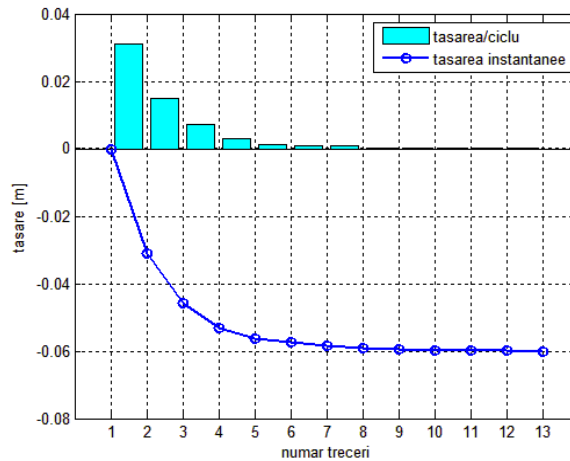


Fig. 7.17*(Fig. 7.22) Evoluția tasării instantanee și a tasărilor pe fiecare ciclu de solicitare pentru un teren coeziv

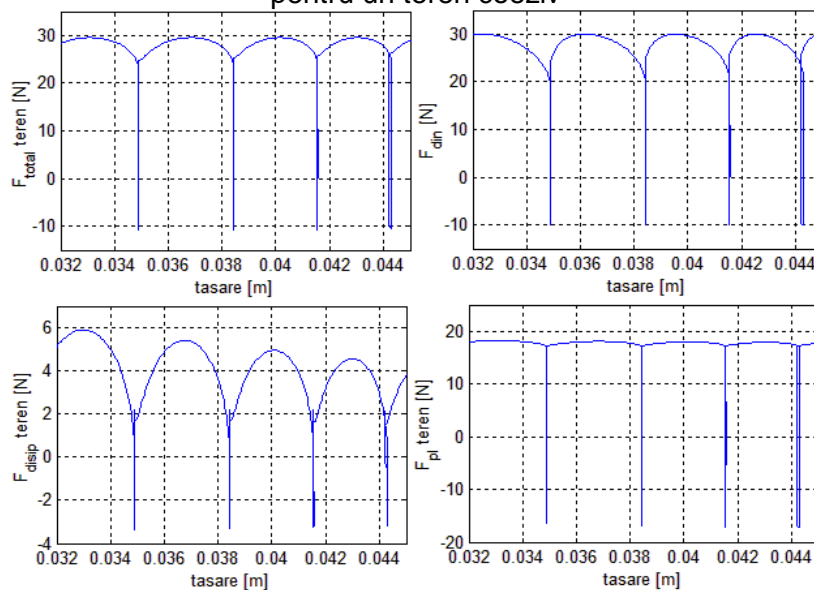


Fig. 7.18*(Fig.7.24) Curbele forță-tasare corespunzătoare acțiunii dinamice a ruloului, răspunsului total al terenului și componentelor disipativă și respectiv plastică ale răspunsului terenului, pentru cel de al treilea ciclu de solicitare (a treia trecere) - pentru un teren coeziv

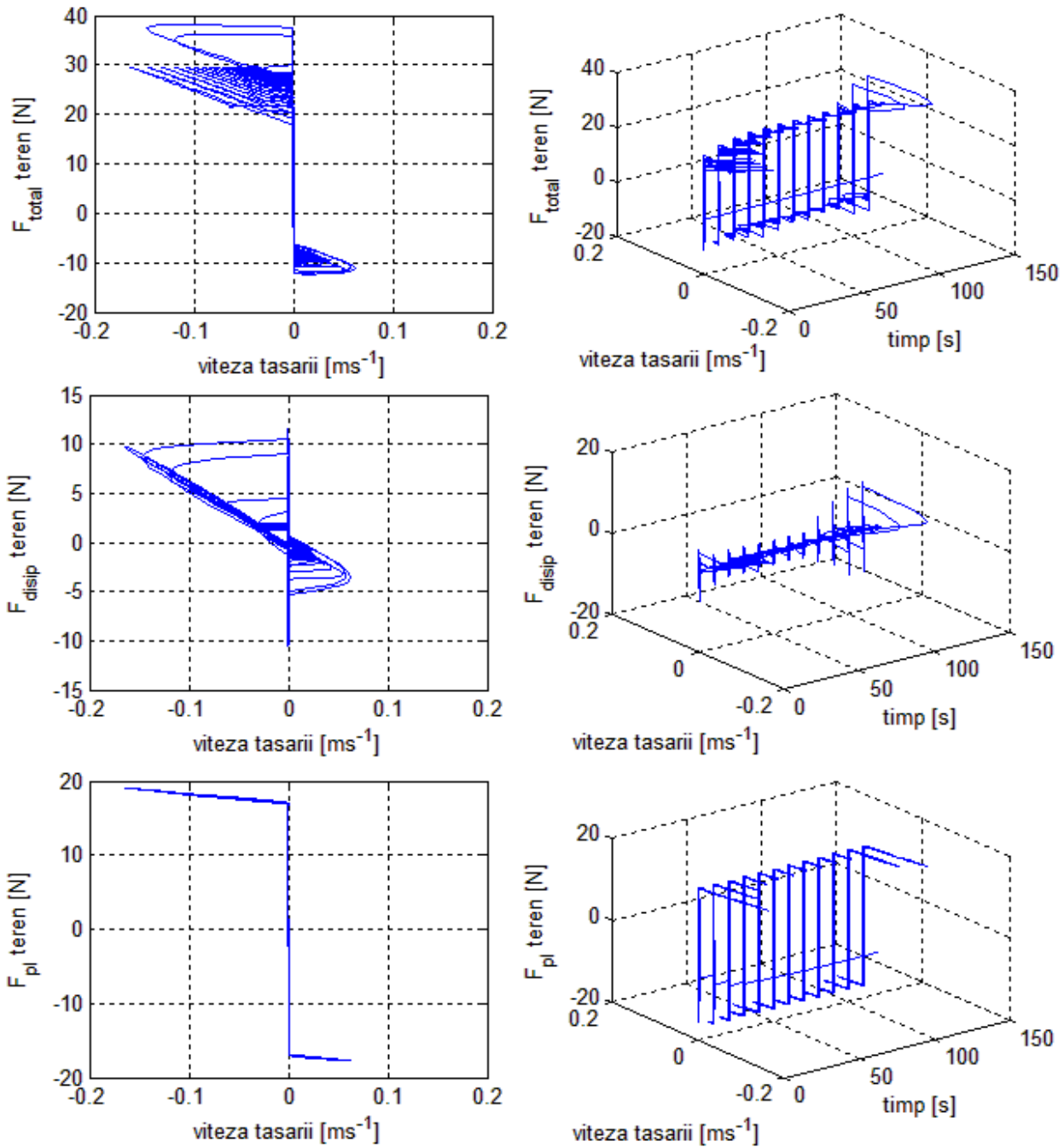


Fig. 7.19* (Fig. 7.25) Evoluțiile răspunsului total al terenului și ale componentelor disipativă și respectiv plastică ale acestuia în funcție de viteza instantanee pentru un teren coeziv

În urma analizei comparative dintre cele două seturi de diagrame (corespunzătoare terenului slab coeziv și respectiv celui coeziv) se observă că prezența mai puternică a componentelor reologice de tip disipativ în modelul comportamental al terenului (a se vedea fig. 7.19*) influențează atât calitativ, cât și cantitativ, evoluțiile parametrilor (fig. 7.15* – 7.17*).

Referitor la acțiunea dinamică a ruloului și la răspunsul terenului, analizând diagramele din fig. 7.20*, se observă prezența tuturor armonicilor, atât cele impare (analog cazul terenului slab coeziv), cât și cele pare.

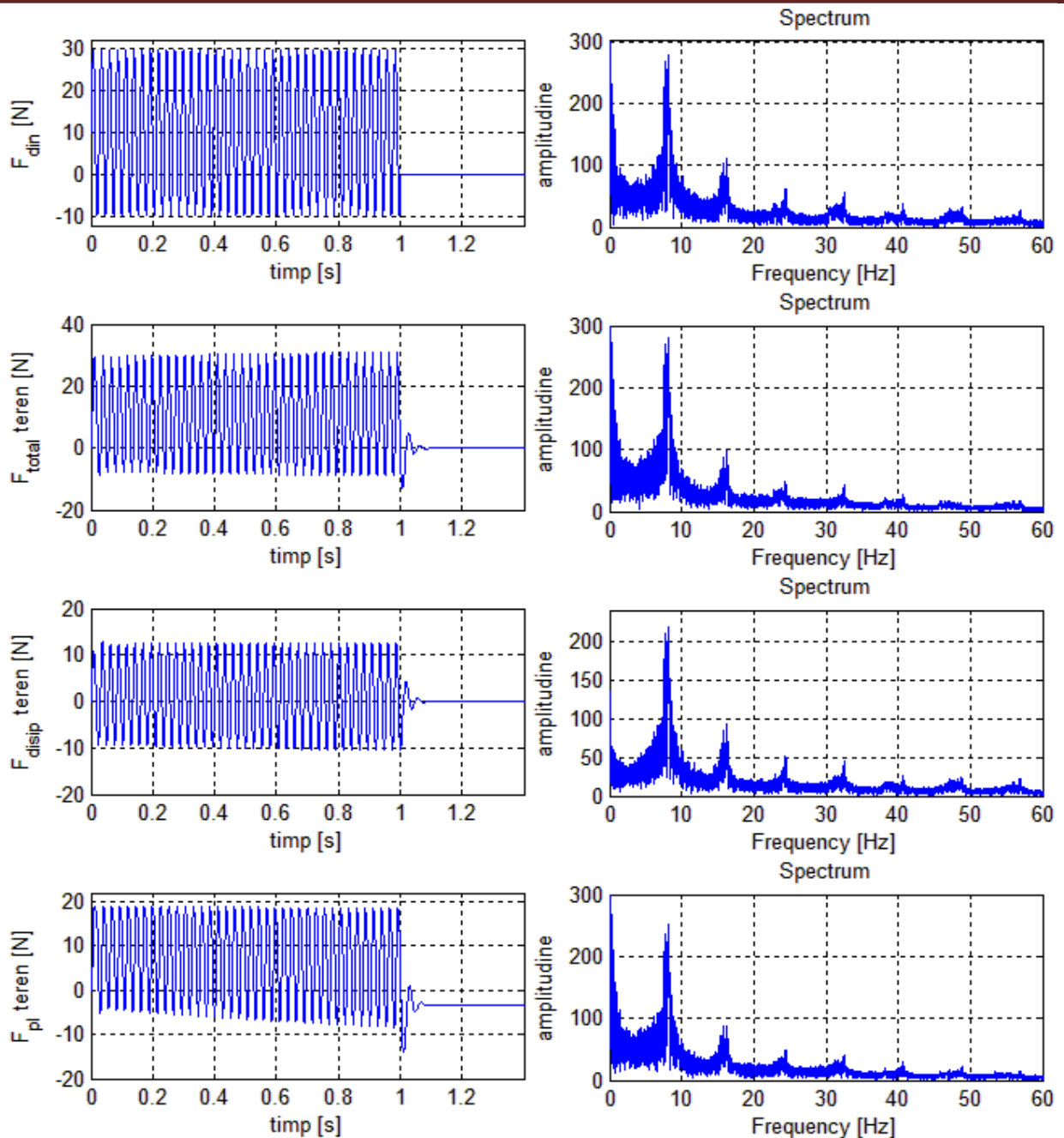


Fig. 7.20* (Fig. 7.26) Evoluțiile temporale și compozițiile spectrale corespunzătoare acțiunii dinamice a ruloului, răspunsului total al terenului și componentelor disipativă și respectiv plastică ale răspunsului (pentru evoluția în timp a fost considerat un singur ciclu de solicitare) - pentru un teren coeziv

Un aspect important este deplasarea spectrală care are loc în timpul procesului de consolidare pentru fiecare ciclu complet de solicitare (trecere a utilajului peste zona monitorizată). Eliminarea componentei conservative (revenirea elastică) din tasarea în regim dinamic forțat contribuie la stabilirea stării finale de consolidare per ciclu de solicitare, cu schimbarea temporară a caracteristicii de rigiditate locală. Analizând comparativ spectrogramele semnalului de excitație, respectiv al celui de răspuns al terenului se observă o deplasare a frecvențelor în sensul majorării acestora – figura 7.21*. Tendința de majorare se manifestă exclusiv între două treceri succesive ale utilajului.

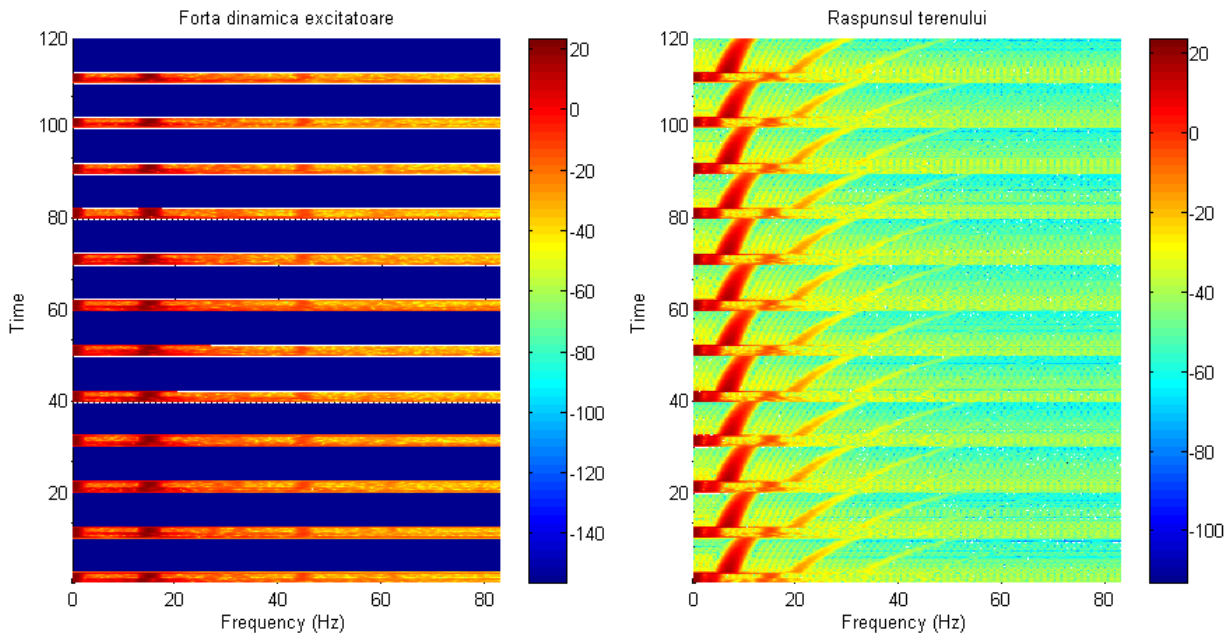


Fig. 7.21*(Fig.7.27) Spectrogramele semnalului de excitare și al răspunsului dinamic al terenului

7.5. Model dinamic inovativ propus pentru simularea compactării terenurilor cu evidențierea fenomenului de propagare a undelor de compresie

În acest paragraf al capitolului este prezentată analiza interacțiunii rului vibrator – teren în condiția unei abordări reologice complexe a zonei de influență directă a vibrațiilor asupra materialului compactat. Scopul principal al acestui studiu constă în formularea unui model complex continuu-discret (Fig. 7.23*) conținând atât mase concentrate cât și distribuite, dedicat analizei procesului de compactare a terenului și evidențierii interacțiunilor dintre mașină și teren. Modelul reologic avansat (dat în Fig. 7.22*) propus pentru simularea comportării terenului se bazează pe teorie dezvoltată în capitolul 4 din teza de doctorat.

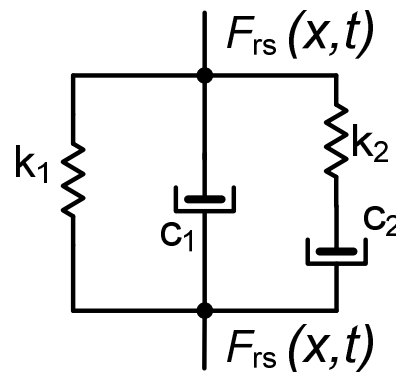


Fig. 7.22*(Fig.7.28) Model reologic avansat pentru simularea compactării terenurilor

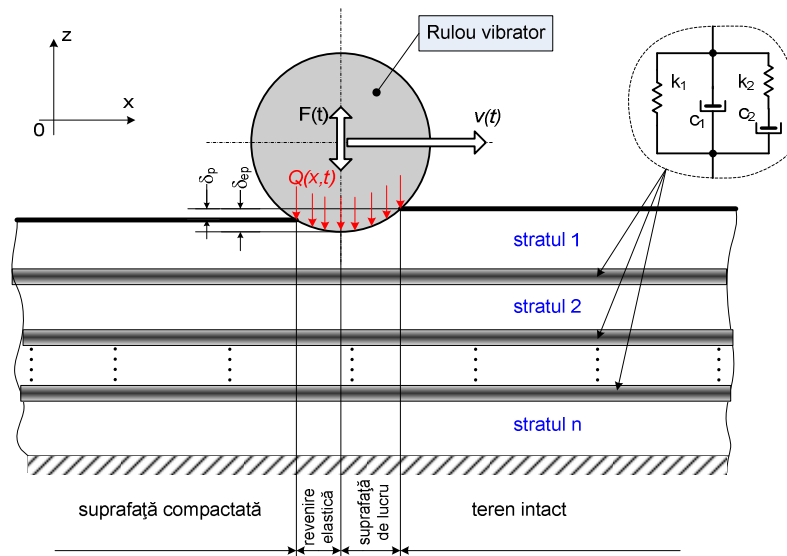


Fig. 7.23*(Fig.7.29) Model dinamic avansat pentru studiul interacțiunii rului-teren cu evidențierea fenomenului de propagare a undelor de compresie

Pe verticală, terenul a fost divizat într-un număr finit de straturi orizontale legate între ele cu legături reologice ca în Figura 7.23*. Comportamentul fiecărui strat a fost simulat folosind teoria lui Euler-Bernoulli pentru o grindă așezată pe o fundație elastică folosind ipoteza lui Winkler. Astfel, abordarea terenului ca o grindă surprinde aspectul continuu al sistemului în ansamblul său, în timp ce legăturile reologice între straturile adiacente corespund abordării reologice propusă și analizată în capitolele anterioare ale tezei. Notațiile folosite în fig.7.23* au următoarele semnificații: δ_p , δ_{ep} reprezintă deformația plastică, respectiv elasto-plastică, instantanee, a stratului curent, $F(t)$ este forța dinamică datorată acțiunii vibratorii și $v(t)$ indică viteza orizontală a echipamentului compactor (care se consideră a fi constantă pe parcursul întregului proces de simulare). Astfel, în diagramele din Figura 7.24* au fost prezentate evoluțiile gradului de compactare pentru al treilea strat (la 8s de la inițializarea procesului de simulare) și în partea dreaptă a figurii (cu linie albă punctată) evoluțiile adâncimii de compactare pentru toată lungimea zonei supusă compactării. Coordona orizontală x variază pe toată lungimea zonei supusă compactării care a fost implicată în această analiză. Echipamentul tehnologic scanează întreaga lungime de la stânga ($x = 0$ m) la dreapta ($x = 20$ m).

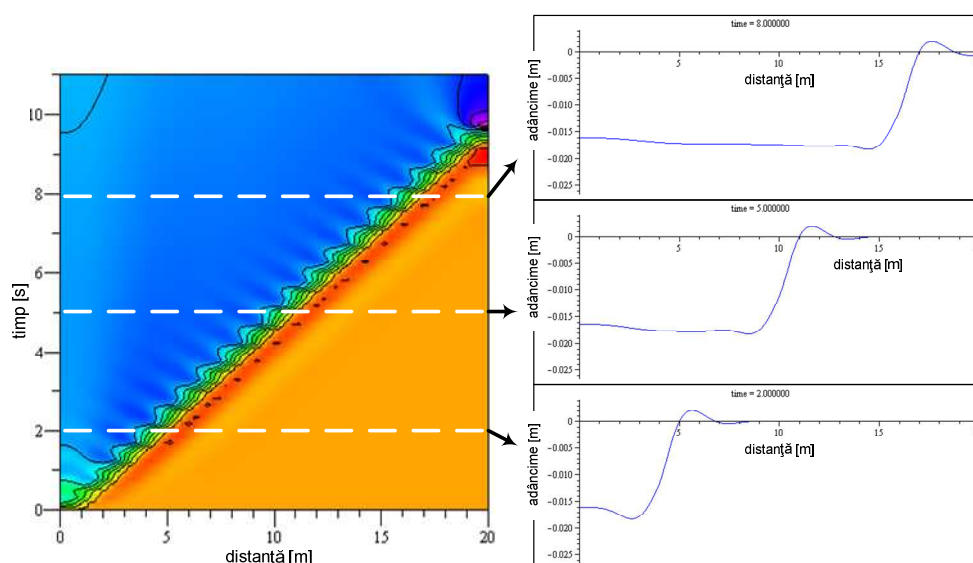


Fig. 7.24*(Fig.7.32) Evoluția în timp a nivelului de compactare în al treilea strat

Se observă că deformațiile totale scad în funcție de numărul de stratului sau, cu alte cuvinte, în funcție de adâncimea absolută a domeniului studiat. În plus, valoarea revenirii elastice scade și perioada de timp a revenirii elastice crește cu adâncimea. Conform faptului că parametrii de rigiditate și de amortizare cresc cu adâncimea, iar coeficientul care caracterizează influența formei fiecărui strat crește de asemenea, observațiile anterioare au fost corecte. Datorită ultimelor două remarci, deformarea permanentă a fiecărui strat capătă o evoluție relativ ascendentă sau aleatoare în timpul întregii simulări. Cu toate acestea, pentru perioade lungi ale timpului de simulare a fost arătat că nivelul de compactare, considerat în termenii deformării verticale permanente, scade în mod clar odată cu adâncimea zonei analizate.

7.6. Concluzii parțiale

Concluzia principală care rezultă din acest capitol este aceea că pentru evaluarea globală a dinamicii procesului de compactare dinamică prin vibrație este necesară utilizarea combinată a modelelor pentru echipamentul tehnologic, cu cele avansate referitoare la reologia terenului (cu optimizarea parametrilor specifici tipologiei zonei de lucru) și cu elemente specifice modului de lucru (implementarea structurii tehnologice de abordare a procesului de compactare dinamică). Cu alte cuvinte, este necesară o preevaluare a răspunsului terenului și stării de solicitare impusă de echipament, urmată de simularea complexă a efectului cumulat provocat de trecerile succesive și de evaluarea în adâncime a gradului de compactare pe toată zona de interes cu simularea dinamicii reale a acțiunii dinamice și cu baleierea acesteia pe întreaga zonă monitorizată.

CAPITOLUL VIII CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII GENERALE DE CERCETARE

8.1. Concluzii

Principala contribuție a tezei de doctorat o constituie dezvoltarea de către autor a unui ansamblu unitar și coerent de modele și sisteme de analiză destinate studiului interacțiunii rului-teren care țin cont de caracteristicile elastice, disipative și plastice ale mediilor analizate și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat.

Concluziile aferente fiecărui capitol din componența tezei de doctorat au fost prezentate în paragrafele anterioare, astfel că în acest capitol se vor evidenția principalele concluzii reieșite din studiul teoretic și cel aplicativ.

În prima parte a tezei de doctorat este prezentată o sinteză bibliografică a cercetărilor din domeniul compactării terenurilor cu ajutorul vibrațiilor.

Cercetările efectuate în această teză au pus în evidență necesitatea dezvoltării și implementării unor modele reologice noi pentru pământuri și a unor modele dinamice adecvate pentru obținerea unor informații cât mai apropiate de realitate, atunci când sunt puse în interacțiune. A fost necesară realizarea unei analize comparative a comportării atât în regim static, cât în special în regim dinamic a echipamentului de compactat în interacțiune cu terenul având la bază modele fizice, reologice, numerice și virtuale. Astfel, au fost elaborate modele cu mai multe grade de libertate ale unui compactor cu un rulu vibrator și modele reologice pentru diferite tipuri de terenuri (coezive sau slab coezive).

Pe baza setului de teste instrumentale „in situ” completate cu o serie de încercări experimentale de laborator, a fost realizată o bază de date (pe baza unui plan sistemic de analiză multi-corelativă) utilă pentru procesul de simulare numerică și virtuală a sistemului rului vibrator - teren. Această bază de date este necesară proceselor de armonizare comportamentală și acordare parametrică a modelelor matematice/numerice propuse cu realitatea identificabilă și măsurabilă a fenomenelor studiate. Astfel, în cadrul tezei au fost selectate din această bază de date acei parametri specifici procesului de compactare prin vibrare constituindu-se apoi mărimi de intrare în modelele adoptate.

Deosebit de importantă este stabilirea și fundamentarea conceptului de validare a setului de modele de interfață propuse în teză în corelație cu evaluarea nivelului de performanță impus gradului final de compactare. Astfel, validarea modelelor a fost posibilă datorită caracterului parametrizat al concepției acestora, putându-se modela cu ușurință diferite tipuri de terenuri, grosimile de straturilor, numărul de treceri, precum și individualizarea fiecărui utilaj de compactare utilizat.

În final, rezultatelor numerice și cele ale scenariilor virtuale au contribuit la fundamentarea setului de cerințe esențiale privind evaluarea răspunsului terenului și stării de solicitare indusă de echipamentul tehnologic, simularea complexă a efectului cumulat provocat de trecerile succesive și evaluarea în adâncime a gradului de compactare pe toată zona de interes cu estimarea dinamicii reale a acțiunii dinamice și cu baleierea acesteia pe întreaga zonă monitorizată.

8.2. Contribuții personale

Concluziile și contribuțiile personale ce rezultă din întreaga activitate de cercetare și prezentate în teza de doctorat evidențiază faptul că obiectivul general al activității doctorale - *elaborarea unui set de modele aplicative care să asigure interfața dintre utilaj și procesul tehnologic prin monitorizarea și controlul parametrilor funcționali și menținerea acestora în zona de optim* - a fost atins prin realizarea următoarelor contribuții personale:

- a) analiza realizărilor relevante atât pe plan național, cât și la nivel internațional în domeniul compactării prin vibrații a terenurilor;
- b) conceperea unui set de modele reologice pe baza sistemelor instrumentale și informatice specializate (Matlab - Simulink/SimMechanics) utile în simularea interacțiunii rului vibrator – teren în procesul de compactare;

-
- c) crearea unei baze teoretice pentru dezvoltarea și fundamentarea modelelor propuse, cu rol aplicativ, ținând cont de caracteristicile elastice, disipative și plastice ale mediilor analizate și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat;
 - d) analiza comportării atât în regim static, dar mai ales în regim dinamic a modelelor reologice finalizată cu identificarea și evidențierea parametrilor specifici privind capacitatea acestora de a simula cât mai aproape de realitate interacțiunea organ de lucru – material procesat;
 - e) asamblarea la nivel teoretic a setului de modele de interfață, prin compunerea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu urmărirea, în scopul optimizării, a următorilor parametri esențiali: complexitatea structurală versus fidelitatea simulării, nivelul de detaliere versus disponibilitatea de rezolvare (calculabilitate numerică);
 - f) elaborarea unui plan de experimentare care a stat la baza setului de teste instrumentale „in situ” completate cu o serie de încercări experimentale de laborator cu scopul de a evidenția influența unor parametri constructivi, funcționali și tehnologici ai compactorului (lungimea și diametrul ruloului vibrator, frecvența și amplitudinea de lucru, forța de excitație, factorul de apăsare liniară) asupra gradului de compactare obținut (implicit asupra tasării straturilor) pentru anumite terenuri testate (slab coezive și coezive);
 - g) stabilirea unor legități funcționale între parametrii care descriu comportamentul pământurilor (necoeziv, slab coeziv și balast) în procesul de compactare (dependența densității pământului în stare uscată funcție de modulul static de deformare liniară, de lățimea amprente de contact dintre rulou și teren, de grosimea optimă, precum și de tasarea stratului din componența sistemului rutier; dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de coeficientul de rigiditate, de forța de rezistență, precum și de efortul unitar axial de compactare a terenului);
 - h) armonizarea comportamentală și acordarea parametrică a modelelor matematice/numerice/virtuale cu realitatea identificabilă și măsurabilă pe baza testelor experimentale efectuate;
 - i) stabilirea configurației finale a modelelor propuse prin acordarea caracteristicilor de lucru ale acestora astfel încât procesul tehnologic să se desfășoare în condiții optime și să se obțină gradul de compactare prescris funcție de tipul terenului și de destinația acestuia.

8.3. Direcții generale de cercetare

Analizând rezultatele obținute, studiul din această teză poate fi continuat abordând una sau o combinație a celor de mai jos:

- îmbunătățirea preciziei de măsurare a parametrilor monitorizați în timpul compactării prin utilizarea aparatelor/sistemelor de măsură de ultimă generație care înregistrează în timp real variația acestora;
 - adaptarea și dezvoltarea modelelor propuse folosind legități neliniare complexe de variație a parametrilor constitutivi implicați în procesul de compactare;
- conceperea unui dispozitiv/sistem/aparat care să poată monitoriza în timp real, achiziționa, stoca și prelucra variația parametrilor semnificativi ai procesului de compactare în vederea automatizării procesului de reglaj/control in situ al caracteristicilor de lucru ale utilajului funcție de răspunsul terenului.

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE ȘI PREZENTATE

- [1] Bratu, P., **Căpătână, G.F.**, *The Behavior Linear Viscoelastic of Asphalt Mixture To the Haversine Impulsive Dynamics Actions Specific in Road Traffic*, A 8-a Conferința Internațională Acustică.Vibrații.Acțiuni seismice. Sisteme inteligente de protecție, Resița, ISSN 1584-7284, 21-23 octombrie 2009, [Index-BDI](#);
- [2] Bratu, P., **Căpătână, G.F.**, *Comportarea Vascoelastică Liniară a Mixturii Asfaltice La Acțiuni Dinamice Impulsive Haversine Specifice Traficului Rutier*, Al XV-lea Simpozion Național de Utilaje pentru Construcții, SINUC, București, ISBN-978-973-100-050-317-18, dec. 2009;
- [3] Bratu, P., **Căpătână, G.F.**, Debeleac, C., *Analiza raspunsului dinamic al unui rulu vibrator in interactiune cu sistemul rutier*, A X-a Sesiune de comunicari stiintifice a Catedrei de Mecanica tehnica si Mecanisme (SIMEC), Bucuresti, 31 Martie, ISSN 1842-8045, 2011;
- [4] **Căpătână, G.F.**, Debeleac, C., *Computational Method for the Study of the Interaction between Vehicle Tires and the Flexible Pavements*, EAA Euroregio Ljubljana, Journal of the European Acoustic Association – EAA, International Journal on Acoustics, Acta Acustica united with Acustica, E 21466, Vol. 96, Suppl.1, Abstract nr. 227, pp. S 65, 2010, [Index-BDI](#);
- [5] **Căpătână, G.F.**, *Modele reologice ale sistemelor rutiere*, Raport științific nr.1, Teză doctorat, Facultatea de Inginerie Brăila, 08.02.2011;
- [6] **Căpătână, G.F.**, Debeleac, C., Năstac, S., *On Dynamics of Vibratory Compactors based on Complex Interaction with Terrain*, Annual Symposium Of The Institute Of Solid Mechanics - SISOM 2011 And Symposium of Acoustics, Academy Of Technical Sciences, Commission of Acoustics of Romanian Academy, Bucharest, Romania, May 26-27, 2011, [Index-BDI](#);
- [7] **Căpătână, G.F.**, *Analiza structurală a rulourilor vibratoare pentru lucrări de drumuri*, Raport științific nr.2, Teză doctorat, Facultatea de Inginerie Brăila, 07.06.2011;
- [8] **Căpătână, G.F.**, Năstac, S., *Reologia interacțiunii complexe dintre ruloul vibrator și materialul compactat*, Al XVII-lea Simpozion Național de Utilaje pentru Construcții - SINUC 2011, București, 15– 16 Decembrie, 2011;
- [9] **Căpătână, G.F.**, *Răspunsul dinamic al rulourilor vibratoare în procesul de compactare a sistemelor rutiere*, Raport științific nr.3, Teză doctorat, Fac. de Inginerie Brăila, 20.03.2012;
- [10] **Căpătână, G.F.**, *Dynamic behaviour of complex interaction between vibratory drum equipment and natural terrain based on rheological evaluations*, 10th HSTAM International Congress on Mechanics Chania, 25 – 27 May, Crete, Greece, 2013, [Index-BDI](#);
- [11] **Căpătână, G.F.**, *Basic approaches of complex interaction drum-terrain for vibratory compaction*, Multi Conference on Systems and Structures SysStruc"13", Analele universității "Eftimie Murgu", 26-28 Septembrie, Reșița, România, ISSN 1453-7397, 2013, [Index-BDI](#);
- [12] **Căpătână, G.F.**, *Complex continuous-lumped model for simulation of vibratory compaction process*, The 5th International Conference Computational Mechanics and Virtual Engineering "COMEC" 24-25 Octombrie, Brașov, România, 2013, [Index-BDI](#);
- [13] **Căpătână, G.F.**, *Analytical and computational assessments in vibratory compaction process*, The 4th International Conference „Advanced Engineering in Mechanical Systems” “ADEMS” 24-25 Octombrie, Cluj, ISBN 978-606-19-0225-5, 2013, [Index-BDI](#);
- [14] **Căpătână, G.F.**, *Dynamic simulation of the vibratory roller-terrain interaction using an elastoplastic approach*, Analele universității “Dunărea de Jos din Galați”, Fascicolul XIV, Inginerie Mecanică, ISSN 1224-5615, 2013; (lucrare acceptată in curs de publicare) [Index-BDI](#).
- [15] Năstac, S., Debeleac, C., **Căpătână, G.F.**, *Dinamica manipuloarelor seriale destinate intervenției în situații de urgență*, Al XVII-lea Simpozion Național de Utilaje pentru Construcții - SINUC 2011, 15– 16 Decembrie, București, 2011;
- Potirniche, A., Năstac, S., Leopa, A., Debeleac, C., **Căpătână, G.F.**, *On unitary rheological approach of vibration isolation passive devices*, The 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering", April 19-21, Tallinn, Estonia, 2012, [Index-ISI Proceedings](#).
-

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [5] Ammann *Compaction Equipment*, Brochure, Ammann Verdichtung AG, Langenthal, Swiss;
- [6] Anderegg, R., *ACE AMMANN Compaction Expert – Automatic Control of the Compaction*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, pp. 229-236, 2000;
- [10] Axinti, G., Axinti, A., S., *Acționări hidraulice și pneumatice. Dinamica echipamentelor și sistemelor*, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2008;
- [11] Axinti, G., Axinti, A., S., *Acționări hidraulice și pneumatice. Baze de calcul, proiectare, exploatare, fiabilitate și scheme de acționare*, Vol. III, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2009;
- [12] Axinti, G., *Proceduri experimentale. Analiza experimentală asistată de calculator*, Vol. 1, Editura Impuls, București, 2010;
- [14] Bomag *E, and Variocontrol*, Technical Paper, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany;
- [15] Bowels, J. E., *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, McGraw Hill, 1979;
- [16] Bratu, P., *Stabilirea regimului dinamic de funcționare a cilindrilor compactori vibratorii cu două trepte de amortizare*, Studii și cercetări INCERC, nr. 5, 1974;
- [17] Bratu, P., *Influența sistemului elastic de amortizare asupra parametrilor dinamici la cilindrii compactori vibratorii*, Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1980;
- [18] Bratu, P., *Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje*, Ed. Tehnică, București, 1990;
- [19] Bratu, P., *Vibrațiile sistemelor elastice*, Ed. Tehnică, București, 2000;
- [21] Bratu, P., *Structural requirements imposed to vibration systems*, IJAV, Vol.5, Issue 2, pp.15-18, 2001;
- [23] Bratu, P., *The behavior of nonlinear viscoelastic systems subjected to harmonic dynamic excitation*, The 9th International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002;
- [36] Bratu, P., Căpățână, G.F., Debeleac, C., *Analiza răspunsului dinamic al unui rulou vibrator în interacțiune cu sistemul rutier*, A X-a Sesiune de Comunicări Științifice a Catedrei de Mecanică tehnică și Mecanisme (SIMEC), București, 31 Martie, ISSN 1842-8045, 2011;
- [41] Căpățână, G.F., *Modele reologice ale sistemelor rutiere*, Raport științific nr.1, Teză doctorat, Facultatea de Inginerie Brăila, 08.02.2011;
- [42] Căpățână, G.F., Debeleac, C., Năstac, S., *On Dynamics of Vibratory Compactors based on Complex Interaction with Terrain*, Annual Symposium Of The Institute Of Solid Mechanics - SISOM 2011 And Symposium of Acoustics, Academy Of Technical Sciences, Commission of Acoustics of Romanian Academy, Bucharest, Romania, May 26-27, 2011;
- [43] Căpățână, G.F., *Analiza structurală a rulourilor vibratoare pentru lucrări de drumuri*, Raport științific nr.2, Teză doctorat, Facultatea de Inginerie Brăila, 07.06.2011;
- [44] Căpățână, G.F., Năstac, S., *Reologia interacțiunii complexe dintre ruloul vibrator și materialul compactat*, Al XVII-lea Simpozion Național de Utilaje pentru Construcții - SINUC 2011, București, 15– 16 Decembrie, 2011;
- [45] Căpățână, G.F., *Răspunsul dinamic al rulourilor vibratoare în procesul de compactare a sistemelor rutiere*, Raport științific nr.3, Teză doctorat, Facultatea de Inginerie Brăila, 20.03.2012;
- [46] Căpățână, G.F., *Dynamic behaviour of complex interaction between vibratory drum equipment and natural terrain based on rheological evaluations*, 10th HSTAM International Congress on Mechanics Chania, 25 – 27 May, Crete, Greece, 2013
- [47] Căpățână, G.F., *Basic approaches of complex interaction drum-terrain for vibratory compaction*, Multi Conference on Systems and Structures SysStruc"13", Analele universității "Eftimie Murgu", 26-28 Septembrie, Reșița, România, ISSN 1453-7397, 2013;
- [51] Cui, X., *Real-time diagnosis method of compaction state of subgrade during dynamic compaction*, Geotechnical Testing Journal. Vol. 33, No. 4, 2010;
- [54] Daniel, D., Benson, C.H., *Water content-density criteria for compacted soil liners*. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 116, No.12, pp.1811-1830, 1990;
- [63] Floss, R. and Kloubert, H.-J., *Newest Developments in Compaction Technology*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, May 19th, pp. 247-261, France, 2000;
- [64] Ganciu, T. *Identificarea sistemelor*, Editura Nord-Est, Iași, Romania, 1995;
- [71] Holtz, R. D., *State of the Art Report 8: Guide to Earthwork Construction*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1990;

- [72] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice Hall, 2010;
- [77] Lambe, T. W., Whitman, R. V., *Soil mechanics*, John Wiley & Sons, 553 pagini, 1969;
- [78] Legendi, A., Bausic, F., Pavel, C., Panaitescu, L., *Elemente de mecanica teoretică și analitică*, Editura Matrix Rom, București, 2012;
- [83] Mihăilescu, Șt., Bratu, P., Goran, V., Vlădeanu, A., Aramă, Ș., *Mașini de Construcții 2*. Editura tehnică, București, România, 1985;
- [84] Mihăilescu, Șt., Zafiu, Gh., Gaidoș, A., Bratu, P., Vlădeanu, A., Mihăilescu, S., *Tehnologii și utilaje pentru executarea, întreținerea și reabilitarea suprastructurilor de drumuri*. Executarea suprastructurilor de drumuri, Editura Impuls, Vol. I, București, 2005;
- [85] Modiga, M., *Introducere în mecanica mediilor continue și în mecanica microstructurală*, Editura Tehnica, București, Romania, 2001;
- [86] Nicoară, Ș.V., *Contribuții la compactarea mediilor poroase în construcțiile de retenție*, Teză de doctorat, Universitatea “Politehnică” Timișoara, Facultatea de Hidrotehnică, 2003;
- [100] Nowacwi, W.K, *Problemes de la rheologie*, Symposium Franco-Polonais, Varsovia, Edit. Inst. de rech. Fond. de la tehn. Acad. Pol. Des Sciences Varsovia, 1973;
- [107] Proctor, R. R., *Fundamentals principles of soil compaction*. Engineering news-record. Vol. 111, No. 9, 245-248, 1933;
- [109] Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*, W.J. Hall, 1970;
- [112] Rollings, M. P., Rollings, R. R., *Geotechnical materials in construction*, McGraw-Hill, 1996;
- [113] Santamarina, J. C., *Soils and waves particulate materials behavior, characterization and process monitoring*, Wiley, 2001;
- [117] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., *Evaluation of the Influence of Geogrid Reinforcement on soil Rotation and Stiffness in Compacted Based Course Soil*, Transportation Research Record. No. 2116, 76 – 84, 2009;
- [118] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., *Mechanistic method for determining the resilient modulus of base course materials based on elastic wave measurements*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 136, No. 8, pp.1086 -1094, 2009;

Site-uri internet, cataloage de produse

- [1] ***, www.ammann.com accesat la data de 28.05.2013
- [2] ***, www.bomag.com accesat la data de 24.05.2013
- [3] ***, <http://www.cat.com> accesat la data de 5.06.2012
- [4] ***, www.hamm.com accesat la data de 19.02.2012
- [5] ***, Geodynamik Brochure
- [6] ***, Bomag Brochure
- [7] ***, Catterpillar Brochure
- [8] ***, Ammann Brochure
- [9] ***, Hamm Brochure
- [10] ***, Vogel Brochure

Standarde, normative

- [11] ***, Caietul 1 al Normativului privind îmbunătățirea terenurilor de fundare slabe, prin procedee mecanice, Indicativ C 29/1991. Buletinul construcțiilor nr. 8/1991.
- [12] ***, Normativ privind executarea lucrărilor de terasamente pentru realizarea fundațiilor construcțiilor civile și industriale, Indicativ C 169-88. Buletinul construcțiilor nr. 5/1988.
- [13] STAS 8942/1-89. Teren de fundare. Determinarea compresibilității pământurilor prin încercarea în edometru.
- [14] STAS 8942/3-90. Teren de fundare. Determinarea modulului de deformație liniară prin încercări pe teren cu placa.
- [15] STAS 9850-89. Lucrări de îmbunătățiri funciare. Verificarea compactării terasamentelor.
- [16] STAS 1913/1-82. Teren de fundare. Determinarea umidității.
- [17] STAS 1913/2-76. Teren de fundare. Determinarea densității scheletului pământului.
- [18] STAS 1913/13-83. Teren de fundare. Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor.
- [19] STAS 1913/15-75. Teren de fundare. Determinarea greutateii volumice, pe teren.