

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

ANALIZA NIVELULUI DE PERFORMANȚĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN VIBRARE A MATERIALELOR DE CONSTRUCȚII LA PUNEREA ÎN OPERĂ

Doctorand,

Ing. Andrei BURAGA

Conducător științific,

Prof. univ. dr. habil. ing. Carmen Nicoleta DEBELEAC

Seria I 6: Inginerie mecanică Nr. 75

GALAȚI

2024

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**ANALIZA NIVELULUI DE PERFORMANȚĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN
VIBRARE A MATERIALELOR DE CONSTRUCȚII LA PUNEREA ÎN OPERĂ**

Doctorand

Ing. Andrei BURAGA

Președinte	Conf. univ. ec. dr. ing. Adrian Mihai Goanță Universitatea „Dunărea de Jos,, din Galați
Conducător științific	Prof. univ. dr. habil. ing. Carmen Nicoleta Debeleac Universitatea „Dunărea de Jos,, din Galați
Referenți științifici	Prof. univ. em. dr. ing. DHC Paul Polidor Bratu Universitatea „Dunărea de Jos,, din Galați
	Prof. univ. dr. ing. Cristian Pavel Universitatea Tehnică de Construcții București
	Conf. univ. dr. habil. ing. Ovidiu Vasile Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Seria I 6: Inginerie mecanică Nr. 75

GALAȚI

2024

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

Domeniul fundamental 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**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
- Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

Mulțumiri

Doresc să adresez cu mult respect mulțumiri conducătorilor mei de doctorat domnului Prof. univ. em. dr. ing. DHC Polidor Paul Bratu și doamnei Prof. univ. dr. habil. ing. Carmen Nicoleta Debeleac pentru sprijinul acordat pe tot parcursul pregătirii mele în stagiul școlii doctorale, atât pentru atenta îndrumare științifică, cât și pentru încrederea acordată.

Mulțumesc și membrilor din comisia de îndrumare, Prof. univ. dr. habil. ing. Silviu Marian Năstac și Conf. dr. ing. Adrian Leopa pentru sprijinul competent și permanent pe care mi le-au acordat în stagiul doctoral și de la care am primit direcții de documentare și sugestii pentru elaborarea tezei.

Nu în ultimul rând, doresc să adresez mulțumiri familiei mele pentru susținerea în toată această perioadă a pregătirii mele în școala doctorală.

*Brăila,
15.11.2023*

Ing. Andrei BURAGA

Cuvinte cheie: compactare prin vibraare, pământ slab coeziv, punere în operă, analiză, nivel de performanță, estimare, grad compactare, număr de treceri

CUPRINS

	Pag. teză	Pag. rezumat
Introducere		
1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul procesului de compactare cu vibrații	9	2
2. Automatizarea controlului și asigurarea calității procesului de compactare prin monitorizare și digitalizare.....	17	4
2.1. Exemple de bune practici la nivel internațional.....	17	4
2.2. Digitalizarea industriei românești în contextul Industriei 4.0.....	26	8
3. Metode de analiză a procesului de compactare prin investigații de laborator și „in situ” a pământurilor folosite la fundațiile rutiere.....	33	9
3.1. Evaluarea parametrilor geotehnici ai terenurilor de compactare.....	33	9
3.1.1. Teste efectuate în condiții de laborator.....	33	-
3.1.2. Teste efectuate in situ.....	35	-
3.2. Încercări „in situ” pentru evaluarea parametrilor terenurilor de compactat.....	36	9
3.2.1. Parametri de identificare a sistemului rulo-teren.....	36	9
3.2.2. Durata de compactare a pământurilor și a efortului efectiv de consolidare.....	36	10
3.2.3. Încercări experimentale pentru determinarea modulilor de elasticitate E, G și a amortizării critice a terenului.....	38	10
3.2.4. Sistemizarea datelor experimentale pentru stabilirea modelului pământului în procesul de compactare.....	40	10
4. Evaluarea experimentală „in situ” a procesului de compactare statică și dinamică.....	45	11
4.1. Determinări experimentale pentru identificarea evoluției gradului de compactare a pământului.....	45	11
4.2. Determinări experimentale pentru identificarea comportării sistemului mașină – teren în procesul de compactare.....	49	12
4.3. Corelații interparametrice determinate pe baza investigațiilor de laborator și experimentale in situ pentru caracterizarea performanței compactării.....	55	16
4.3.1. Legea dependenței dintre modulul longitudinal static și densitatea în stare uscată.....	55	16
4.3.2. Legea dependenței dintre densitatea în stare uscată și umiditatea medie.....	58	17
4.3.3. Legea dependenței dintre lățimea petei de contact, grad de compactare, tasare, număr de treceri.....	61	18
4.3.4. Legea dependenței presiunii specifice din teren și tasare....	62	20
4.3.5. Legea dependenței rigidității și frecvenței proprii a terenului de densitatea în stare uscată.....	63	20
4.3.6. Legea dependenței tasării de numărul de treceri ale compactorului stabilită pentru fiecare tip de teren analizat....	63	20
4.3.7. Legea dependenței gradului de compactare de numărul de treceri ale compactorului stabilită pentru fiecare tip de teren analizat.....	66	22
4.4. Concluzii parțiale.....	70	25

5. Modelarea reologică și simularea interacțiunii rulou-teren.....	71	25
5.1. Principiile de lucru ale vibratoarelor inerțiale pentru creșterea eficienței procesului de compactare.....	71	25
5.2. Modelarea și simularea numerică a proceselor vibratorii pe baza schematizării reologice tip Voigt-Kelvin.....	72	-
5.2.1. Considerații generale.....	72	-
5.2.2. Modelarea matematică a răspunsului terenului la excitație dinamică inerțială armonică.....	74	25
5.2.3. Modelarea matematică a răspunsului terenului (cu rigiditate variabilă) la excitație dinamică inerțială armonică.....	76	26
5.2.4. Simularea numerică a răspunsului terenului la excitație dinamică inerțială armonică.....	77	27
5.2.5. Concluzii parțiale.....	89	39
5.3. Simularea procesului de compactare statică pe baza modelului teoretic propus (MTC) pentru caracterizarea comportamentului unui teren când se cunosc parametrii geotehnici inițiali.....	90	39
5.3.1. Precizări despre datele de intrare în algoritmul de calcul al modelului MTC.....	90	39
5.3.2. Rezultatele simulării.....	90	40
5.3.3. Concluzii parțiale.....	94	42
5.4. Modelarea și simularea comportării pământurilor slab coezive în procesul de compactare, cu evidențierea tasării pe modele reologice (MRTTC, EVP).....	94	43
5.4.1. Descrierea modelului MRTTC.....	96	43
5.4.2. Rezultatele simulării.....	99	43
5.4.3. Concluzii parțiale.....	101	45
5.4.4. Descrierea modelului EVP.....	102	45
5.4.5. Rezultatele simulării.....	104	47
5.4.6. Concluzii parțiale.....	107	48
5.5. Modelarea și simularea dinamică a interacțiunii teren – rulou vibrator folosind modele cu mai multe grade de libertate (MRIETC 1, MRIETC 2).....	107	49
5.5.1. Stadiul cunoașterii.....	107	49
5.5.2. Modelarea și simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 1).....	110	49
5.5.3. Modelarea și simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 2).....	114	52
5.5.4. Concluzii parțiale.....	122	57
6. Concluzii, contribuții personale și direcții generale de cercetare.....	123	58
6.1. Concluzii.....	123	58
6.2. Contribuții personale.....	124	59
6.3. Direcții generale de cercetare.....	124	59
Anexe.....	125	-
Lista de lucrări publicate și prezentate.....	136	60
Bibliografie.....	137	61

Introducere

Oportunitatea tezei de doctorat se încadrează în contextul actual, a tendinței de maximizare a eficienței operaționale a activităților din domeniul construcției drumurilor, prin extinderea preocupărilor în găsirea unor soluții de realizare a compactării terenurilor sau straturilor de fundare din componența sistemelor rutiere prin punerea în operă a compactoarelor cu rulouri vibratoare capabile să execute la un nivel de calitate impus procesul tehnologic.

În acest sens s-a analizat comportamentul pământurilor slab coezive la acțiunea utilajelor de compactare (în regim static și dinamic) în vederea atingerii gradului de performanță impus în conformitate cu documentația tehnică a lucrării respective.

Scopul prezentei teze de doctorat constă în conceperea unor modele teoretice și reologice care să stea la baza analizei procesului de compactare a pământurilor prin cunoașterea parametrilor definitorii pentru estimarea evoluției stării terenului după numărul de treceri ale utilajului. În acest sens principalele obiective sunt:

- a) identificarea criteriilor și cerințelor actuale cu privire la monitorizarea și controlul calității execuției lucrărilor de compactare cu vibrații;
- b) sistematizarea metodologiilor de realizare a testelor de laborator și in situ pentru identificarea stării inițiale a terenului (din categoria pământurilor slab coezive), precum și a gradului de compactare atins după un număr impus de treceri. Referințele documentare au avut la bază standardele și normativele specifice aplicabile în domeniul compactării pământurilor, precum și rezultatele rapoartelor de teste și încercări efectuate pe pământuri slab coezive din România în cadrul Institutului de cercetări ICECON S.A. București și a Laboratorului geotehnic din cadrul INCERC București;
- c) fundamentarea conceptului de model interactiv în procesul tehnologic de lucru cu compactoarele, printr-o estimare calitativă a performanței procesului de compactare;
- d) identificarea corelațiilor dintre evoluțiile parametrilor definitorii pentru evaluarea performanței procesului de compactare, prin stabilirea unor legi de aproximație între aceștia;
- e) crearea unor modele de calcul cu care să se analizeze răspunsul terenului supus la acțiuni statice/dinamice în timpul compactării, cu aplicabilitate pentru pământ slab coeziv, pentru evaluarea tasării, rigidității, modulului de elasticitate, gradului de compactare etc.

Teza de doctorat este compusă din șase capitole, bibliografie și lista lucrărilor.

Capitolul 1 intitulat *Stadiul actual al cercetărilor în domeniul procesului de compactare cu vibrații* prezintă aspecte despre eficiența procesului de compactare cu vibrații, prin corelarea caracteristicilor terenului cu regimul de lucru al mașinii, modificând factorii tehnologici ai acestuia.

În **capitolul 2** denumit *Automatizarea controlului și asigurarea calității procesului de compactare prin monitorizare și digitalizare* sunt prezentate aspecte cu privire la criteriile și cerințele actuale privind monitorizarea și controlul calității execuției lucrărilor de compactare, prin exemplificarea unor metode/tehnici implementate de firme renumite în domeniu pe compactoarele vibratoare. De altfel, tot în acest capitol mai este detaliat și conceptul de digitalizare a industriei românești în contextul *Industria 4.0*, privind construcția de drumuri.

Capitolul 3 este intitulat *Metode de analiză a procesului de compactare prin investigații de laborator și „in situ” a pământurilor folosite la fundațiile rutiere*, iar autorul descrie succint metodele de testare în condiții de laborator și in situ, cu evidențierea parametrilor măsuțați/determinați (densitate în stare uscată, umiditate, modul static longitudinal, presiune specifică, efort de compactare, grad de compactare) care au impact asupra evaluării performanței procesului de compactare a pământurilor slab coezive din România.

În **capitolul 4** intitulat *Evaluarea experimentală „in situ” a procesului de compactare statică și dinamică* sunt descrise determinările experimentale efectuate pentru identificarea evoluției stării terenului la compactare, alături de baza de date cu legități interparametrice utile pentru caracterizarea globală a performanței compactării.

Capitolul 5 denumit *Modelarea reologică și simularea interacțiunii rulou-teren* cuprinde un model teoretic și o gamă variată de modele reologice propuse pentru modelarea și simularea numerică a proceselor vibratorii specifice compactării punând în evidență răspunsul terenurilor slab coezive la excitație dinamică armonică prin estimarea tasării, a gradului de compactare, a rigidității terenului, a amplitudinii mișcării ruloului, fie după numărul de treceri, fie în timp.

Capitolul 6 conține concluziile finale, contribuțiile personale precum și direcțiile viitoare de cercetare.

Lucrările de cercetare au fost efectuate în cadrul INCERC București și ICECON București, în teză folosindu-se rezultatele experimentale aparținând acestor institute de cercetare.

1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul procesului de compactare cu vibrații

Privită sub aspect tehnic și economic, compactarea mecanică reprezintă una dintre cele mai comune și eficiente metode pentru modificarea caracteristicilor pământului, care se manifestă prin schimbări în structura acestuia (prin creșterea densității ca rezultat al diminuării volumului porilor ce conțin aer și reșezării particulelor din componența sa) cu rezultat vizibil în modificarea caracteristicilor sale sub aspectul rezistenței, deformabilității și permeabilității, toate acestea obținându-se ca efect al aportului unei energii mecanice aplicate cu echipamente tehnologice specializate [1 – 3]. Umiditatea este unul din factorii cu influență semnificativă asupra rezultatelor procesului de compactare. Se distinge astfel umiditatea optimă de compactare ca fiind conținutul de apă corespunzător obținerii densității celei mai mari rezultată la un efort de compactare specific. Principiile fundamentale ale compactării pământurilor au fost dezvoltate în anul 1933 de Proctor în perioada studiilor efectuate pentru construirea de baraje în Los Angeles (SUA), în scopul stabilirii unor soluții privind comportamentul pământurilor cu structuri instabile [10]. Proctor a demonstrat că densitatea în stare uscată a pământului depinde de umiditate, efortul de compactare și caracteristicile terenului (granulozitate, mineralogie, uniformitate). Metoda originală (apărută în 1958) se referă la încercarea Proctor normal, fiind actualizată prin elaborarea încercării Proctor modificat. Descrierea metodelor de încercare elaborate de Proctor au fost menționate mai întâi în standardele ASTM și AASHTO. În urma cercetărilor efectuate, s-a constatat ca există o diferență de 8% a valorilor densității în stare uscată obținută pe probe de nisip argilos compactat, respectiv de 10% în cazul probelor de praf. S-a observat, de asemenea, că pe măsura creșterii efortului de compactare, în funcție de metodologiile aplicate, se produce eficientizarea procesului de compactare mecanică, variațiile caracteristicilor de compactare obținute fiind cuprinse în intervalul 8-11%.

În prezent sunt aplicate pe scara largă prevederile din ASTM D698 „Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort,” și AASHTO T99 pentru încercarea Proctor normal și ASTM D1557 „Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort” și AASHTO T180 pentru încercarea Proctor modificat. La nivel internațional și național, literatura de specialitate reflectă preocupări intense privind analize parametrice calitative și cantitative a procesului de compactare în regim controlat de factori tehnologici, în special în ceea ce privește energia de compactare și corelarea cu caracteristicile de compactare [15-17]. Astfel, valorile umidității optime de compactare scad odată cu creșterea efortului de compactare, iar umiditatea optimă de compactare a pământurilor este considerată, în general, la aproximativ 85% din valoarea corespunzătoare saturației [18].

Compactarea prin vibrație este considerată una dintre cele mai moderne metode de îmbunătățire a terenurilor dificile de fundare, având o largă arie de aplicabilitate. Efectul de compactare va fi cu atât mai mare, cu cât forțele de legătură dintre particule vor fi mai mici, iar masele particulelor cât mai diferite. De aceea, această tehnologie este folosită în special la pământuri necoezive la care forțele de legătură dintre particule sunt foarte mici, dar și în cazul umpluturilor neomogene, nefiind aplicabilă pământurilor argiloase.

În cazul procesului de compactare prin vibrație sunt cunoscuți o serie de factori tehnologici care trebuie luați în considerare, și anume:

- caracteristicile echipamentului de compactare (masa per rulou, lățimea rulou, frecvența și amplitudinea vibrațiilor ruloului);
- caracteristicile terenului (densitate inițială, granulozitate, forma granulelor, umiditate);
- procedurile de lucru (numărul de treceri, grosimea stratului de compactat, frecvența de lucru, viteza de deplasare a compactorului).

Tipul de pământ prezintă o influență semnificativă asupra caracteristicilor de compactare. În general, pământurile coezive manifestă o rezistență mare la compactare, iar pământurile necoezive pot fi supuse unei compactări ușoare. Efortul sau energia de compactare este în strânsă legătură cu tipul de echipament tehnologic și parametrii regimului de lucru utilizați la compactarea pământurilor. S-a constatat că pe măsura creșterii efortului de compactare, calitatea compactării este mai bună.

Echipamentele utilizate pentru compactarea pământurilor pot fi clasificate în următoarele categorii: compactoare statice, compactoare dinamice sau de impact, compactoare vibratoare etc. Acestea au diferite tipuri de organe de lucru: rulouri netede sau profilate, tren de pneuri.

Grosimea stratului de compactat este invers proporțională cu gradul de compactare. Pentru o energie de compactare dată, eficiența procesului de compactare va fi mai redusă în cazul unui strat cu grosime, comparativ cu cea obținută pentru un strat mai subțire. Acest aspect se poate explica prin faptul că, pentru stratul cu grosime mare, consumul de energie pe unitatea de greutate este redus.

Numărul de treceri ale rulourilor compactoare duce la creșterea densității pământului, ținând seama de faptul că determinarea numărului de treceri pentru un anumit tip de echipament și pământ la umiditatea optimă de compactare este esențială pentru eficiența compactării.

Presiunea de contact depinde de greutatea echipamentului și de aria de contact. În cazul unor rulouri pneumatice, presiunea de umflare a pneurilor influențează presiunea de contact suplimentar. O presiune de contact mare conduce la o creștere a densității în stare uscată și o scădere a umidității optime de compactare a pământurilor.

Viteza de compactare este în funcție de tipul echipamentului și tehnologia aleasă pentru compactare, fiind limitată în general la 5 km/h. Cu cât viteza de compactare este mai mare, durata procesului de compactare este redusă semnificativ. La o viteză mare de compactare, există posibilitatea ca timpul de apariție a deformațiilor să fie insuficient, fiind necesară creșterea numărului de treceri pentru o compactare eficientă. Cu cât viteza de deplasare a compactorului este mai mică, cu atât se produc mai multe vibrații într-un punct dat și un număr redus de treceri.

Trebuie precizat faptul că, în funcție de tipul terenului, tehnologia de lucru poate fi statică (adică utilajul nu folosește vibrațiile în regimul de funcționare) sau cu vibrație (caz în care utilajul poate funcționa cu un singur rulou vibrator sau cu ambele, în funcție de varianța constructivă a acestuia). În mod uzual, se utilizează vibratoare cu mase excentrice sau cu ax excentric care generează diferite tipuri de vibrații.

De aceste informații trebuie să se țină cont la elaborarea modelelor dinamice de interacțiune dintre mașină și teren, cu ajutorul cărora să se simuleze comportamentul dinamic rulou vibrator-teren cu impact asupra evaluării performanței procesului de compactare, prin identificarea gradului de compactare final.

2. Automatizarea controlului și asigurarea calității procesului de compactare prin monitorizare și digitalizare

2.1. Exemple de bune practici la nivel internațional

Metodele de testare uzuale utilizate in situ pentru controlul și verificarea calității materialelor pentru stratul de bază sau de umplutură al unei fundații, care furnizează în mod direct informații despre rezistența sau modulul de elasticitate, și care oferă economii semnificative de timp pentru obținerea rezultatelor testelor efectuate sunt prezentate în Figura 2.2.



Fig. 2.2 Dispozitive uzuale pentru măsurători in situ ale proprietăților terenului cu: deflectometru cu greutate mică, penetrometru conic dinamic, ciocan Clegg, placă pentru testare

În prezent, pe plan internațional sunt disponibile numeroase sisteme de achiziție, măsurare și procesare a semnalelor de vibrații, folosite ca laboratoare mobile de testare in situ a calității lucrărilor executate. Câteva astfel de exemple sunt ilustrate în Figura 2.3 [25].

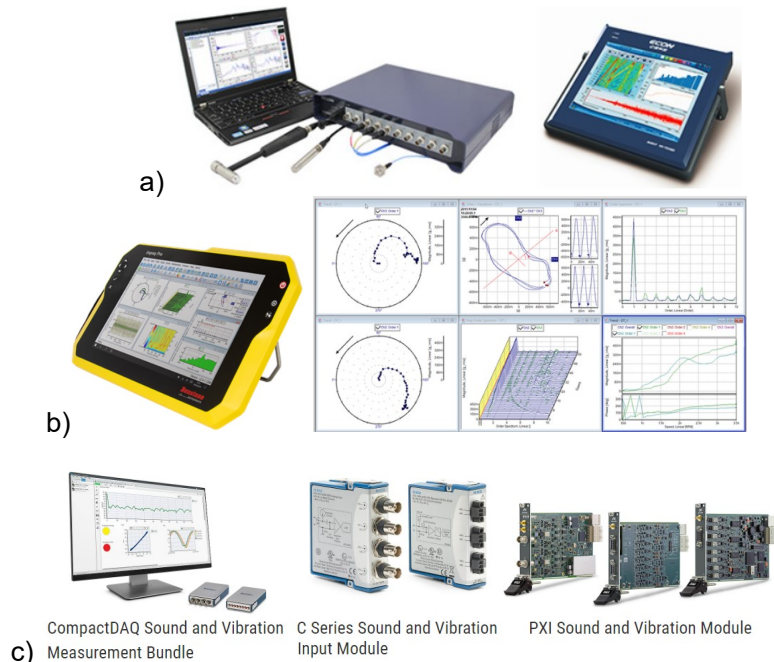


Fig. 2.3 Sisteme performante de achiziție, măsurare și procesare a semnalelor de vibrații: a) Econ MI generația 7 /Dynamic Signal Analyzer Module [26]; b) impaq Pro Portable Vibration Analyzer [27]; c) PC-Based Sound and Vibration Devices / PXI Sound and Vibration Module USB 4431 [28]

Comunitatea Europeană a inițiat în urmă cu peste 30 de ani implementarea metodelor de măsură și control continuu al compactării (CCC), astfel că în prezent compactoarele vibratoare moderne sunt echipate cu sisteme de monitorizare și control în mod continuu al parametrilor cu

influență semnificativă asupra performanțelor procesului de compactare prin vibrație a terenurilor. La nivel mondial se cunosc trei astfel de sisteme CCC care vor fi descrise succint în continuare.

CCC – compactometer care monitorizează variația raportului dintre amplitudinile accelerațiilor în funcție de frecvență, prin evaluarea parametrilor CMV sau CCV astfel:

$$\begin{cases} CMV = C_0 \cdot \frac{A_{2\omega}}{A_{\omega}} \\ CMV = \left(\frac{A_{0,5\omega} + A_{1,5\omega} + A_{2,5\omega} + A_{3\omega}}{A_{2,5\omega} + A_{3\omega}} \right) \cdot 100' \end{cases} \quad (2.1)$$



Fig. 2.4 Implementarea tehnologiei CMV [29]

Prin cunoașterea compoziției spectrale a semnalului de accelerație a ruloului vibrator în mișcarea sa pe direcție verticală se poate identifica starea stratului peste care se deplasează ruloul vibrator. Se remarcă în analiza semnalului de accelerație numai existența armonicei fundamentale, în cazul terenurilor afânate, spre deosebire de prezența unui spectru larg de armonici superioare, cu amplitudini din ce în ce mai mici până spre zero, în cazul terenurilor cu rigiditate foarte mare, care au ajuns la gradul maxim de compactare (Fig. 2.5).

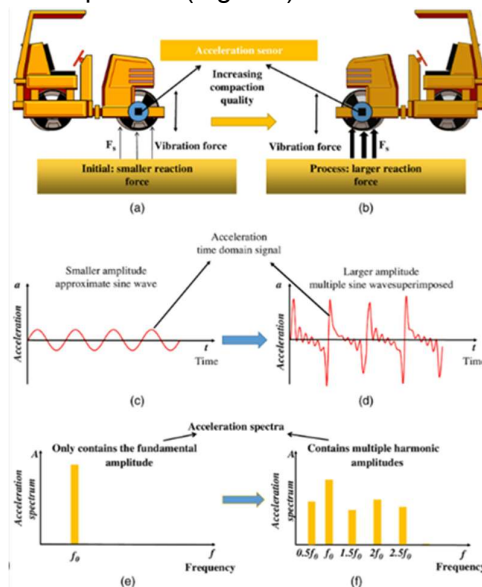


Fig. 2.5. Compoziția spectrală a semnalului de accelerație a ruloului vibrator [30]

Pe baza parametrului CMV (care măsoară rigiditatea pământurilor necoezive, cu grosimea straturilor între 1...1,2 m), în literatura de specialitate [33] sunt referințe despre determinarea altora, care contribuie în mod specific la definirea stărilor de compactare ale straturilor, precum: RMV (*resonance meter value* cu relație de calcul data în 2.2), OMV (*oscillometer value*) sau CCV (*continuous compaction value*).

$$RMV = 100 \frac{A_{0,5\omega}}{A_{\omega}} \quad (2.2)$$

CCC – terrameter este un alt sistem care are la bază monitorizarea a doi indicatori de stare a compactării (montat pe utilajele Bomag), astfel:

- variația energiei transferate în teren în timpul trecerilor compactatorului vibrator, prin evaluarea parametrului *OMEGA* [Nm];
- variația modului dinamic de elasticitate al terenului în timpul trecerii peste straturile terenului, prin monitorizarea parametrului E_{vib} [MN/m²], conform Figura 2.8.

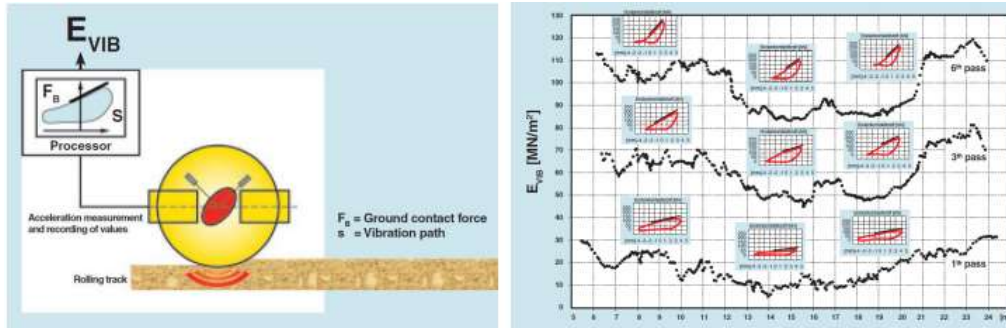


Fig. 2.8. Monitorizarea parametrului E_{vib} [34,35]

La modificarea continuă a rigidității stratului compactat, variază o gamă largă de parametri care descriu regimul de lucru al utilajului, precum: energia necesară procesului de vibrație, momentul maselor excentrice, poziționarea acestora, amplitudinea și frecvența vibrațiilor etc. În cazul compactoarelor din generația nouă de la firma BOMAG (Fig. 2.9), acestea sunt echipate cu un sistem denumit VarioRoller dezvoltat apoi ca VarioControl care are rolul de a modifica direcția forței perturbatoare a ruloului (Fig. 2.10) în funcție de caracteristicile stratului compactat, aflate în legătură directă cu rigiditatea obținută după fiecare trecere a utilajului.

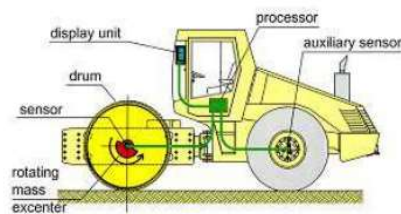


Fig. 2.9. Echiparea cu sisteme de control a procesului de compactare [36]

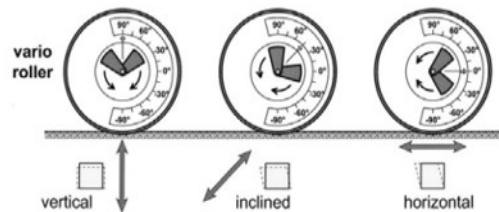


Fig. 2.10. Modificarea direcției de acțiune a forței excitatoare a ruloului [36]

CCC – ACE - o tehnologie ce încorporează un nou concept prin care se monitorizează variația rigidității terenului în timpul deplasării compactatorului pe terenul supus compactării prin vibrație, prin monitorizarea parametrului k_b [MN/m] (pe utilajele Ammann/Case). Relația de calcul pentru estimarea lui k_b este:

$$k_b = \omega^2 \left[(m + m_0) + \frac{(m_0 e k_{vario}) \cos \varphi}{A_{(z)}} \right] \quad (2.4)$$

MDP (Machine drive power) – o tehnologie nouă de evaluare a gradului de compactare al unui strat, patentată de firma CAT și implementată pe compactoarele Caterpillar B-Series (Fig. 2.11). Metoda constă în monitorizarea puterii de acționare a utilajului prin măsurarea rezistenței la rulare în timpul compactării, la corelarea continuă a parametrilor vibrațiilor ruloului cu caracteristicile stratului [37]. Astfel, prin această metodă se măsoară direct rigiditatea terenului.

$$MDP = P_g - Wv \left(\sin \alpha + \frac{A^*}{g} \right) - (mv + b). \quad (2.5)$$



Fig. 2.11. Implementarea tehnologiei MDP [38]

În urma unei analize critice asupra aspectelor prezentate anterior rezultă că se disting cinci niveluri de acceptabilitate (tabelul 2.3), utilizate în literatura de specialitate [40] în domeniul compactării, identificate în funcție de tipul constitutiv al modelului de calcul adoptat și de gradul de precizie al fiecăreia dintre datele măsurate, monitorizate și prelucrate.

Tabelul 2.3 Niveluri de acceptabilitate în funcție de gradul de acuratețe al modelelor pentru evaluarea procesului de compactare prin vibrație [40]

Nr. crt.	Descrierea nivelului de acceptabilitate		Parametrul măsurat (estimat / calculat)	Aplicare		Acuratețe	Tip Model
				S	MA		
1	Modele empirice bazate pe analiza răspunsului în frecvență a vibrațiilor ruloului		Indice armonice (CMV, RMV, CCV)	X	X	Redusă	N/A
	Modele empirice bazate pe analiza răspunsului în frecvență a oscilațiilor ruloului		Indice armonice (CCC)	-	X	Redusă	N/A
2	Modele empirice energetice bazate pe răspunsul forței de rezistență la rulare		Indicele energetic (MDP)	X	-	Redusă	Dinamic/static
3	Modele statice simplificate	Modele pentru strat tip semi-spațiu	Rigiditatea, modul, forța la rulare (E_{vib} , K_s)	X	X	Satisfăcătoare	Dinamic
		Modele cu elemente discrete: Kelvin-Voigt, Maxwell, Zener, Burgers etc.			X		
4	Modele dinamice		Modul, forța la rulare (VCV)	X	-	Bună	Dinamic
5	Modele dinamice cu inteligență artificială		Modul estimat, densitate estimată (M_{NN} , r_{ODMS})	X	X	Excelentă	Dinamic

Notații: S – pământ (sol); MA – mixtură asfaltică.

Rezumând cele prezentate, se poate observa că factorii care influențează efectul de compactare a solurilor și mixturilor asfaltice se împart în factori interni și externi. Astfel, factorii interni includ, în principal, caracteristicile materialelor și rezistența stratului de bază, iar factorii externi sunt reprezentați de parametrii de compactare ai regimului de lucru, energia de compactare, varianta constructivă a organului de lucru al utilajului de compactare, modul de compactare (static sau dinamic) și tehnologia de compactare (prin luarea în considerare a vitezei de deplasare a mașinii de compactat, a numărului de treceri etc.) [25].

2.2. Digitalizarea industriei românești în contextul Industriei 4.0

În domeniul construcțiilor, cu precădere la construcția drumurilor și autostrăzilor, se constată nișe de specializare regională și potențiale nișe de explorat, după cum este stipulat în Strategia regională de specializare inteligentă 2021-2027 (proiect aflat în implementare în țara noastră) și se dorește digitalizarea proceselor din acest domeniu de activitate. Prin extrapolare, se poate trece la o etapă ulterioară, în care să existe posibilitatea integrării sistemului informatic al fiecărui producător de materiale de construcții într-o platformă digitală comună, la care să fie conectați toți factorii (proiectanți, constructori, beneficiari și furnizori) implicați într-un proiect cu volume și spații largi de lucru, asigurând accesul la informațiile necesare și realizând transferul acestor informații în scopul îndeplinirii eficiente a obiectivului de construcții.

Stadiul actual pe plan mondial și european cu privire la digitalizarea activităților și proceselor în domeniul construcțiilor este perceput în țările dezvoltate prin folosirea pe scară din ce în ce mai largă a tehnologiilor și echipamentelor care au în dotare sisteme inteligente, senzori, traductoare, cipuri cu memorie și legături cu sisteme de tip GPS (Fig. 2.15), permițând astfel ca transferul datelor, prelucrarea și afișarea acestora în proiecte de anvergură să poată fi transpuse în platforme tehnologice digitale dedicate având un circuit restrâns al informațiilor (intranet).

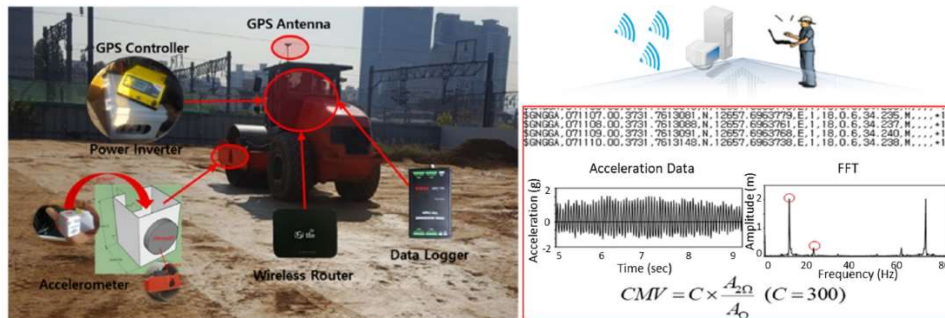


Fig. 2.15 Exemplu de integrare a tehnologiei inteligente pe compactoarele vibratoare [41]

Și în țara noastră sunt demersuri în vederea implementării acestui concept de digitalizare a industriei 4.0, în acest sens fiind prezentat un exemplu cu aplicabilitate în domeniul lucrărilor de drumuri. Astfel, în procedura elaborată de ICECON S.A. denumită „Digitalizarea tehnologiilor de procesare și punere în operă a materialelor de construcții pentru lucrări de drumuri”, sunt evidențiate cerințele de performanță impuse pentru realizarea obiectivului anterior amintit [42].

Realizarea unui consorțiu sub forma unei platforme digitale la care să aibă acces toți participanții implicați în execuția unei lucrări de anvergură (cum ar fi construcția unei autostrăzi) este o variantă bună de pus în practică. Un alt exemplu (fig. 2.18) ar putea fi monitorizarea lucrului cu compactoarele vibratoare la execuția unor lucrări de mare anvergură, pentru construcția unor obiective cu destinație specială (piste aeroport, autostrăzi, fundații speciale etc.).

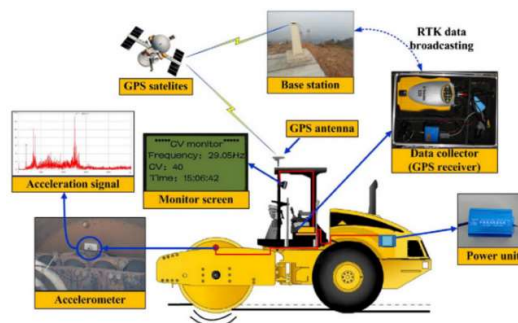


Fig. 2.18 Monitorizarea parametrilor de lucru ai unui compactor vibrator [44]

Un nou concept a fost dezvoltat și aplicat pentru prima dată în SUA la începutul anilor 2000 denumit Building Information Modeling (BIM). BIM simbolizează inovația în domeniul construcțiilor bazată pe combinația dintre tehnologie, proces și implementare (punere în operă) cu scopul de a promova utilizarea pe scară largă a procesului de digitalizare, simulare și optimizare a proceselor prin proiectare digitală, construcție și operare în mediul virtual (folosind sistemele informatice). De exemplu, punând în aplicare principiile conceptului BIM, în Figura 2.19 este ilustrată conlucrarea factorilor direct implicați în execuția unei autostrăzi.



Fig. 2.19. Colectarea automată a datelor și monitorizarea conformității în timpul desfășurării procesului de construcție al unei autostrăzi [47]

3. Metode de analiză a procesului de compactare prin investigații de laborator și „in situ” a pământurilor folosite la fundațiile rutiere

3.1. Evaluarea parametrilor geotehnici ai terenurilor de compactare

Cele mai uzuale teste efectuate în laborator pentru determinarea diferitelor caracteristici necesare caracterizării compactării sunt: proba edometrică; proba triaxială ciclică; proba Proctor. Testele efectuate in situ constau în: determinarea modului static de deformare liniară a pământurilor; determinarea tasării terenului după o singură trecere a compactorului; determinarea pe cale experimentală a grosimii stratului de compactat.

3.2. Încercări „in situ” pentru evaluarea parametrilor terenurilor de compactat

3.2.1. Parametri de identificare a sistemului rulou-teren

Lățimea ariei de contact a ruloului compactor cu terenul, conform normativului C 29-85 se află în funcție și de gradul de compactare D_i (definit în STAS 9850-89) determinat prin încercarea Proctor. De exemplu, pentru lățimea b^* a amprentei **ruloului vibrator al compactorului CV 4** (cu $D_r = 160$ cm), în cazul lutului de București (pământ slab coeziv), au rezultat [102]:

$b^* = 24 \dots 25$ cm pentru pământ afânat, cu $D = 0,6$;

$b^* = 12 \dots 13$ cm pentru pământ compactat, cu $D = 0,86$.

și rapoartele tehnologice: $b^*/D_r = 0,2 \dots 0,21$ pentru $D = 0,6$ și $b^*/D_r = 0,1 \dots 0,11$ pentru $D = 0,86$.

Pentru **ruloul vibrator al compactorului VV 170** (cu diametrul ruloului $D_r = 160$ cm), în cazul nisipului prăfos argilos cu indice de neuniformitate $U_n = 67$, au rezultat lățimile [102]:

$b^* = 25 \dots 28$ cm pentru pământ afânat, cu $D = 0,65$;

$b^* = 11 \dots 16$ cm pentru pământ compactat, cu $D = 0,8$.

și rapoartele tehnologice: $b^*/D_r = 0,16 \dots 0,175$ pentru $D = 0,65$ și $b^*/D_r = 0,07 \dots 0,1$ pentru $D = 0,8$.

Se observă că în ambele cazuri valorile se înscriu în domeniul indicat de prevederile normativului C 29-85.

3.2.2. Durata de compactare a pământurilor și a efortului efectiv de consolidare

Compactarea integrală a pământului (la efortul maxim calculat) se atinge când este solicitat un timp destul de lung (denumit timp necesar pentru obținerea unei consolidări primare de 100%), corespunzător diminuării semnificative a presiunii din porii săi. În toate cazurile practice, timpul de solicitare a pământului la trecerea cu utilajul pe strat este mai scurt decât timpul de consolidare primară $t_p = t_{100}$, ceea ce înseamnă că pământul este consolidat cu o fracțiune din efortul efectiv. Valoarea acestei fracțiuni se determină, conform C 29-85 (pct. 2.14), pe baza timpului de consolidare primară (compactare integrală) care se obține prin metoda reprezentării semilogaritmice (Casagrande) prezentată în STAS 8942/1-89 (pct. 6.4).

3.2.3. Încercări experimentale pentru determinarea modurilor de elasticitate E , G și a amortizării critice a terenului

Acești parametri se pot determina prin încercări de laborator și in situ conform îndrumătorului tehnic P125-84. În urma experimentărilor, în cazul compactării lutului de București cu **compactatorul CV 4**, s-au obținut pentru deformația medie determinată $\varepsilon_a = 1,9 \cdot 10^{-2}$ cm/cm valorile $\delta = 1,02$ și, respectiv, $\zeta = 0,163$ (în condițiile unui grad de saturație al pământului de 60%). Cunoașterea valorilor parametrilor G_d și ζ permite determinarea coeficientului de amplificare dinamică Ψ , folosit la stabilirea sarcinii de încărcare pe rulou, în baza C 29-85 (pct. 2.6.).

Ansamblul acestor parametri determinați pe cale experimentală pot sta în general la baza conceperii modelelor de simulare ale comportării pământurilor în procesul de compactare și respectiv, modelelor de simulare a efectelor dinamice care apar la interacțiunea mașină – teren, aspect urmărit cu interes în această teză de doctorat.

Se poate concluziona că **în procesul de compactare, pământurile prezintă o rezistență ciclică limită (superioară și, respectiv, inferioară), iar procesul de compactare este eficient numai dacă solicitarea se încadrează între cele două limite.**

3.2.4. Sistematizarea datelor experimentale pentru stabilirea modelului pământului în procesul de compactare

Evaluarea ansamblului de parametri geotehnici ce descriu și caracterizează amplasamentul care urmează să fie compactat se realizează în conformitate cu cerințele C 29-85 care precizează efectuarea următoarelor încercări experimentale [25, 54]:

- a) **teste de laborator**: test oedometric (STAS 8942/3-90), test triaxial ciclic (P 125-84, Anexa B), test Proctor (STAS 9850-89). Aceste încercări geotehnice de laborator ajută la determinarea următorilor parametri: timpul de compactare completă a terenului (C 29-85 pct. 2.14.), modulul oedometric de deformare, trasarea curbei efort-deformare și variația în timp a presiunii porilor, umiditatea optimă de compactare și greutatea maximă uscată sau densitatea maximă uscată, gradul de compactare, curba Proctor;
- b) **încercări in situ**: determinarea modulului static de deformare liniară a pământurilor (prin calcul, pe baza modulului oedometric conform STAS 3300/2-85, pct. 3.4.5, sau prin măsurare directă in situ, prin proba de încărcare cu placa conform STAS 8942/3), măsurarea tasării terenurilor în urma unei treceri singulare a echipamentului tehnologic de compactare, evaluarea experimentală a grosimii stratului (conform C 29-85 pct. 2.6 aplicând procedura descrisă în Anexa 2.2., pct. 2).

Astfel, pe baza tuturor observațiilor fenomenologice și a rezultatelor datelor primare evidențiate în urma determinărilor geotehnice în laborator și in situ efectuate de către specialiștii Laboratorului Geotehnică și Fundații din cadrul INCERC București și specialiștii în măsurări de vibrații din Institutul de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții – ICECON S.A. s-au sintetizat concluzii care evidențiază dependențe și legități specifice între parametrii caracteristici ai terenurilor de fundare și cei tehnici și tehnologici ai echipamentelor de compactare

privite sub aspectul condițiilor tehnologice. Mai precis, se concluzionează necesitatea **corelării performanțelor operaționale ale echipamentului de compactare cu parametrii caracteristici ai terenului care urmează a fi compactat, ținând cont de tehnologia de compactare aleasă de punere în operă.**

Centralizarea tuturor informațiilor rezultate prin observații fenomenologice și rezultate ale determinărilor creează premisele dezvoltării unor **modele de simulare a comportării terenului în procesul de compactare valabile până în faza experimentării parametrilor caracteristici (geotehnici) ai terenului realizați la un moment dat, în funcție de numărul de treceri**, în baza unor legități (stabilite analitic și/sau experimental) între parametrii E_{st} , ρ_d , w_i , D_i .

În concluzie, se poate face afirmația conform căreia, pe baza datelor reale ale caracteristicilor geotehnice ale terenului, obținute prin determinări experimentale în laborator și in situ, pot fi dezvoltate în teză următoarele modele:

- a) *model teoretic pentru studiul comportării terenului în procesul de compactare*, cu parametrii săi caracteristici care au evoluții predictibile dependente de:
 - starea inițială a terenului de compactat, definită prin parametrii inițiali caracteristici;
 - contactul mașină – teren, prin parametrii geometrici caracteristici ai ruloului;
 - sarcina de încărcare pe rulou a echipamentului tehnologic de compactare, prin greutatea sa statică (la compactarea fără vibrații) și amplitudinea și frecvența forței dinamice generate de generatorul de vibrații (la compactarea dinamică).
- b) *modele reologice pentru simularea evoluției tasării terenului în procesul de compactare* cu evidențierea componentelor elastice, vâscoase și plastice;
- c) *modele reologice cu grade diferite de complexitate pentru simularea interacțiunii echipament tehnologic – teren în procesul de compactare* definite prin [6]:
 - acțiunea mașinii asupra terenului este materializată prin valoarea gradului de compactare realizat la un moment dat în procesul de compactare;
 - acțiunea terenului asupra mașinii este materializată prin valoarea atinsă la un moment dat în procesul de compactare a coeficientului de rigiditate a terenului k ;
 - tehnologia de compactare este cea care corelează calitatea impusă a compactării, eficiența utilizării mașinii în vederea efectuării sarcinii tehnologice impuse și eficiența economică generală a procesului tehnologic de compactare.

4. Evaluarea experimentală „in situ” a procesului de compactare statică și dinamică

4.1. Determinări experimentale pentru identificarea evoluției gradului de compactare a pământului

În cazul modelului teoretic de simulare a comportării pământului (MTC) experimentările și investigațiile practice realizate cu ajutorul logistic pus la dispoziție de ICECON S.A. București au fost efectuate în condiții de lucru reale, în cadrul lucrărilor de modernizare a drumului național DN 2 (București-Urziceni), punctul de lucru Movilița (km 39+200) și au constatat în: monitorizarea tasării realizate în procesul de compactare prin determinări topometrice de nivel și geotehnice; verificări ale parametrilor caracteristici și a regimului de lucru al compactatorului; verificarea tehnologiei de lucru aplicate. În cadrul Laboratorului de Geotehnică și Fundații din INCERC și ICECON au fost analizate probele geotehnice pe epruvetele de pământ prelevate din teren prin corelare cu măsurări topometrice de nivel, în diferite etape ale procesului de compactare. Localizarea tronsonului de lucru (cu lungimea 50 m) și amplasarea punctelor de măsură (notate F...I, Ref.1), pe șantierul cu punctul de lucru Movilița sunt indicate în schema din Figura 4.1.

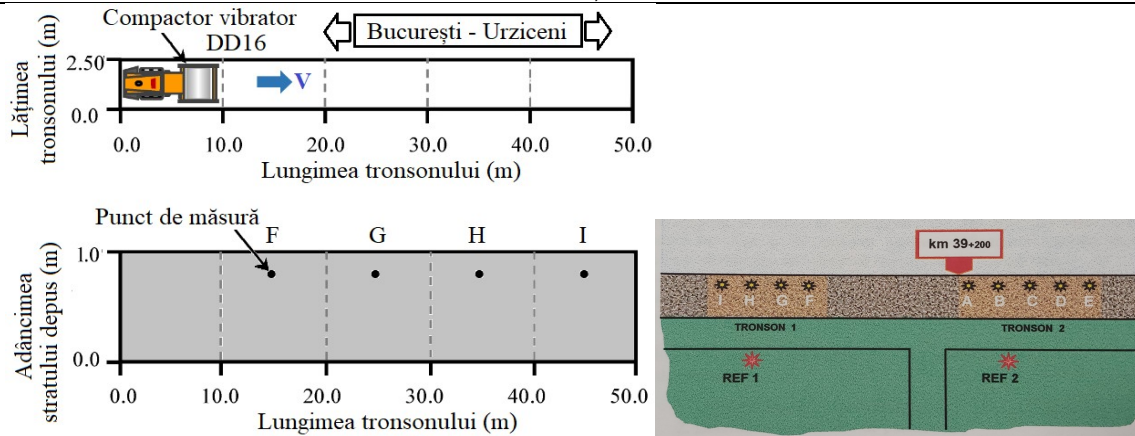


Fig. 4.1. Schema de amplasare a tronsonului compactat și a punctelor de măsurare și modul de desfășurare al testelor pe poligonul experimental de pământ construit pe șantierul de pe DN 2, punct de lucru Movilița, km 39+200

Punctele de măsurare $F...I$ reprezintă variante de teren diferite întrucât, deși natura pământului a fost aceeași și parametrii geotehnici caracteristici de identificare ρ_{dmax} și t_c identici ca valoare, parametrii geotehnici de stare inițială ρ_{di} , E_{sti} și w_i au avut valori diferite. Toți acești parametri au definit 4 variante diferite ale aceluiași teren, supuse compactării. Suplimentar, grosimea inițială a stratului de pământ deșus, percepută ca element al tehnologiei aplicate, definește și ea o stare inițială diferită pentru procesul de compactare.

Investigațiile A: Încercările pentru stabilirea naturii și a caracteristicilor fizico-mecanice ale terenului încep cu descrierea probelor pentru caracterizarea generală a terenului și a stării inițiale a pământului. Se face precizarea că pământul utilizat pentru umplutură a fost adus din groapa de împrumut Movilița (amplasată pe DN 2, la km 43+500), iar probele de pământ pentru efectuarea verificărilor au fost prelevate din stratul deșus, atât pentru laboratorul consultantului oficial al lucrării, cât și pentru laboratorul ICECON S.A. București.

Investigațiile B: Încercările pentru urmărirea evoluției procesului de compactare încep cu verificarea parametrilor caracteristici ai mașinii compactoare și verificarea regimului de lucru în timpul compactării. La compactarea pământului s-a utilizat un compactor tip **VV 170** (destinat în special pentru compactarea terenurilor necoezive, cu puterea de 98 kW), echipat cu un rulou vibrator, neted, pe puntea din față și cu pneuri normale pe cea din spate. Întrucât aprox. 66% din greutatea totală a utilajului (în valoare de 15710 daN) se repartizează pe rulou, face posibilă realizarea compactării terenului și în condiții statice.

4.2. Determinări experimentale pentru identificarea comportării sistemului mașină – teren în procesul de compactare

Validarea modelului teoretic de comportare a pământului (MTC) a fost făcută în condițiile funcționării mașinii compactoare fără vibrație, pe baza rezultatelor verificărilor experimentale efectuate în condiții de lucru reale, pe șantierul drumului național DN 2 București – Urziceni. Suplimentar, pentru testarea modelului în regim de vibrație s-au efectuat verificări experimentale, în canalul de pământ din cadrul ICECON S.A. București, special amenajat pentru simularea identică a condițiilor reale de lucru. În această situație, compactarea a fost efectuată cu utilajul compactor de tip ABG – DD16 care are două ruloouri netede, vibratoare.

Testele experimentale prevăzute pentru verificarea parametrilor regimului de lucru cu vibrație al compactorului au constatat în achiziționarea semnalelor de variație în timp a amplitudinii vibrațiilor prin integrarea semnalelor primare de accelerație achiziționate cu traductori de

același amplasați direct pe mantaua ruloului vibrator (fig. 4.4), pe direcția verticală, în zona de contact a acestuia cu terenul și pe șasiul superior al utilajului, pentru ambele rulouri.

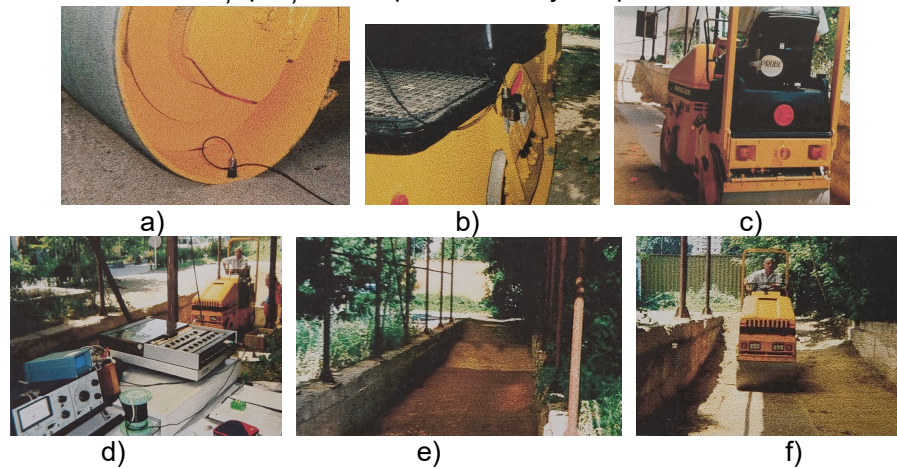


Fig. 4.4 Imagini din timpul experimentării [102]:

a) montarea traductorului de accelerație pe mantaua ruloului din față, la contactul cu terenul; b) montarea traductorului de accelerație în partea superioară a șasiului din spate; c) utilajul de probă – compactorul ABG DD 16; d) sistemul de aparate de măsură pentru determinarea parametrilor regimului de vibrație a compactorului de probă; e) canalul de pământ cu stratul de pământ afânat deșus; f) compactorul ABG DD 16 pe pista 1.

Planul de experimentare care a stat la baza desfășurării investigațiilor in situ este descris sintetic in schema din figura 4.5.

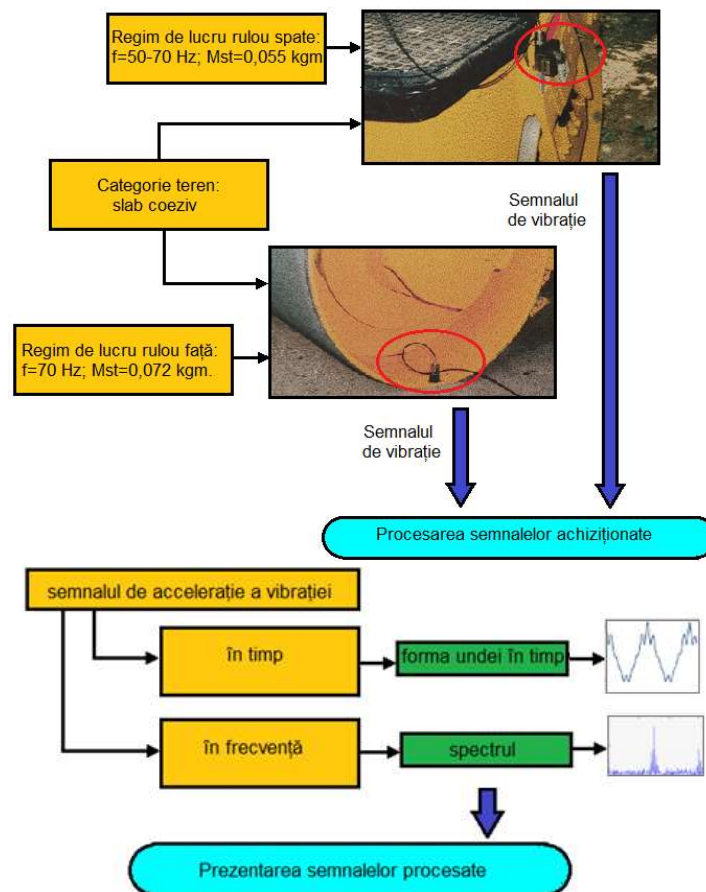


Fig. 4.5 Planul de experimentare

Regimurile de lucru cu vibrație verificate au fost definite prin:

- funcționarea vibratorului ruloului din față la turațiile nominală și maximă;
- funcționarea simultană a vibratoarelor ambelor ruloari (din față și din spate), la turațiile nominală și maximă.

Pentru fiecare situație de lucru, analiza în frecvență a semnalelor de accelerație și de deplasare înregistrate a permis cunoașterea amplitudinilor și a frecvențelor vibrațiilor transmise terenului. În final, parametrii regimului de lucru cu vibrație au fost verificați, compactorul fiind capabil să funcționeze cu un regim de vibrație corect, menținând frecvența și amplitudinea la valori stabile în timp. Caracteristicile pământului depus pentru compactare în canalul de pământ au fost și ele verificate prin probe geotehnice de laborator. Lungimea pistei compactate în canalul de pământ a fost $L = 12$ m, iar viteza de lucru a utilajului a fost $v_l = 1,44$ km/h.

Pe baza metodei de analiză dinamică a răspunsului, s-au realizat mai multe probe pe care s-au determinat nivelul de vibrații prin înregistrarea semnalului și apoi descompunerea spectrală a acestuia. Astfel la fiecare două treceri s-a realizat înregistrarea semnalului. Rezultatele sunt prezentate în Figurile 4.6 - 4.11, sub forma diagramelor spectrelor de amplitudine a vibrațiilor ruloului.

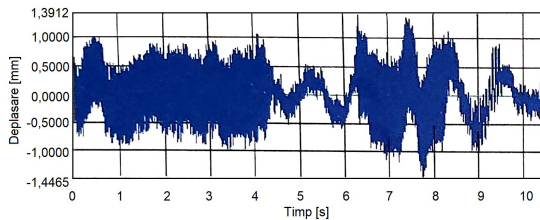


Fig. 4.6 Variația în timp a deplasării ruloului din față, pe direcție verticală, la contactul cu terenul

(Condiții testare: canal de pământ tip slab coeziv – loess de București, compactor ABG DD 16, $m_{or} = 0,0720$ kgm, $f = 70$ Hz, **trecerea echivalentă cu 12**)

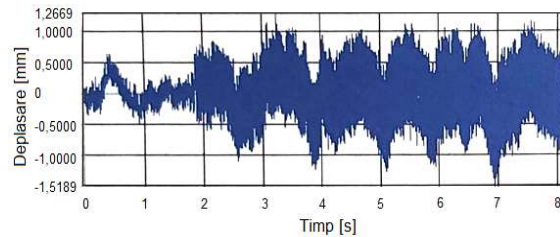


Fig. 4.7 Variația în timp a deplasării ruloului din față, pe direcție verticală, la contactul cu terenul

(Condiții testare: canal de pământ tip slab coeziv – loess de București, compactor ABG DD 16, $m_{or} = 0,0720$ kgm, $f = 70$ Hz, **trecerea echivalentă cu 14**)

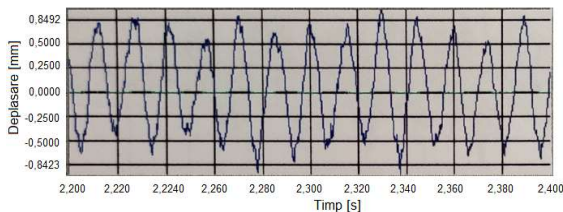


Fig.4.8 Detaliu din trecerea echivalentă cu 12

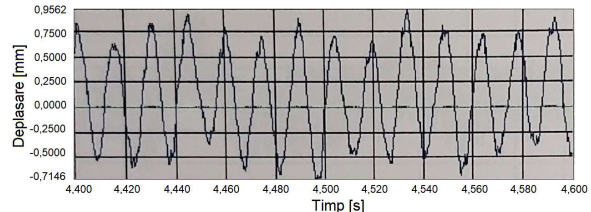


Fig. 4.9 Detaliu din trecerea echivalentă cu 14

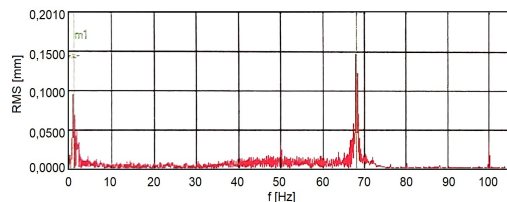


Fig. 4.10 Spectrul semnalului de deplasare al ruloului din față, pe direcție verticală, la contactul cu terenul

(marker m_1 : $f_1 = 0,95$ Hz; $A_1 = 0,0990$ mm; marker m_2 ; $f_2 = 68,12$ Hz; $A_2 = 0,1500$ mm)

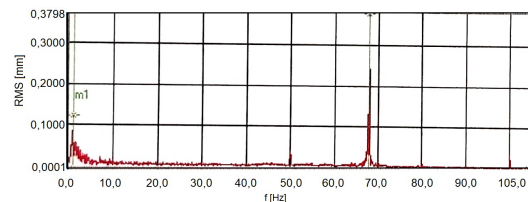


Fig. 4.11 Spectrul semnalului de deplasare al ruloului din față, pe direcție verticală, la contactul cu terenul

(marker m_1 : $f_1 = 0,95$ Hz; $A_1 = 0,1237$ mm; marker m_2 ; $f_2 = 67,84$ Hz; $A_2 = 0,3798$ mm)

Din analiza comparativă a celor 2 seturi de înregistrări și analize se concluzionează:

- scăderea amplitudinii spectrale de la trecerea 12 la trecerea 14 a compactorului;
- invariabilitatea frecvențelor spectrale dominante ($f_1 = 0,95 \text{ Hz}$, $f_2 = 67-68 \text{ Hz}$, $f_3 = 50 \text{ Hz}$);
- uniformizarea spectrală pe domeniul de analiză între cele două treceri ale compactorului.

Valorile frecvențelor dominante sunt identificate astfel:

- a) $0,95 \text{ Hz}$ corespunde frecvenței proprii a utilajului;
- b) 50 Hz este frecvența proprie a terenului la atingerea gradului maxim de compactare;
- c) $67-68 \text{ Hz}$ corespunde regimului de lucru cu vibrații al utilajului.

Verificările experimentale au pus în evidență efectul de compactare foarte rapid realizat de compactor chiar și atunci când acesta a funcționat cu un singur rulu în regim de vibrație.

Pe baza valorilor obținute după fiecare trecere se pot calcula rapoarte între amplitudinea la pulsația fundamentală și amplitudinile corespunzătoare celorlalte pulsații (de ordinul 2, 3 etc.) în funcție de criteriul care se dorește a fi aplicat în evaluarea performanței procesului de compactare (prin indentificarea indicilor CMV și RMV). Detalierea acestor aspecte a fost făcută în capitolul 2 (relațiile 2.1 și 2.2) al acestei teze de doctorat.

În funcție de numărul de treceri ale utilajului pe același strat se constată o creștere a raportului dintre amplitudinea armonicilor de ordinul 2 și cea fundamentală, ceea ce evidențiază accentuarea fenomenului de tasare a terenului.

Analiza spectrală efectuată pe semnalele achiziționate corespunzătoare mișcării ruloului compactor permite furnizarea unor date utile pentru realizarea concepției unui sistem special pentru determinarea gradului de compactare în timp real cu implicații directe asupra optimizării parametrilor tehnologici și operaționali ai utilajului.

Rezultatele determinărilor geotehnice experimentale care s-au realizat prin prelevarea unor probe din teren, începând cu starea inițială, în timpul desfășurării procesului de compactare (după un număr de treceri prestabilit) și până la finalizarea compactării, sunt centralizate în tabelul 4.7.

Tabelul 4.7 Date experimentale de la compactarea cu ABG DD – 16, cu ruloul vibrator din față în regim de vibrație. Pista nr. 1 [102]

Trecerea nr.	Regim de compactare	b_F^* [cm]	Cota teren [cm]	Δh [cm]	w_{med} [%]	ρ_d [g/cm ³]	f [Hz]	v [km/h]
0.....3	static	16	9,93	0	9,8	1,465	70	1,44
3	vibrație F	-	-	-		1,82		
6	vibrație F	8	-	-		1,85		
7	vibrație F	7	10,88	0,95		1,873		
8	vibrație F	6	11,40	1,47		1,9		
9	vibrație F	5,5	11,42	1,49		1,953		

Verificările experimentale au pus în evidență efectul de compactare foarte rapid realizat de utilajul compactor chiar și atunci când acesta a funcționat cu un singur rulu în regim de vibrație. O explicație ar fi natura terenului (pământ foarte slab coeziv) și umiditatea sa inițială redusă ($w_i = 11,2 \%$ în loc de $w_{opt} = 19,8 \%$), care a împiedicat prelevarea de probe geotehnice stabile până la efectuarea a 3 treceri inițiale statice după care s-a obținut consistența necesară (având dezavantajul scăderii umidității la $9,8 \%$) dar, cu creșterea gradului de compactare inițial la valoarea de 85% , cu mult peste valoarea întâlnită în mod normal la terenurile naturale.

4.3. Corelații interparametrice determinate pe baza investigațiilor de laborator și experimentale in situ pentru caracterizarea performanței compactării

4.3.1 Legea dependenței dintre modulul longitudinal static și densitatea în stare uscată

Centralizarea legilor de variație $E_{st} = f(\rho_d)$, obținute pentru cele patru tipuri de pământuri slab coezive (testate, iar punctele de măsură notate cu F, G, H, I) este dată în Tabelul 4.8.

Tabelul 4.8 Centralizarea legilor de variație $E_{st} = f(\rho_d)$

Puncte de măsură	Grosimi straturi, [cm]	Legi de variație aproximative	Abaterea medie pătratică
F, G, H, I	24,5 - 29,5	$E_{sti} = 1000,6\rho_{di}^2 - 2230,8\rho_{di} + 1235,1$	$R^2 = 0,9927$
		$E_{sti} = 3,579 \rho_{di}^{8,6369}$	$R^2 = 0,9852$
		$E_{sti} = 814,25\rho_{di} - 1056,9$	$R^2 = 0,9842$
		$E_{sti} = 0,0224 e^{5,6855\rho_{di}}$	$R^2 = 0,9802$
		$E_{sti} = 1229,6\ln(\rho_{di}) - 327,5$	$R^2 = 0,9787$

La o analiză comparativă se observă că legea care aproximează cu eroarea cea mai mică dependența dintre cei doi parametri (E_{st} și ρ) este cea de tip polinomial de gradul doi (fig. 4.12).

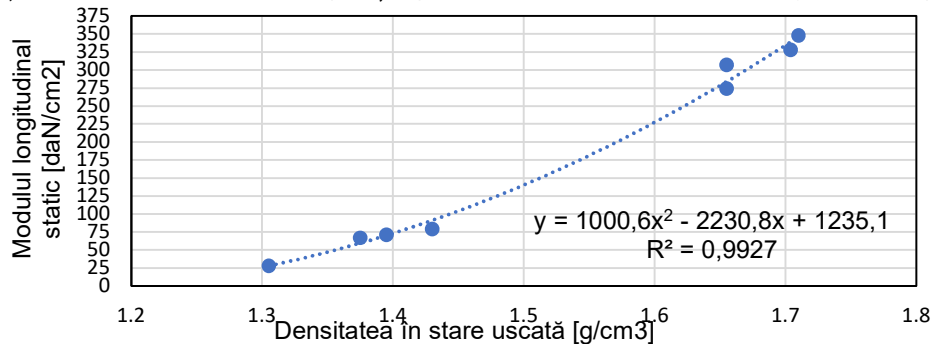


Fig.4.12.Dependența modulului static de deformație liniară în funcție de densitatea în stare uscată, pentru pământ slab coeziv (experimente în condiții statice)

Așadar, pentru implementarea într-un algoritm al unui program de calcul pe baza acestor parametri (în mod particular, pentru o anumită fază a procesului tehnologic sau în mod evolutiv, pe durata procesului de compactare, după un număr oarecare de treceri), legea $E_{st} = f(\rho_d)$ valabilă pentru pământuri slab coezive, poate avea o expresie analitică convenabilă astfel:

$$E_{sti} = 1000[\rho_{di}^2 - p_c \rho_{di} + (p_c - 1)] \text{ [daN/cm}^2\text{]}, \quad (4.1)$$

unde: E_{sti} - modulul static de deformație liniară al pământului, în [daN/cm²];

ρ_{di} - densitatea uscată a pământului, realizată la un moment dat, în [g/cm³];

p_c - factor tehnologic de compactare dependent de caracteristicile compactorului și ale terenului, calculat cu relația următoare:

$$p_c = \frac{Q}{0,18D_r^2} \text{ [daN/cm}^2\text{]}. \quad (4.3)$$

în care: Q este greutatea ruloului [daN]; D_r - diametrul ruloului [cm].

Practic, pentru sistemul compactor VV 170 (cu funcționare în regim static) și terenul de fundare constituit din pământ slab coeziv - lut de Giurgiu a rezultat valoarea: $p_c = 2,22$. Rezultă legea $E_{st} = f(\rho_d)$ propusă:

$$E_{sti} = 1000(\rho_{di}^2 - 2,22\rho_{di} + 1,22) \text{ [daN/cm}^2\text{]}. \quad (4.4)$$

Reprezentarea comparativă a celor două legi polinomiale aproximative, prima determinată pe baza datelor experimentale (Tabelul 4.8), iar cea de-a doua fiind propusă de autorul acestei teze sub forma relației (4.1) este dată în figura 4.13.

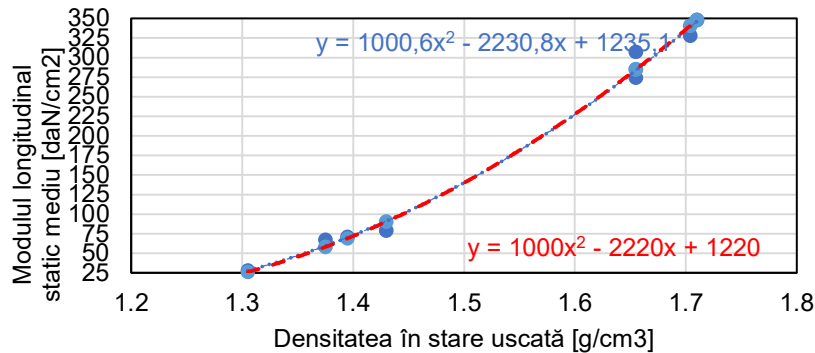


Fig. 4.13 Reprezentarea comparativă a legii $E_{st}=f(\rho_d)$: experimental (culoare albastră) vs analitică – propusă (culoare roșie)

În concluzie, rezultatele obținute și reprezentate în figura 4.13 prezintă un grad foarte ridicat de similitudine a alurei curbei și **validează legea polinomială propusă de autorul tezei în relația (4.4)**. În cazul în care se consideră rezultatele experimentale obținute pentru fiecare din cele patru puncte de măsură atunci rezultă legăturile centralizate în Tabelul 4.9.

Tabelul 4.9 Centralizarea legilor de variație $E_{st} = \rho_i$ pentru fiecare tip de teren analizat

Punct măsură	Grosime strat	Densitate inițială	Umiditate inițială	Legea de variație aproximativă
F	26,5 cm	$0,745\rho_{dmax}$	$0,60w_{opt}$	$E_{st} = 714,28 \rho_i - 903,71$
G	24,5 cm	$0,797\rho_{dmax}$	$0,85w_{opt}$	$E_{st} = 833,33 \rho_i - 1091,33$
H	28 cm	$0,785\rho_{dmax}$	$0,66w_{opt}$	$E_{st} = 833,33 \rho_i - 1079,25$
I	29,5 cm	$0,817\rho_{dmax}$	$1,04w_{opt}$	$E_{st} = 1000 \rho_i - 1352$

4.3.2 Legea dependenței dintre densitatea în stare uscată și umiditatea medie

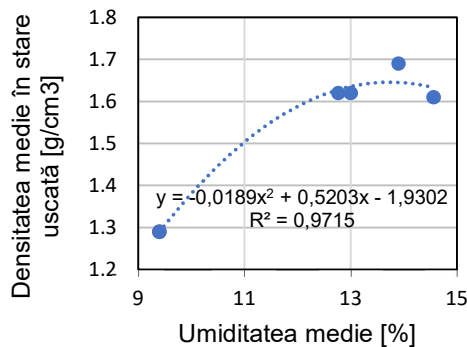


Fig.4.15 Legea de variație a densității în stare uscată în funcție de umiditatea terenului cu grosimea stratului $h_c = 26,4$ cm (măsurători în punctul F, Anexa 3)

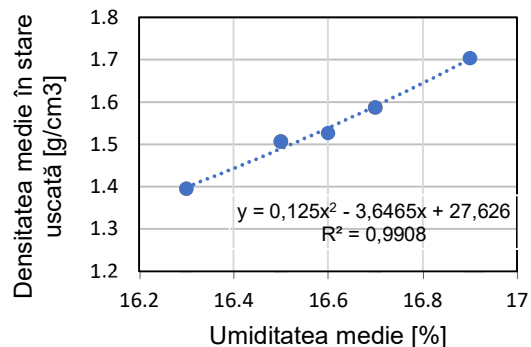


Fig.4.16 Legea de variație a densității în stare uscată în funcție de umiditatea terenului cu grosimea stratului $h_c = 24,5$ cm (măsurători în punctul G, Anexa 3)

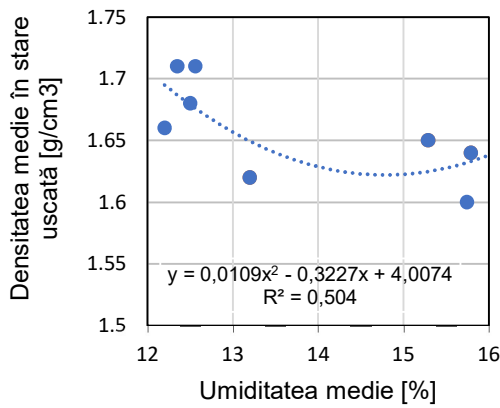


Fig.4.17 Legea de variație a densității în stare uscată în funcție de umiditatea terenului cu grosimea stratului $h_c = 28$ cm (măsurători în punctul H, Anexa 3)

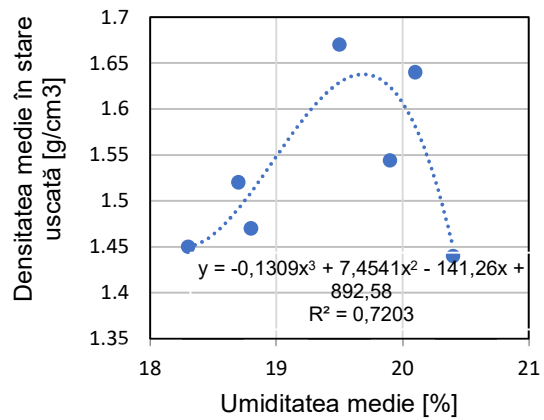


Fig.4.18 Legea de variație a densității în stare uscată în funcție de umiditatea terenului cu grosimea stratului $h_c = 29,5$ cm (măsurători în punctul I, Anexa 3)

Tabelul 4.10 Centralizarea legilor de variație $\rho_d = f(w)$

Punct de măsură	Grosime strat	Legea de variație aproximativă	Abaterea medie pătratică
F	26,5 cm	$\rho_d = -0,0189w^2 + 0,5203w - 1,9302$	$R^2 = 0,9715$
G	24,5 cm	$\rho_d = 0,125w^2 - 3,6465w + 27,626$	$R^2 = 0,9908$
H	28 cm	$\rho_d = 0,0109w^2 - 0,3227w + 4,0074$	$R^2 = 0,5040$
I	29,5 cm	$\rho_d = -0,1309w^3 + 7,4541w^2 - 141,26w + 892,58$	$R^2 = 0,7203$

Pe baza datelor experimentale din punctul de măsurare F (cu $w = 11 \dots 13,6\%$), autorul propune folosirea următoarei relații de calcul a densității în stare uscată:

$$\rho_d = \rho_{dmax} - \sqrt{(\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 - k_p (w_{opt} - w_i) \rho_{dmax}^2 \frac{\Delta h}{D_r}} \quad [\text{g/cm}^3], \quad (4.5)$$

în care: k_p - indice care ține seama de numărul de treceri ale compactorului; $k_p = 0,7$ pentru primele 4 treceri; $k_p = 0,6$ pentru trecerile 5 - 12; Δh – tasarea cumulată a pământului, care a fost realizată la un moment dat, în [cm]; D_r – diametrul ruloului.

4.3.3 Legea dependenței dintre lățimea petei de contact, grad de compactare, tasare, număr de treceri

$$b^* = 0,667D_r \sqrt{(1 - D_i)^2 - k_p \frac{\Delta h}{D_r}} \quad [\text{cm}], \quad (4.6)$$

în care tasarea Δh și diametrul D_r al ruloului compactorului sunt introduse în [cm], iar gradul de compactare inițială D_i este adimensional.

În timpul experimentărilor efectuate în canalul de pământ de la ICECON S.A. București, în cazul compactării cu vibrații, au fost măsurate lungimile petelor de contact ale ruloului vibrator față, iar datele din Tabelul 4.7 au stat la baza identificării legii de variație din figurile 4.19 și 4.20.

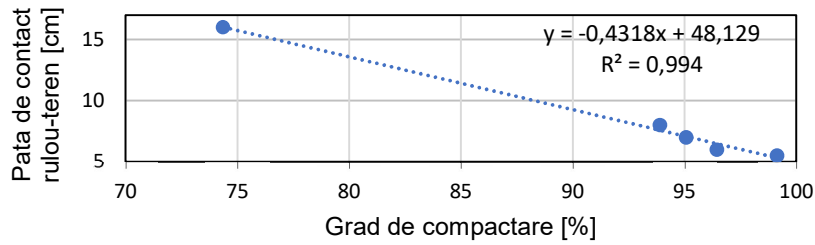


Fig. 4.19 Legea de variație a petei de contact în funcție de gradul de compactare al terenului (măsurători experimentale în canalul de pământ)

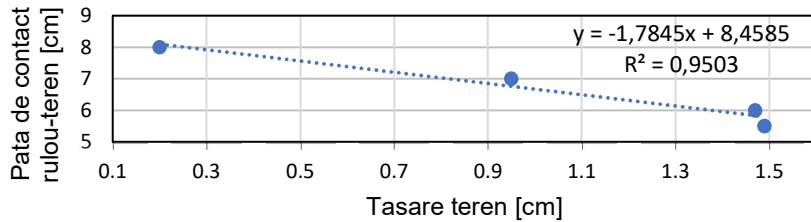


Fig. 4.20 Legea de variație a petei de contact în funcție de tasarea terenului (măsurători experimentale în canalul de pământ)

Se remarcă faptul că tendința de variație a modificării lungimii petei de contact dintre rulou vibrator și teren este una liniară, intens descrescătoare, cu grad mare de aproximare (>95%), aspect care ușurează algoritmul de calcul atașat unui model pentru comportarea unui anumit tip de pământ sub acțiunea sarcinii tehnologice aplicate. Evaluarea performanței procesului de compactare se poate face și prin exprimarea dependenței dintre dimensiunile petei de contact și gradul de compactare al terenului. În acest sens, în figura 4.21 sunt exemplificate legi de aproximare (centralizate în tabelul 4.11), cu eroarea pătratică medie >98%.

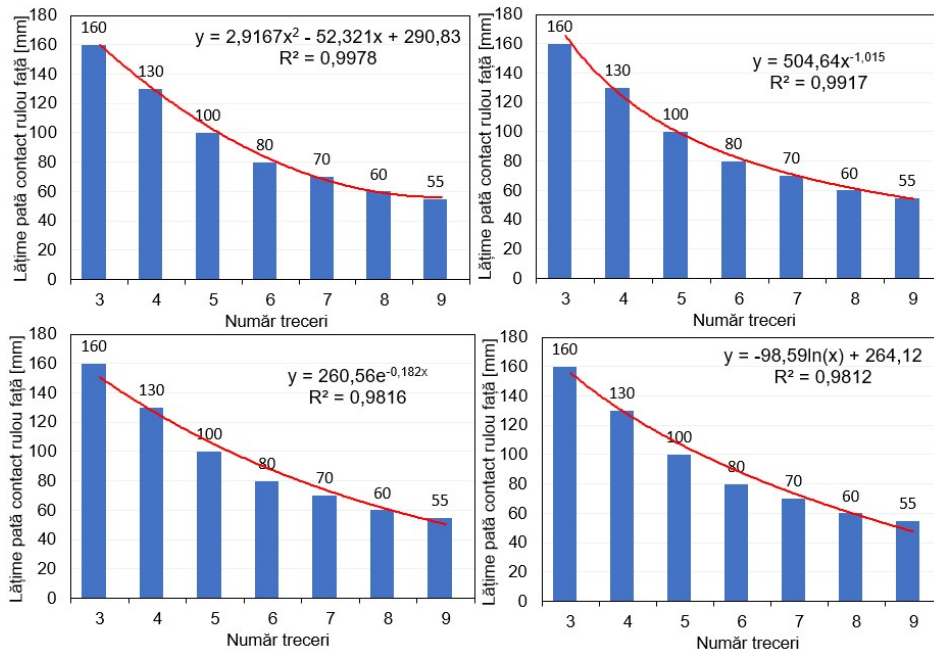


Fig. 4.21 Legea de aproximare a variației lățimii petei de contact pe ruloul vibrator din față al compactatorului ABG – DD16, la compactarea terenului de pe pista nr.1 (după primele 3 treceri realizate în regim static de lucru cu utilajul)

Tabelul 4.11 Centralizarea legilor de variație $b^* = f(N)$

Loc de măsură	Legea de variație aproximativă	Abaterea medie pătratică
Canalul de pământ. Pista 1	$b^* = 2,9167N^2 - 52,321N + 290,83$	$R^2 = 0,9978$
	$b^* = 504,64N^{-1,015}$	$R^2 = 0,9917$
	$b^* = 260,56 \times 10^{-0,182N}$	$R^2 = 0,9816$
	$b^* = -98,59 \ln(N) + 264,12$	$R^2 = 0,9812$

4.3.4 Legea dependenței presiunii specifice din teren și tasare

$$\frac{\Delta h}{h_c} = 1000(25,1p - 33,3), \quad (4.7)$$

de unde rezultă

$$\sigma(N) = 4 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta h(N)}{h_c} + 1,32 \text{ [daN/cm}^2\text{]}, \quad (4.8)$$

în care: Δh este tasarea realizată de mașină pe durata t_c de solicitare sub sarcină a terenului în timpul unei treceri; h_c – grosimea stratului care se compactează.

Pentru realizarea unui scenariu de simulare a procesului de compactare este mult mai facilă luarea în calcul a unei expresii de dependență a unui parametru în raport cu timpul, astfel încât se va indica și expresia analitică pentru aproximarea funcției $\Delta h/h_c - t_c$ (corespunzătoare variației tasării specifice $\Delta h/h_c$ în timpul de solicitare sub sarcină t_c), care are forma (vezi fig. 3.9):

$$\frac{\Delta h}{h_c} = 0,0049 \ln(t_c) + 0,0529. \quad (4.9)$$

4.3.5 Legea dependenței rigidității și frecvenței proprii a terenului de densitatea în stare uscată

$$k(N) = \frac{1,13 E_{st}(N) \sqrt{B b^*(N)}}{1 - \vartheta^2}. \quad (4.10)$$

$$f_0(N) = \frac{1}{4h_c} \sqrt{\frac{G(N)}{\rho(N)}}. \quad (4.11)$$

4.3.6 Legea dependenței tasării de numărul de treceri ale compactorului stabilită pentru fiecare tip de teren analizat

În timpul procesului de compactare, după trecerile utilajului (fără folosirea vibrațiilor), s-au efectuat măsurători în ceea ce privește tasarea curentă și cumulată a terenului analizat, corespunzătoare celor 4 puncte de măsură (F - I). Rezultatele obținute au stat la baza identificării legilor de aproximare a variației tasărilor de numărul de treceri ale compactorului (figurile 4.22-4.25). Centralizarea legilor de variație ale tasării cumulate $\Delta h_c = \Delta h_c(N)$ sunt date în Tabelul 4.12.

Tabelul 4.12 Centralizarea legilor de variație $\Delta h_c = \Delta h_c(N)$

Punct de măsură	Grosime strat	Densitate inițială	Umiditate inițială	Legea de variație aproximativă
F	26,5 cm	$0,745 \rho_{dmax}$	$0,60 w_{opt}$	$\Delta h_c = - 0,0205N^2 + 0,4265N + 1,0739$
G	24,5 cm	$0,797 \rho_{dmax}$	$0,85 w_{opt}$	$\Delta h_c = - 0,0128N^2 + 0,2736N + 0,3409$
H	28 cm	$0,785 \rho_{dmax}$	$0,66 w_{opt}$	$\Delta h_c = - 0,0164N^2 + 0,4197N + 0,038$
I	29,5 cm	$0,817 \rho_{dmax}$	$1,04 w_{opt}$	$\Delta h_c = - 0,0013N^2 + 0,2005N - 0,074$

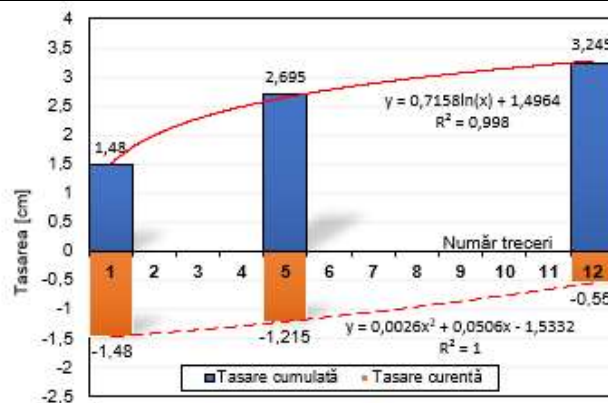


Fig. 4.22 Variația tasării curente și cumulate pentru trecerile compactorului (măsurători în punctul F, Anexa 3)

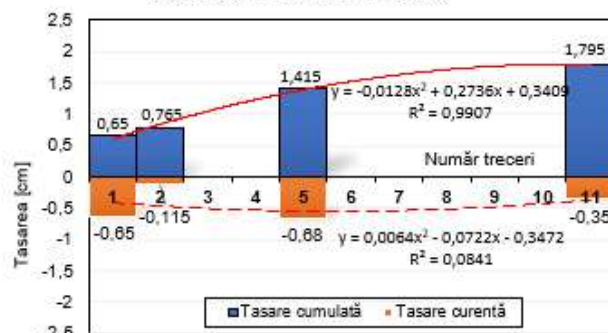


Fig. 4.23 Variația tasării curente și cumulate pentru trecerile compactorului (măsurători în punctul G, Anexa 3)

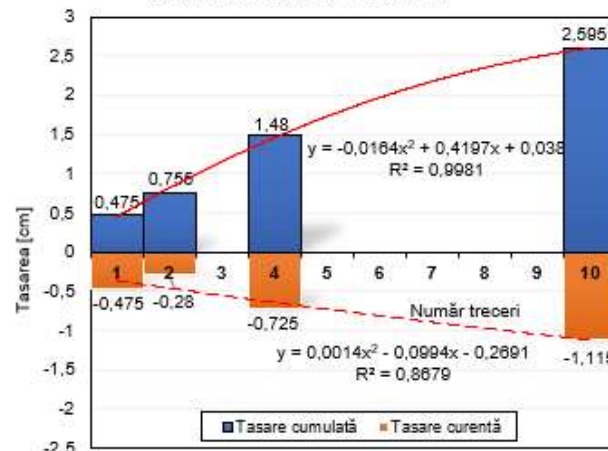


Fig. 4.24 Variația tasării curente și cumulate pentru trecerile compactorului (măsurători în punctul H, Anexa 3)

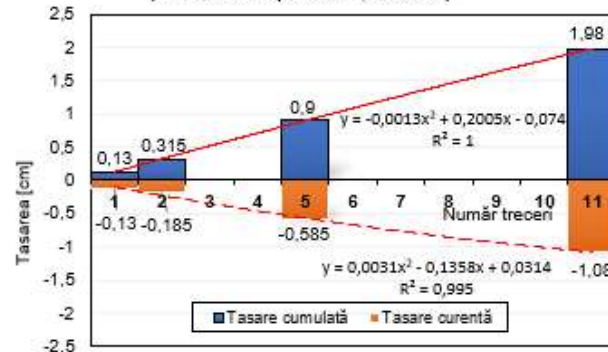


Fig. 4.25 Variația tasării curente și cumulate pentru trecerile compactorului (măsurători în punctul I, Anexa 3)

4.3.7. *Legea dependenței gradului de compactare de numărul de treceri ale compactorului stabilită pentru fiecare tip de teren analizat.* În stabilirea legităților (Fig. 4.26–4.29, Tab. 4.13) s-a ținut cont de evoluția gradului de compactare a unui material, care se asimilează d.p.d.v. matematic cu graficul unei funcții logaritmice ce admite asimptotă orizontală corespunzătoare limitei de compresibilitate a terenului.

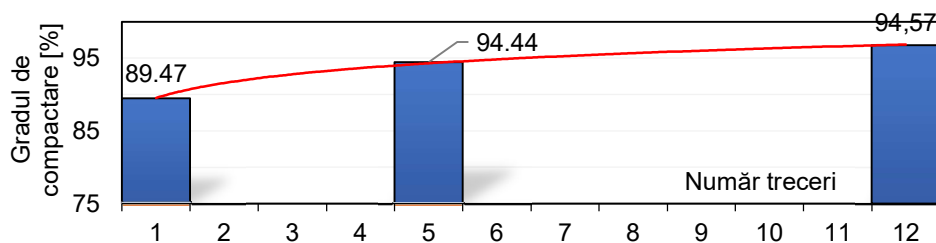


Fig. 4.26 Variația gradului de compactare în funcție de trecerile compactorului, corespunzătoare măsurătorilor din punctul F, pentru un teren cu grad de compactare inițială $D_i = 74,5 \%$

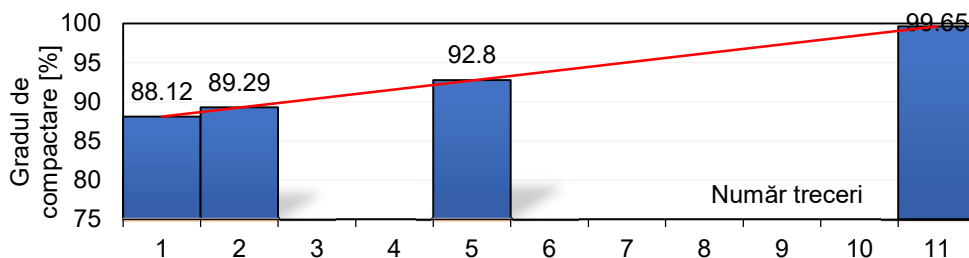


Fig. 4.27 Variația gradului de compactare în funcție de trecerile compactorului, corespunzătoare măsurătorilor din punctul G, pentru un teren cu grad de compactare inițială $D_i = 79,7 \%$

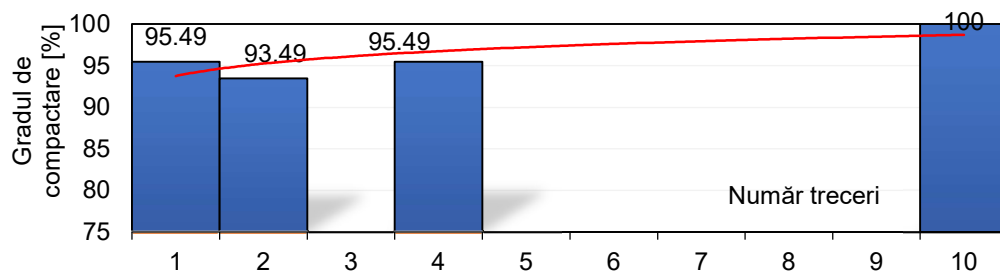


Fig. 4.28 Variația gradului de compactare în funcție de trecerile compactorului, corespunzătoare măsurătorilor din punctul H, pentru un teren cu grad de compactare inițială $D_i = 78,5 \%$

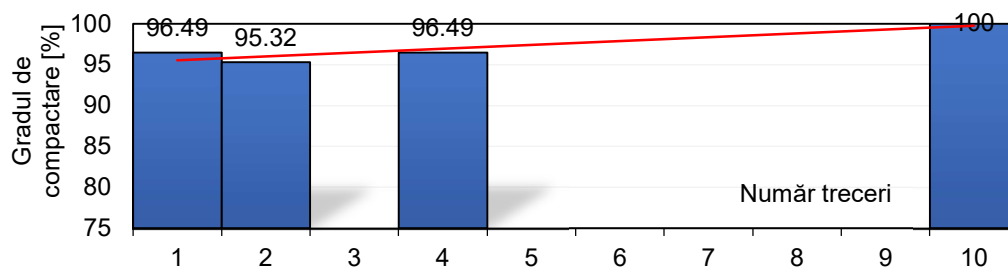


Fig. 4.29 Variația gradului de compactare în funcție de trecerile compactorului, corespunzătoare măsurătorilor din punctul I, pentru un teren cu grad de compactare inițială $D_i = 81,7 \%$

Tabelul 4.13 Centralizarea legilor de variație $D_i = D_i(N)$

Punct de măsură	Grosime strat	Densitate inițială	Umiditate inițială	Legi de variație aproximative
F	$0,57h_{opt}$	$0,745\rho_{dmax}$	$0,59w_{opt}$	- pt. $N = 1 \dots 12$: $D_i(N) = 2,9599\ln(N) + 89,524$; $R^2 = 0,9987$ sau $D_i(N) = 0,6273N + 89,80$; $R^2 = 0,8753$.
G	$0,83h_{opt}$	$0,797\rho_{dmax}$	$0,85w_{opt}$	- pt. $N = 1 \dots 11$: $D_i(N) = 1,1525N + 86,991$; $R^2 = 1$.
H	$0,86h_{opt}$	$0,785\rho_{dmax}$	$0,66w_{opt}$	- pt. $N = 1 \dots 10$: $D_i(N) = 2,152\ln(N) + 93,76$; $R^2 = 0,5907$ sau $D_i(N) = 0,5859N + 93,835$; $R^2 = 0,8846$.
I	$1,24h_{opt}$	$0,817\rho_{dmax}$	$1,04w_{opt}$	- pt. $N = 1 \dots 10$: $D_i(N) = 0,468N + 95,086$; $R^2 = 0,8667$.

Ținând cont de faptul că în desfășurarea procesului de compactare, se recomandă ca primele 3 treceri să fie efectuate static, iar următoarele cu rulourile în regim de vibrație (dinamic), autorul tezei de doctorat propune o relație empirică liniară de calcul al gradului de compactare prognozat a fi obținut, după fiecare din cele 3 treceri, pe baza parametrilor care caracterizează starea inițială a terenului (densitatea inițială în stare uscată ρ_i , densitatea maximă în stare uscată a terenului ρ_{max} , umiditatea inițială w_i , umiditatea optimă a terenului w_{opt} , numărul de treceri N). Relația este de forma:

$$D_i(N) = \left(2 - \frac{\rho_i}{\rho_{max}}\right) \cdot N + \alpha \cdot \frac{\rho_i}{\rho_{max}} \cdot \left(1 + 0,001 \cdot \frac{w_i}{w_{opt}}\right), \quad (4.13)$$

unde α este un coeficient de corecție definit astfel:

$$\alpha = \begin{cases} 1.135 & \text{dacă } 70\% \leq D_i < 75\% \\ 1.0 & \text{dacă } 75\% \leq D_i < 80\% \\ 1.025 & \text{dacă } 80\% \leq D_i < 85\% \\ 1.1 & \text{dacă } D_i \geq 85\%. \end{cases} \quad (4.14)$$

Valabilitatea relației (4.13) trebuie să fie corelată și cu indicele tehnologic al mașinii i_m definit prin relația

$$i_m = \beta \frac{m_r}{BD_r} [\text{kg/m}^2], \quad (4.15)$$

în care: m_r este masa ruloului; B – lățimea ruloului; D_r – diametrul ruloului; β - coeficient de amplificare a sarcinii când ruloul lucrează cu vibrații, care se calculează ca raport între forța dinamică și greutatea ruloului. În condiții statice de lucru cu ruloul compactor, acest coeficient are valoarea egală cu unitatea.

Se precizează că indicele tehnologic al compactorului VV 170 are valoarea $i_m = 0.27 \text{ kg/cm}^2$. De asemenea, trebuie mai trebuie făcută precizarea că umiditatea inițială a terenului nu trebuie să depășească umiditatea optimă rezultată în urma testului Proctor, pentru a fi valabilă relația (4.13).

În continuare sunt date în figura 4.30 în mod comparativ, evoluțiile gradului de compactare pentru primele 3 treceri statice, în cazul celor 3 puncte de măsură (F, G, H) care îndeplinesc condițiile de aplicare ale relației propuse.

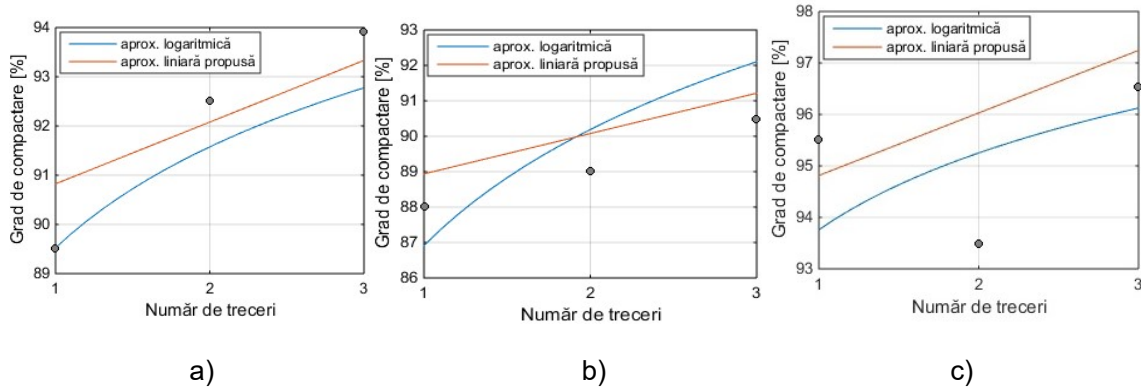


Fig. 4.30 Comparație între legi de aproximare a gradului de compactare, pentru primele 3 treceri statice, corespunzătoare măsurătorilor din:
a) punctul F; b) punctul G; c) punctul H.

O imagine de ansamblu a performanței procesului de compactare obținut în cazul celor 4 tipuri de teren analizate, în condiții de lucru cu compactorul VV 170 (fără vibrații) este prezentată în figura 4.31. Se observă că valoarea gradului de compactare are o creștere cu pondere semnificativă până la a 5-a trecere a compactorului, urmată de scăderea intensității de creștere pentru următoarele treceri.

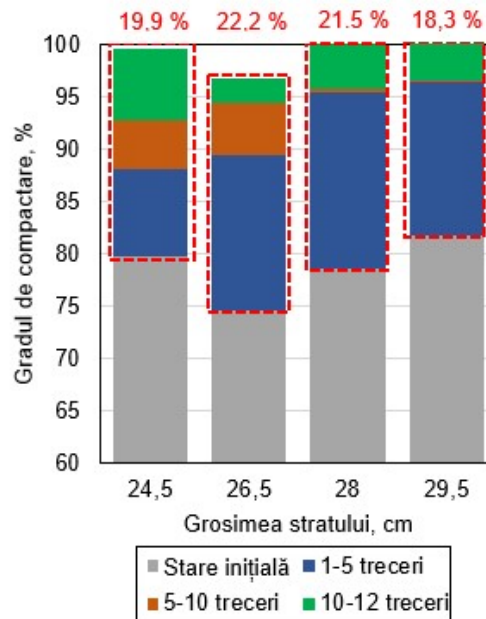


Fig. 4.31 Variația gradului de compactare în funcție de starea inițială a terenului, grosimea stratului și numărul de treceri ale compactorului, corespunzătoare măsurătorilor din punctele F, G, H, I

Aspectele descrise anterior arată comportările diferite ale celor 4 tipuri de terenuri sub acțiunea aceeași sarcini tehnologice transmise de ruloul compactor, ceea ce evidențiază complexitatea și specificitatea procesului de compactare privit în ansamblul său, îngreunând prognozarea cu acuratețe a atingerii gradului de compactare impus chiar dacă se cunoaște o gamă largă de parametri care descriu starea inițială a terenului.

4.4 Concluzii parțiale

Ansamblul testelor experimentale efectuate și sistematizarea rezultatelor (după prelucrarea lor) au fost prezentate într-o formă care să permită utilizatorului implementarea acestora într-un algoritm de calcul computerizat. Astfel, toate legitățile identificate, propuse și centralizate în acest subcapitol al acestei teze de doctorat sunt deosebit de utile pentru elaborarea unui model teoretic de comportare a pământului (MTC) integrat apoi într-un model care să stea la baza studiului interacțiunii organ de compactare (rulou static sau cu vibrații) – teren, cu respectarea domeniului de existență al acestor legi (procentul din umiditatea optimă sau densitatea maximă în stare uscată, intervalul de grosimi ale straturilor, indicele tehnologic al mașinii de compactat, numărul de treceri, tehnologia aplicată).

5. Modelarea reologică și simularea interacțiunii rulou-teren

5.1 Principiile de lucru ale vibratoarelor inerțiale pentru creșterea eficienței procesului de compactare

Aționările rulourilor vibratoare ale utilajelor de compactare pot fi cu un singur vibrator sau cu două, ultimele fiind cele mai răspândite, asigurând rotația sincronă a maselor excentrice. Indiferent de varianta lor constructivă, generarea vibrațiilor pentru acționarea dinamică a ruloului compactor este rezultatul dezvoltării unei/unor forțe dinamice care are/au direcții diferite în funcție de poziționarea masei/maselor excentrice.

5.2.2. Modelarea matematică a răspunsului terenului la excitație dinamică inerțială armonică

Modelarea unui fenomen vibratoriu pe baza schematizării reologice tip Voigt-Kelvin se bazează pe un model compus din două elemente, unul elastic și celălalt vâscos, conectate în paralel, care este supus la excitației dinamice inerțiale (Figura 5.4) cu scopul de a simula comportamentul funcțional al echipamentului tehnologic vibratil, precum și efectul acțiunii acestuia asupra mediului de lucru. Excitația cinematică este de tipul $x(t) = A_0 \sin \omega t$ și are ca efect un transfer de energie către bază (adică teren), producând astfel un răspuns dinamic din partea terenului cuantificabil prin evaluarea forței vâscoase $Q(t)$.

Se face precizarea că se va modela cu elemente vâscoelastice terenul, cu caracteristici identice ale acestora (fig. 5.4) pentru o stare anumită și un regim tehnologic, făcând posibilă abordarea simulării compactării cu ajutorul unui sistem vâscoelastic liniar.

În continuare, în vederea realizării analizei efectului produs în teren de acțiunea ruloului vibrator, se vor face următoarele precizări [76,77]:

a) excitația de tip inerțial în mișcare de rotație a masei m_0 cu raza r și viteza unghiulară ω , este generată printr-o funcție de forță armonică de forma:

$$F(t) = m_0 r \omega^2 \sin(\omega t); \quad (5.2)$$

b) răspunsul la deplasarea instantanee a ruloului este de forma $x(t) = A \sin \omega t$, iar forța de reacție (adică răspunsul terenului la acțiunea ruloului) este $Q(t) = Q_0 \sin(\omega t - \varphi)$;

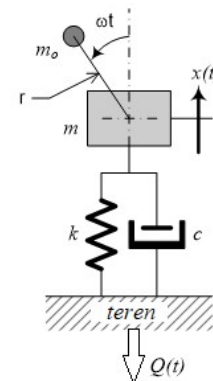


Fig. 5.4. Schematizarea modelului reologic Voigt-Kelvin cu parametri constanți

c) ecuația diferențială de echilibru dinamic are următoarea formă:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 r \omega^2 \sin \omega t, \quad (5.3)$$

unde forța de reacție instantanee poate fi exprimată prin ecuația de ordin I: $Q(t) = c\dot{x} + kx$.

După introducerea notațiilor uzuale $p^2 = \frac{k}{m+m_0}$, $\Omega = \frac{\omega}{p}$, $\zeta = \frac{c}{2(m_0+m)p}$, amplitudinea forței dinamice care influențează în mod direct și semnificativ răspunsul dinamic al modelului are următoarele expresii de calcul

$$F_0 = m_0 r \omega^2 = m_0 r p^2 \Omega^2 = m_0 r \frac{k}{m+m_0} \Omega^2 = F_0^{st} \Omega^2 = k A_{st}, \quad (5.4)$$

unde: A_{st} reprezintă amplitudinea în postrezonanță: $A_{st} = m_0 r / (m_0+m)$;

F_0^{st} - forța corespunzătoare deformației elastice cu A_{st} : $F_0^{st} = m_0 r k / (m_0+m)$.

Forța de răspuns a terenului la acțiunea ruloului are relația de calcul:

$$Q_0 = F_0^{st} \Omega^2 \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}}. \quad (5.5)$$

Transmisibilitatea dinamică T a mișcării se definește astfel:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st} \Omega^2} \quad (5.6)$$

sau după înlocuirea parametrilor:

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}}. \quad (5.7)$$

Amplitudinea mișcării ce corespunde deplasării instantanee ca răspuns al sistemului este:

$$A = \frac{\Omega^2 A_{st}}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (5.8)$$

deci $A = A(\Omega, \zeta)$ este o funcție exprimată în pulsația relativă Ω și fracțiunea de amortizare ζ .

Întrucât valoarea rigidității stratului compactat crește cu fiecare trecere (până la atingerea valorii maxime corespunzătoare gradului maxim de compactare, după care rămâne constantă ca valoare) se poate face afirmația că această rigiditate este una dinamică.

5.2.3. Modelarea matematică a răspunsului terenului (cu rigiditate variabilă) la excitație dinamică inerțială armonică

În acest subcapitol se prezintă un model dinamic cu rigiditate care variază (Figura 5.5), astfel încât pentru fiecare trecere a ruloului vibrator pe același strat se va realiza o anumită rigiditate, iar după n treceri se vor atinge n valori pentru rigiditățile k_1, k_2, \dots, k_n .

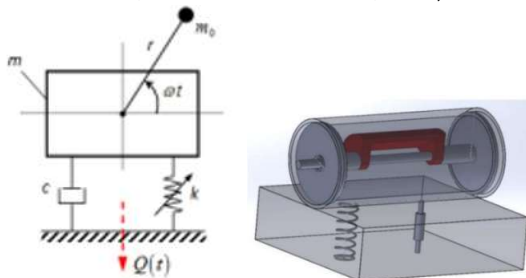


Fig. 5.5 Schematizarea modelului reologic Voigt-Kelvin cu parametri variabili

Răspunsul dinamic va fi dat sub forma amplitudinii deplasării imediate a vibrațiilor, notată cu A [67-69, 72]. Astfel, pentru fiecare model se va observa influența crescândă a rigidității asupra valorilor parametrice.

Expresia amplitudinii mișcării este de forma:

$$A^{V-K}(\Omega, \zeta) = \frac{m_0 r \Omega^2}{m \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (5.10)$$

Forța de răspuns a terenului la acțiunea ruloului este de forma:

$$Q_0^{V-K}(\Omega, \zeta) = \frac{k\Omega^2 m_0 r}{m} \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (5.11)$$

Transmisibilitatea dinamică este dată de formula:

$$T^{V-K}(\Omega, \zeta) = \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (5.12)$$

Prin compactare, presiunea în partea de jos a terenului, prin fiecare strat crește odată cu numărul de lovituri ale ruloului vibrator și ajunge la valoarea maximă când terenul are densitatea maximă uscată [79]. Energia disipată în procesul de compactare prin vibrație poate fi calculată cu relația [73]:

$$W_d = \pi c \omega A^2 \quad (5.13)$$

sau luând în considerare relația (5.10)

$$A = m_0 r \omega^2 \frac{1}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (5.14)$$

rezultă:

$$W_d = \pi c (m_0 r)^2 \frac{\omega^5}{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2} \quad (5.15)$$

În concluzie, se constată că forța transmisă în teren depinde de momentul static al vibratorului, de masa ruloului, de rigiditatea stratului după compactare, de pulsația și de amortizarea relativă, în timp ce transmisibilitatea depinde doar de rigiditatea și amortizarea stratului de pământ.

5.2.4. Simularea numerică a răspunsului terenului la excitație dinamică inerțială armonică

În cazul tematicii abordate în această teză se studiază, pe de o parte, comportamentul funcțional al unui compactor vibrator, iar pe de altă parte, transmisibilitatea și amplitudinea vibrațiilor resimțite în pământuri de umplură, slab coezive.

Dintre categoriile cunoscute de pământuri, pentru studiul comportării dinamice a terenurilor elastice sau elastoplastice aflate sub acțiunea vibrațiilor transmise în procesul de compactare, se recomandă utilizarea modelului Voigt-Kelvin [80] a cărei caracteristică preponderent elastică se pretează foarte bine la simularea răspunsului dinamic al acestor terenuri care sunt caracterizate printr-o influență redusă a vâscozității naturale în caracteristica globală tensiune – deformație. Se consideră un rulou compactor în regim de lucru cu vibrații, modelat ca un sistem vibrator prin modelul Voigt-Kelvin, în care rigiditatea terenului are valori distincte, iar pulsația sursei generatoare de vibrații cu valori între $\omega = 0 \dots 500$ rad/s. Parametrilor reprezentați prin coeficientul de amortizare vâscoasă c și fracțiunea de amortizare ζ li se vor atribui valori distincte pentru a modela procesul real de compactare, întrucât după fiecare trecere a compactorului vibrator se obțin stări intermediare (i) ale tasării straturilor terenului caracterizate printr-o modificare continuă a rigidității acestora (până la atingerea gradului impus de compactare, $D[\%]$). În practică, fiecărei valori distincte a rigidității terenului (k_i), obținută după trecerea i a compactorului vibrator, îi corespunde o anumită valoare a coeficientului de amortizare vâscoasă (c_i), care indică răspunsul terenului la acțiunea forței perturbatoare transmisă de ruloul vibrator. Trebuie subliniat faptul că, între cei doi parametri există o relație de interdependență de forma $c = 2\zeta\sqrt{km}$, iar fracțiunea de amortizare trebuie să fie limitată de valoarea $\zeta \leq 0,7$, rezultând astfel gama de valori cu care s-a realizat simularea numerică în studiul de caz prezentat în această teză de doctorat, și anume: $\zeta = 0,16 \dots 0,7$.

S-au realizat două scenarii de simulare, astfel:

- a) scenariul 1: s-a variat cu *valori discrete parametrul de rigiditate* k_i și s-au obținut prin simulare numerică curbele reprezentate în figurile 5.6 – 5.9 cu variația parametrilor specifici modelului (amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q și transmisibilitatea T), precum și a energiei disipate în teren, a rigidității dinamice, a fracțiunii de amortizare critică în raport cu pulsația sursei excitatoare ω , cu ambii parametri k și c , cu raportul pulsațiilor Ω ;
- b) scenariul 2: s-a variat cu *valori discrete fracțiunea de amortizare critică* ζ_i și s-au obținut prin simulare numerică curbele reprezentate în figurile 5.10 - 5.13.

În ambele scenarii de simulare s-au considerat 2 cazuri diferite de regimuri de lucru, astfel:

- caz 1: *regim de lucru rapid (cu frecvență mare)*;
- caz 2: *regim de lucru lent (cu frecvență mică)*.

Pe baza mărimilor de intrare centralizate în Tabelul 5.1 și a ecuației de mișcare a sistemului rulou-teren s-a implementat un algoritm de calcul în mediul Matlab pentru evaluarea parametrilor de interes ai procesului de compactare, precum și pentru evidențierea modului de variație în frecvență sau corelații interparametrice [54].

Tabelul 5.1. Datele de identificare ale primului scenariu de simulare în cazul 1

Date inițiale teren
-categorie teren: pământ de umplură, slab coeziv -modulul elastic static: $E_{st} = 139,4 \text{ daN/cm}^2$ -fracțiunea din amortizarea critică: $\zeta = 0,283$ -gradul de compactare inițială: $D_i = 0,8567$
Date inițiale rulou vibrator
-masa per rulou: $m = 830 \text{ kg}$ -momentul static: $M_{st} = m_o r = 0.066 \text{ kgm}$ -excentricitatea: $r = 0,066 \text{ m}$ -masa pieselor excentrice: $m_o = 1 \text{ kg}$ -lățime rulou: $B = 0.80 \text{ m}$ -diametru rulou: $D_r = 0.62 \text{ m}$ -frecvența de vibrație în regim de lucru: $f = 48 \text{ Hz}$ -amplitudinea forței generatorului de vibrații (forța dinamică): $F_o = 6480 \text{ N}$ -viteza de deplasare în regim de lucru: $V_{max} = 1.44 \text{ km/h}$
Date inițiale interacțiune rulou-teren
-regim de lucru rapid: cu vibrații cu frecvență ridicată -modelare interacțiune cu model Voigt-Kelvin: $k = 2 \times 10^6, 4 \times 10^6, 6 \times 10^6, 8 \times 10^6, 10 \times 10^6 \text{ N/m}$ și $c = 3 \times 10^4 \text{ Ns/m}$

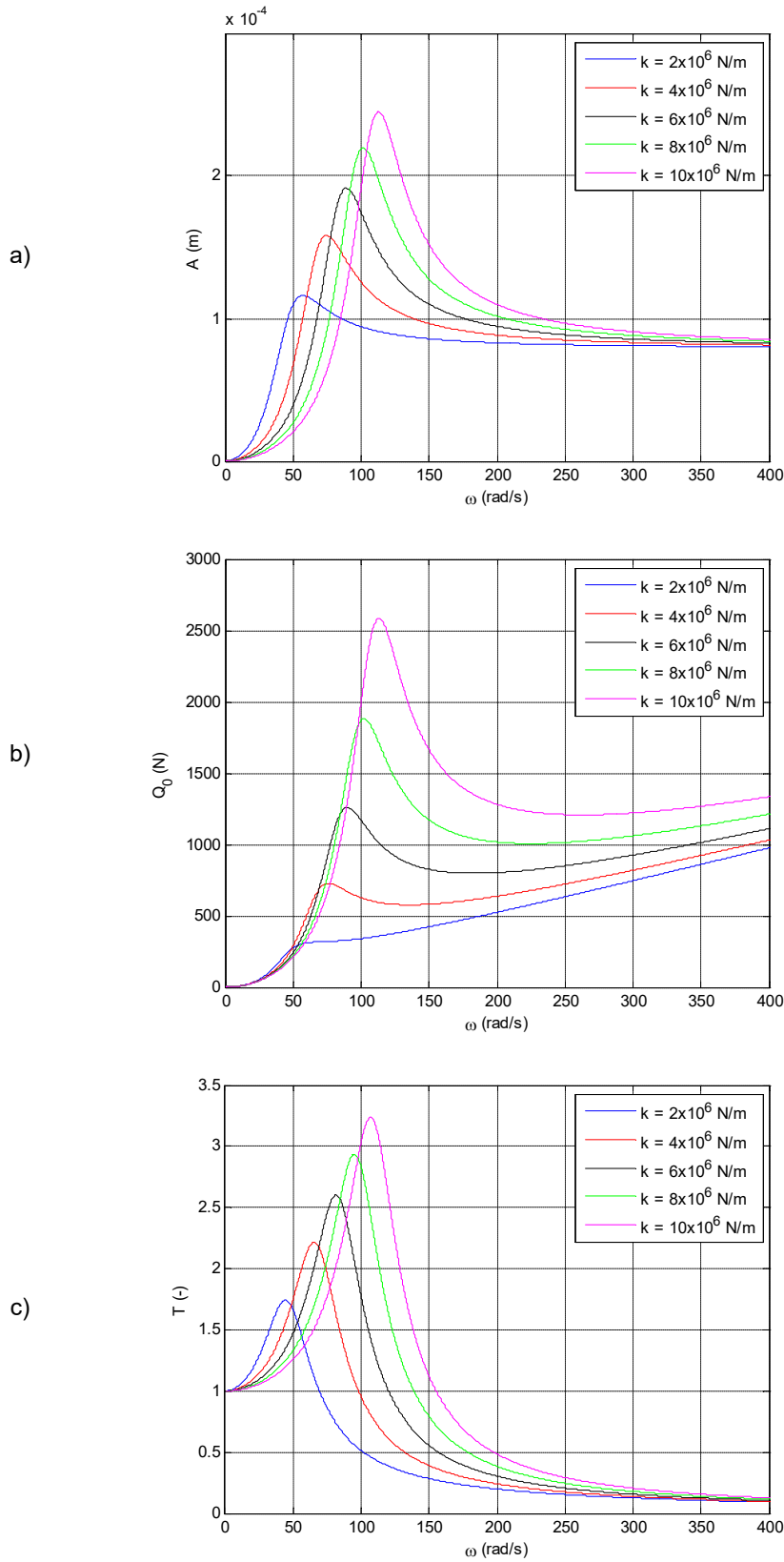


Fig. 5.6 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu pulsația sursei excitatoare.
Primul scenariu de simulare în cazul 1

Corelațiile celor trei parametri, precum amplitudine vibrație rului, forță transmisă, transmisibilitate, în funcție de modificările în rigiditate și amortizare ale terenului, la frecvența de lucru (adică pentru $\omega = 301,5929 \text{ rad/s}$), sunt ilustrate în reprezentările grafice din figura 5.7.

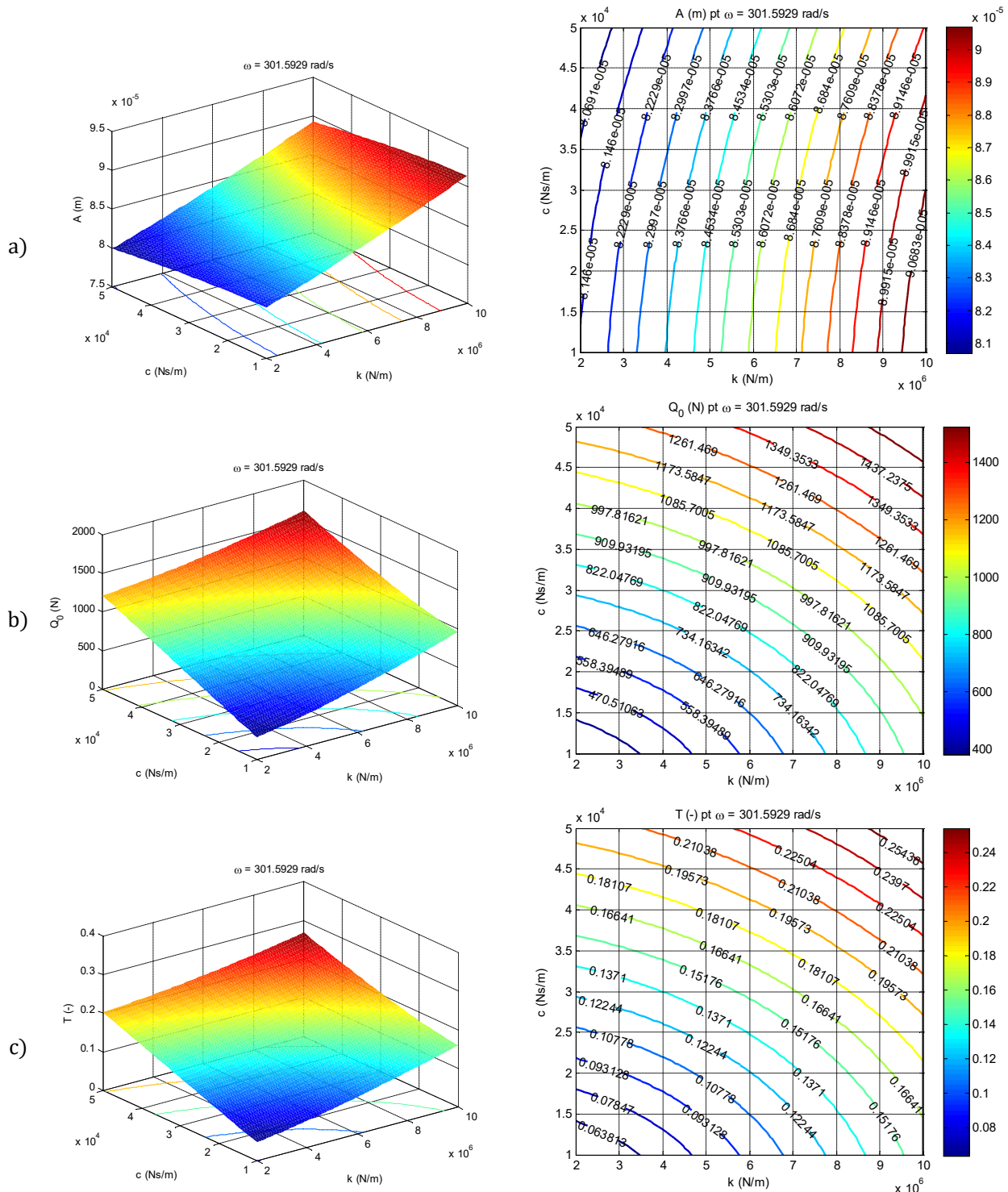


Fig. 5.7 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu rigiditatea și amortizarea terenului. Primul scenariu de simulare în cazul 1

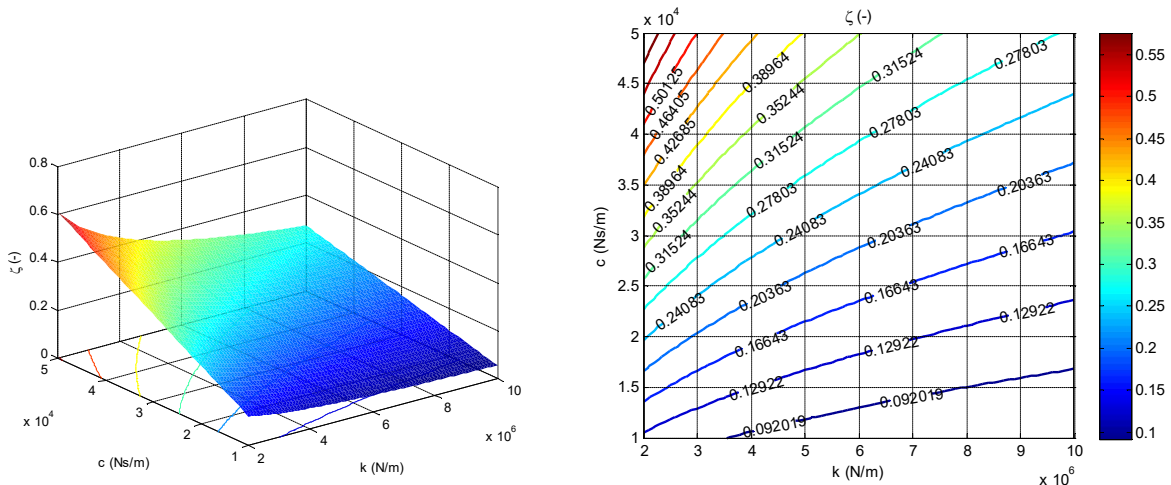


Fig. 5.8. Variația fracțiunii din amortizarea critică în raport cu rigiditatea și amortizarea terenului. Primul scenariu de simulare în cazul 1

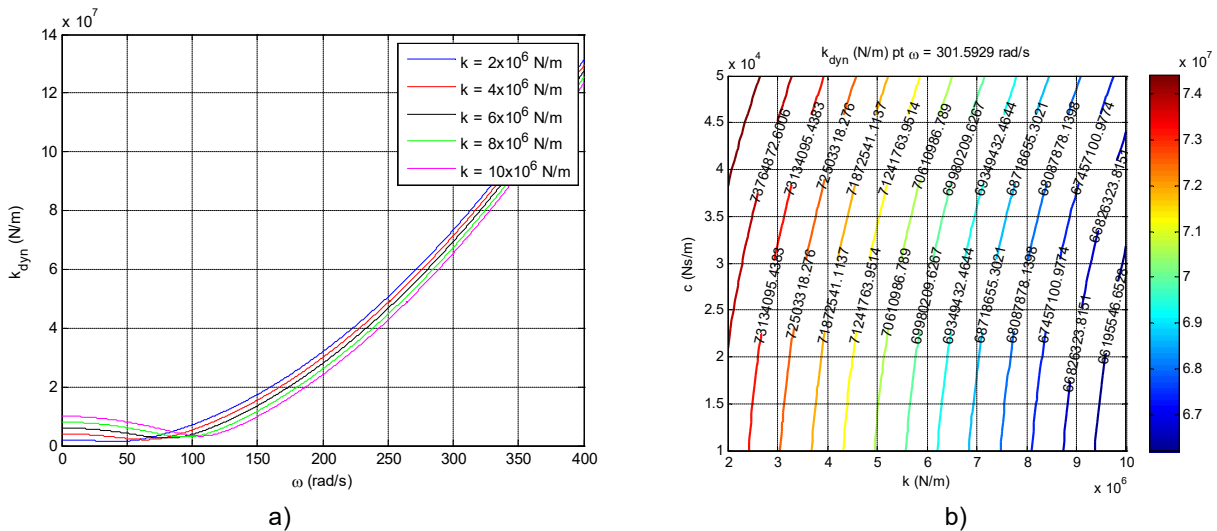


Fig. 5.9. Variația rigidității dinamice în funcție de: a) pulsația sursei excitatoare; b) rigiditatea și amortizarea terenului, pentru frecvența de lucru. Primul scenariu de simulare în cazul 1

Se observă că diferența dintre rigiditatea k_0 și k_{din} este semnificativ mai mare atunci când utilajul cu rulou vibrator lucrează în regim de post-rezonanță, lucru pus în evidență de reprezentările din figura 5.9. Astfel, se poate observa că, la variația discretă a amortizării, rigiditatea dinamică obținută la viteza unghiulară ω_1 apropiată de cea corespunzătoare pulsației proprii a ruloului ω_n crește odată cu creșterea coeficientului de amortizare ζ . În schimb, în zona regimului de lucru al vibrațiilor în post-rezonanță, adică pentru $\omega_2 \gg \omega_n$, influența amortizării devine neglijabilă, însă rigiditatea dinamică crește semnificativ odată cu creșterea lui ω_2 față de frecvența de rezonanță. Pe baza analizei comportamentului dinamic al unui echipament tehnologic de compactare prin vibrație, s-a observat că: **analiza rigidității dinamice efectuată în funcție de parametrul structural de amortizare, la variația continuă a frecvenței de excitație, este o metodă de analiză care oferă informații relevante pentru evaluarea comportamentului sistemului rulou vibrator-teren, modelat ca un sistem dinamic liniar vâscoelastic cu un grad de libertate, cu parametri variabili.**

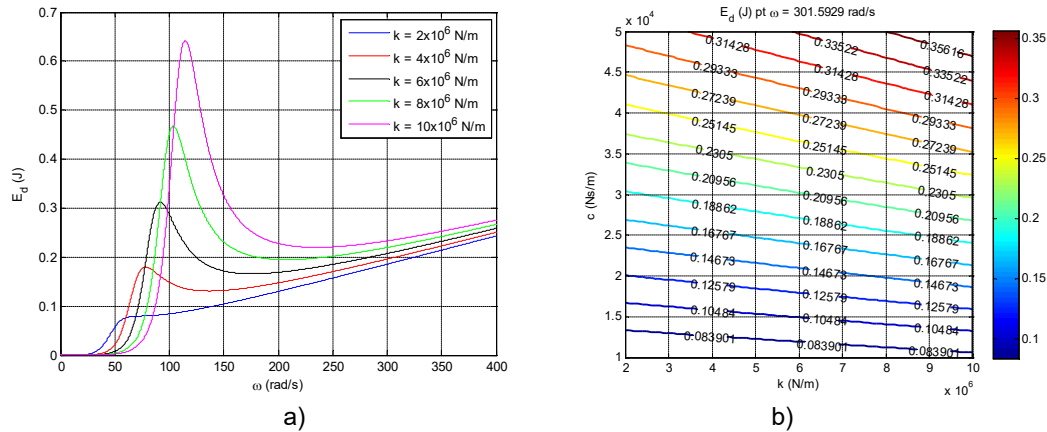


Fig. 5.10 Variația energiei disipate în teren în funcție de:
 a) pulsația sursei excitatoare; b) rigiditatea și amortizarea terenului, pentru frecvența de lucru.
 Primul scenariu de simulare în cazul 1

În continuare, se procedează în mod similar, pentru cazul 2 al primului scenariu de simulare care este definit în Tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. Datele de identificare ale primului scenariu de simulare în cazul 2

Date inițiale teren
-categorie teren: pământ de umplură, slab coeziv -modulul elastic static: $E_{st} = 139,4 \text{ daN/cm}^2$ -fracțiunea din amortizarea critică: $\zeta = 0,283$ -gradul de compactare inițială: $D_i = 0,8567$
Date inițiale rulou vibrator
-masa per rulou: $m = 830 \text{ kg}$ -momentul static: $M_{st} = m_0 r = 0,187 \text{ kgm}$ -excentricitatea: $r = 0,187 \text{ m}$ -masa pieselor excentrice: $m_0 = 1 \text{ kg}$ -lățime rulou: $B = 0,80 \text{ m}$ -diametru rulou: $D_r = 0,62 \text{ m}$ -frecvența de vibrație în regim de lucru: $f = 25 \text{ Hz}$ -amplitudinea forței generatorului de vibrații (forța dinamică): $F_0 = 4680 \text{ N}$ -viteza de deplasare în regim de lucru: $V_{max} = 1,44 \text{ km/h}$
Date inițiale interacțiune rulou-teren
-regim de lucru lent: cu vibrații cu frecvență mică -modelare interacțiune cu model Voigt-Kelvin: $k = 2 \times 10^6, 4 \times 10^6, 6 \times 10^6, 8 \times 10^6, 10 \times 10^6 \text{ N/m}$ și $c = 3 \times 10^4 \text{ Ns/m}$

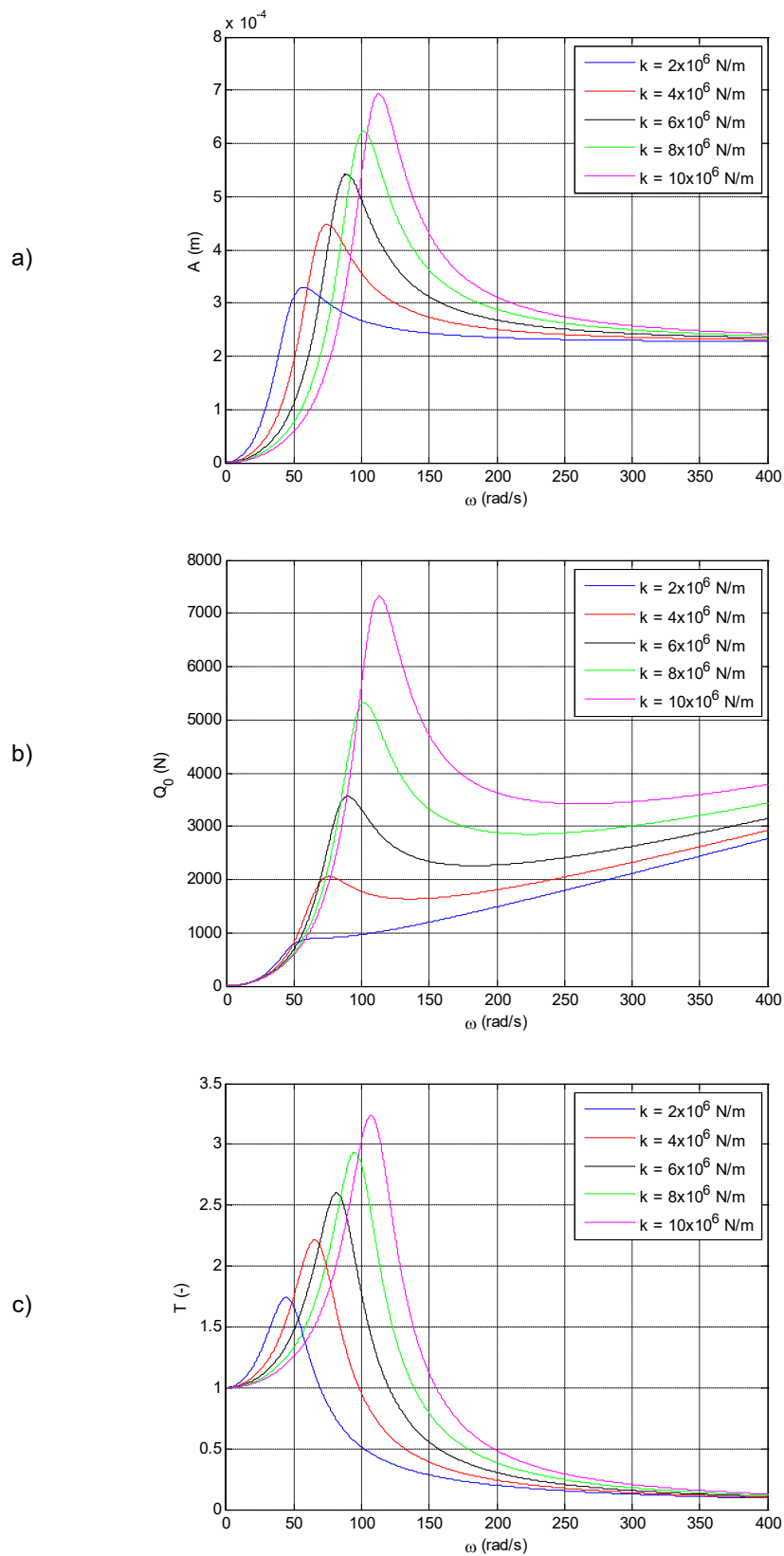


Fig. 5.11 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu pulsația sursei excitatoare. Primul scenariu de simulare în cazul 2

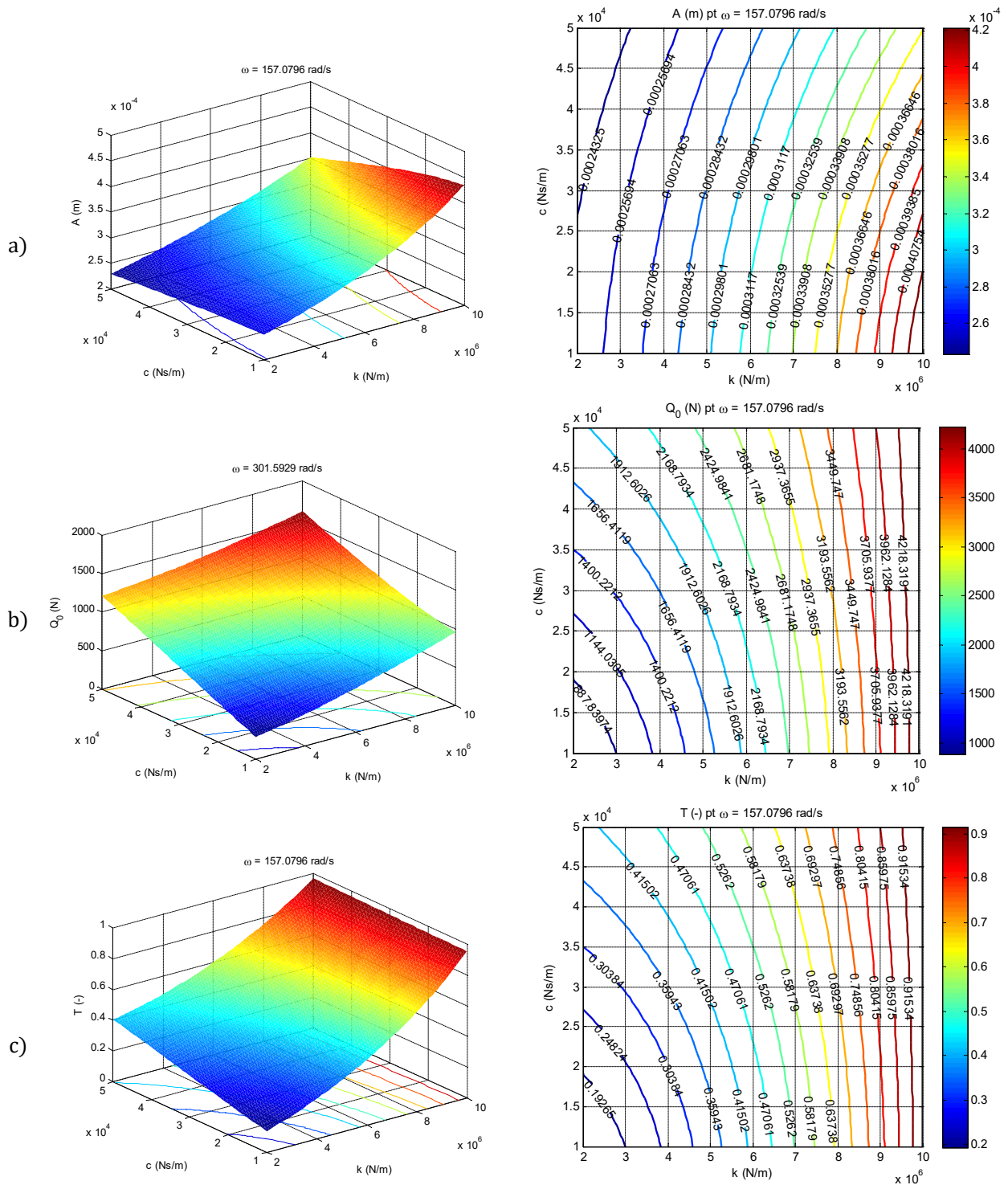


Fig. 5.12 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu rigiditatea și amortizarea terenului. Primul scenariu de simulare în cazul 2

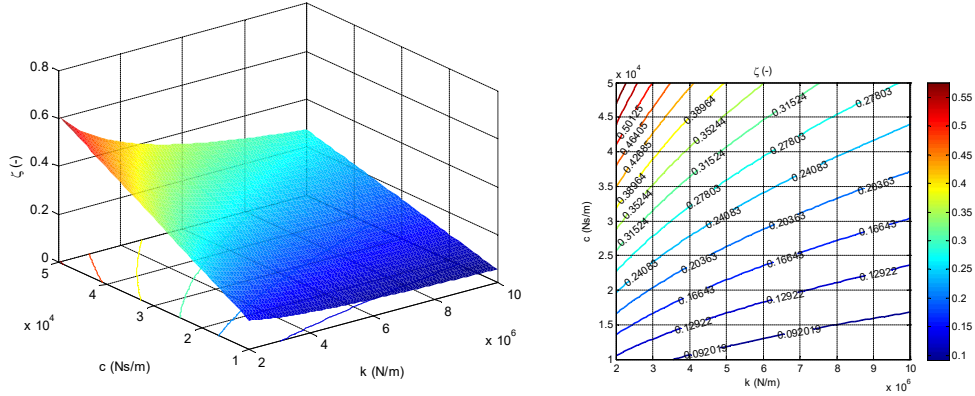
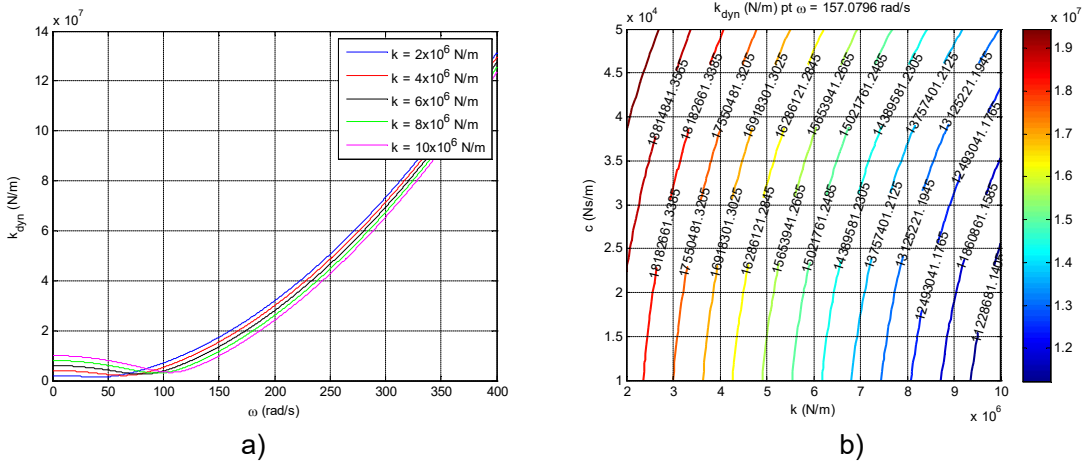
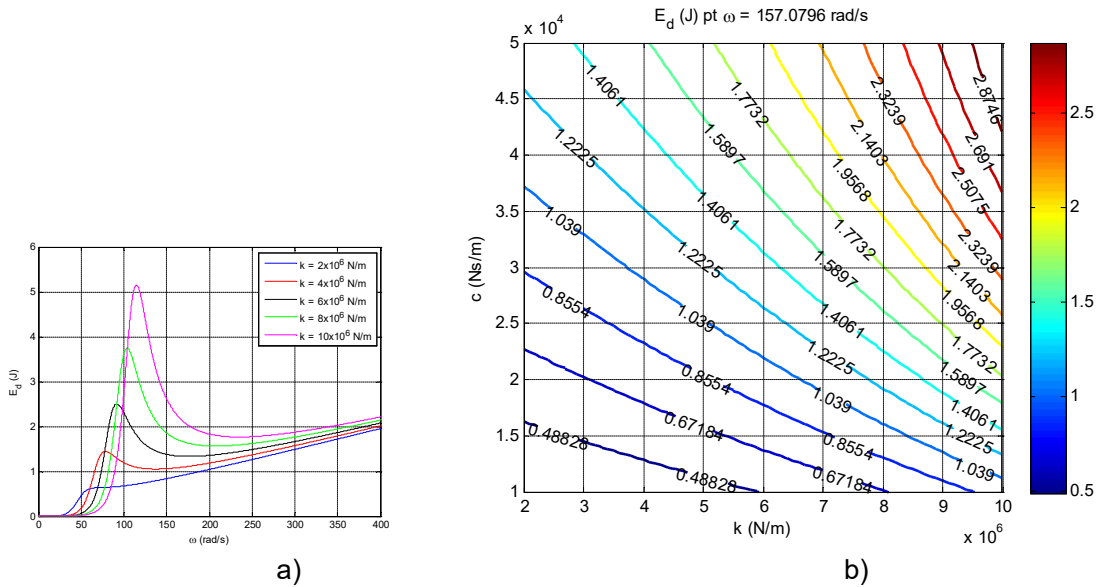


Fig. 5.13 Variația fracțiunii din amortizarea critică în raport cu rigiditatea și amortizarea terenului. Primul scenariu de simulare în cazul 2



a) pulsația sursei excitatoare; b) rigiditatea și amortizarea terenului pentru frecvența de lucru. Primul scenariu de simulare în cazul 2



a) pulsația sursei excitatoare; b) rigiditatea și amortizarea terenului, pentru frecvența de lucru. Primul scenariu de simulare în cazul 2

În cel de-al doilea scenariu de simulare s-a variat cu valori distincte, atât coeficientul de amortizare c , cât și fracțiunea de amortizare critică ζ_i , corespunzătoare fiecărei treceri a utilajului peste strat, și s-au obținut prin simulare numerică curbele reprezentate în figurile 5.13 și 5.14 pentru cele două regimuri de lucru ale ruloului vibrator al compactorului.

Tabelul 5.3. Datele de identificare ale celui de-al doilea scenariu de simulare în cazul 1

Date inițiale teren
-categorie teren: pământ de umplutură, slab coeziv -modulul elastic static: $E_{st} = 139,4 \text{ daN/cm}^2$ -fracțiunea din amortizarea critică: $\zeta = 0,16$ -gradul de compactare inițială: $D_i = 0,8567$
Date inițiale rulou vibrator
-masa per rulou: $m = 830 \text{ kg}$ -momentul static: $M_{st} = m_0 r = 0,066 \text{ kgm}$ -excentricitatea: $r = 0,066 \text{ m}$ -masa pieselor excentrice: $m_0 = 1 \text{ kg}$ -lățime rulou: $B = 0,80 \text{ m}$ -diametru rulou: $D_r = 0,62 \text{ m}$ -frecvența de vibrație în regim de lucru: $f = 48 \text{ Hz}$ -amplitudinea forței generatorului de vibrații (forța dinamică): $F_0 = 6480 \text{ N}$ -viteza de deplasare în regim de lucru: $V_{max} = 1,44 \text{ km/h}$
Date inițiale interacțiune rulou-teren
-regim de lucru: cu vibrații cu frecvență ridicată -modelare interacțiune cu model Voigt-Kelvin: $\zeta = 0,16, \zeta = 0,24, \zeta = 0,42, \zeta = 0,50, \zeta = 0,70$

Tabelul 5.4. Datele de identificare ale celui de-al doilea scenariu de simulare în cazul 2

Date inițiale teren
-categorie teren: pământ de umplutură, slab coeziv -modulul elastic static: $E_{st} = 139,4 \text{ daN/cm}^2$ -fracțiunea din amortizarea critică: $\zeta = 0,16$ -gradul de compactare inițială: $D_i = 0,8567$
Date inițiale rulou vibrator
-masa per rulou: $m = 830 \text{ kg}$ -momentul maselor statice: $M_{st} = m_0 r = 0,187 \text{ kgm}$ -excentricitatea: $r = 0,187 \text{ m}$ -masa pieselor excentrice: $m_0 = 1 \text{ kg}$ -lățime rulou: $B = 0,80 \text{ m}$ -diametru rulou: $D_r = 0,62 \text{ m}$ -frecvența de vibrație în regim de lucru: $f = 25 \text{ Hz}$ -amplitudinea forței generatorului de vibrații (forța dinamică): $F_0 = 4680 \text{ N}$ -viteza de deplasare în regim de lucru: $V_{max} = 1,44 \text{ km/h}$
Date inițiale interacțiune rulou-teren
-regim de lucru: cu vibrații cu frecvență mică -modelare interacțiune cu model Voigt-Kelvin: $\zeta = 0,16, \zeta = 0,24, \zeta = 0,42, \zeta = 0,50, \zeta = 0,70$

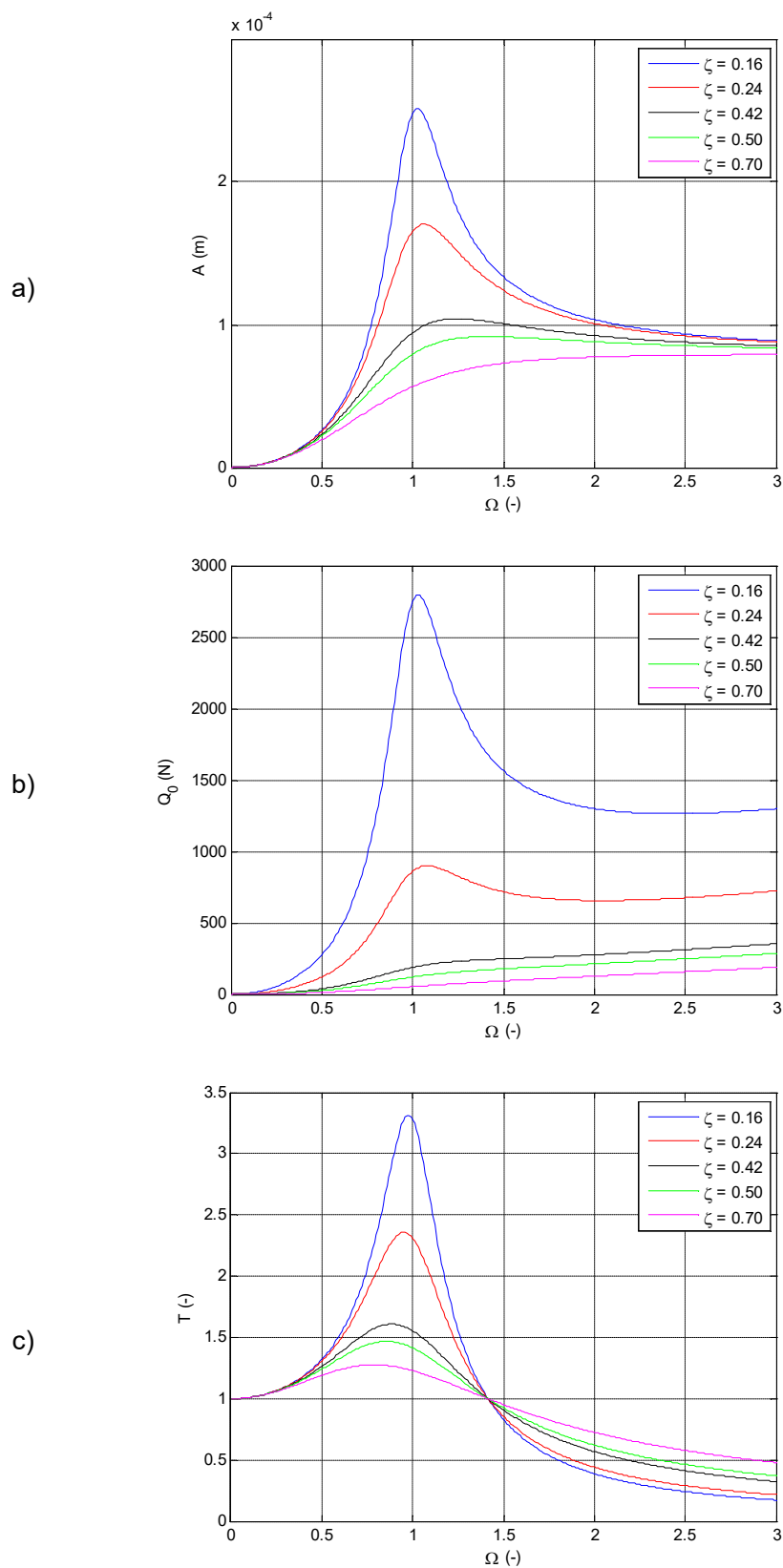


Fig. 5.16 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu raportul pulsațiilor.
Al doilea scenariu de simulare în cazul 1

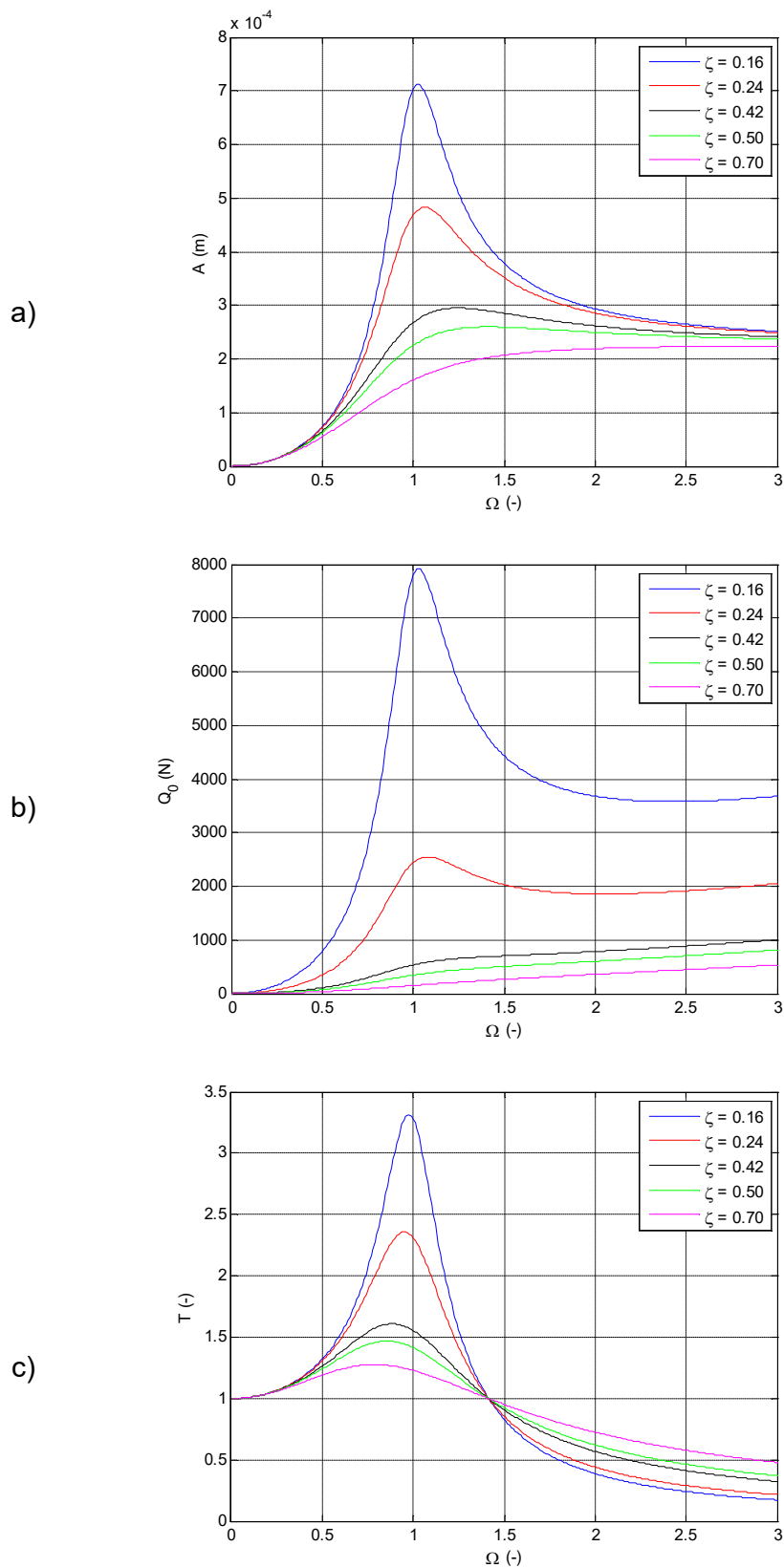


Fig. 5.17 Variația amplitudine vibrație A , forța transmisă în teren Q_0 și transmisibilitatea T în raport cu raportul pulsațiilor.
Al doilea scenariu de simulare în cazul 2

5.2.5. Concluzii parțiale

În concluzie, pentru modelarea vâscoelastică a pământurilor de umplutură, slab coezive, se recomandă alegerea modelului reologic Voigt-Kelvin cu ajutorul căruia, variind parametrii caracteristici ai pământului k și c (pentru a se acorda modelul cu datele măsurate ale stării terenului în faza inițială, corespunzător punctelor de măsură $F - I$) și ai utilajului tehnologic cu care se efectuează compactarea F_0 și ω , se poate simula numeric performanța unui proces de compactare prin vibrație în două stări distincte de lucru specifice regimului tehnologic în ceea ce privește domeniul vibrațiilor, respectiv: în pre sau post-rezonanță. Din rezultatele obținute prin simulare și validate de rezultatele experimentale din punctele $F - I$ de măsurare au fost evidențiate două aspecte definitorii pentru folosirea acestui model reologic în modelarea procesului de compactare prin vibrație, și anume:

- a) comportamentul predominant elastic al modelului reologic Voigt-Kelvin;
- b) raportul dintre excitația sursei de vibrații a utilajului tehnologic și parametrii fizico-mecanici ai terenului generează efecte dinamice și apariția fenomenului de rezonanță, însă cu valori nesemnificative asupra comportării sistemului compactor – teren.

5.3. Simularea procesului de compactare statică pe baza modelului teoretic propus (MTC) pentru caracterizarea comportamentului unui teren când se cunosc parametrii geotehnici inițiali

5.3.1. Precizări despre datele de intrare în algoritmul de calcul al modelului MTC

Datele de intrare în program sunt:

- a) parametrii geotehnici de caracterizare a terenului și a stării inițiale de compactare;
- b) parametrii caracteristici de contact rulou-teren;
- c) parametrii care definesc regimul de lucru al mașinii compactoare utilizate, conform tehnologiei de lucru adoptate;
- d) legăturile interparametrice stabilite între parametrii specifici ai procesului de compactare (identificate în subcapitolul 4.3 al tezei de doctorat).

Pentru interpretarea corectă a rezultatelor obținute prin simulare și a celor prezentate în fișele de compactare sunt necesare următoarele precizări:

- duratele de solicitare sub sarcină t și tasările Δh_i se referă la trecerea curentă „ i ”;
- numărul de treceri necesar este considerat ca fiind numărul de treceri pentru care se depășește valoarea maximă a coeficientului de rigiditate a pământului k_{max} , careia îi corespund valorile maxime care pot fi realizate pentru parametrii ρ_d , E_{st} și D_i (valorile reale realizate în teren pentru acești parametri sunt cunoscute prin determinări experimentale specifice, descrise în mod detaliat în capitolul 3 al tezei de doctorat);
- presiunea p care se dezvoltă în teren, considerată, reprezintă presiunea de la începutul procesului de compactare (adică cea obținută la trecerea curentă), fiind realizată în practică la sfârșitul trecerii anterioare;
- tasarea Δh este o valoare cumulată a tasărilor Δh_i realizate după trecerile anterioare și după trecerea curentă;
- valorile parametrilor (gradul de compactare D_i , densitatea în stare uscată a pământului ρ_d , modulul static de deformare longitudinală E_{st}) sunt valori realizate după trecerea curentă;
- gradul de compactare determinat corespunde condițiilor încercării Proctor normale, în care valoarea lucrului mecanic specific de compactare este 6 dJ/cm^3 ;
- sarcina tehnologică de compactare, cuantificată prin gradul de compactare necesar a fi atins $D_{i,nec}$, este considerată ca fiind valoarea maximă posibil de atins pentru tehnologia

de lucru folosită, valoare care corespunde unei stări de compactare a terenului caracterizată prin atingerea valorii maxime a coeficientului de rigiditate K_{max} al pământului.

5.3.2. Rezultatele simulării

Pentru simularea comportării pământului pe baza modelului propus (MTC) s-a dezvoltat o schemă de lucru în Matlab/Simulink (fig. 5.18) în care s-au introdus datele geotehnice inițiale ale terenului din punctul de măsură F, împreună cu legăturile interparametrice din subcapitolul 4.3 al tezei de doctorat.

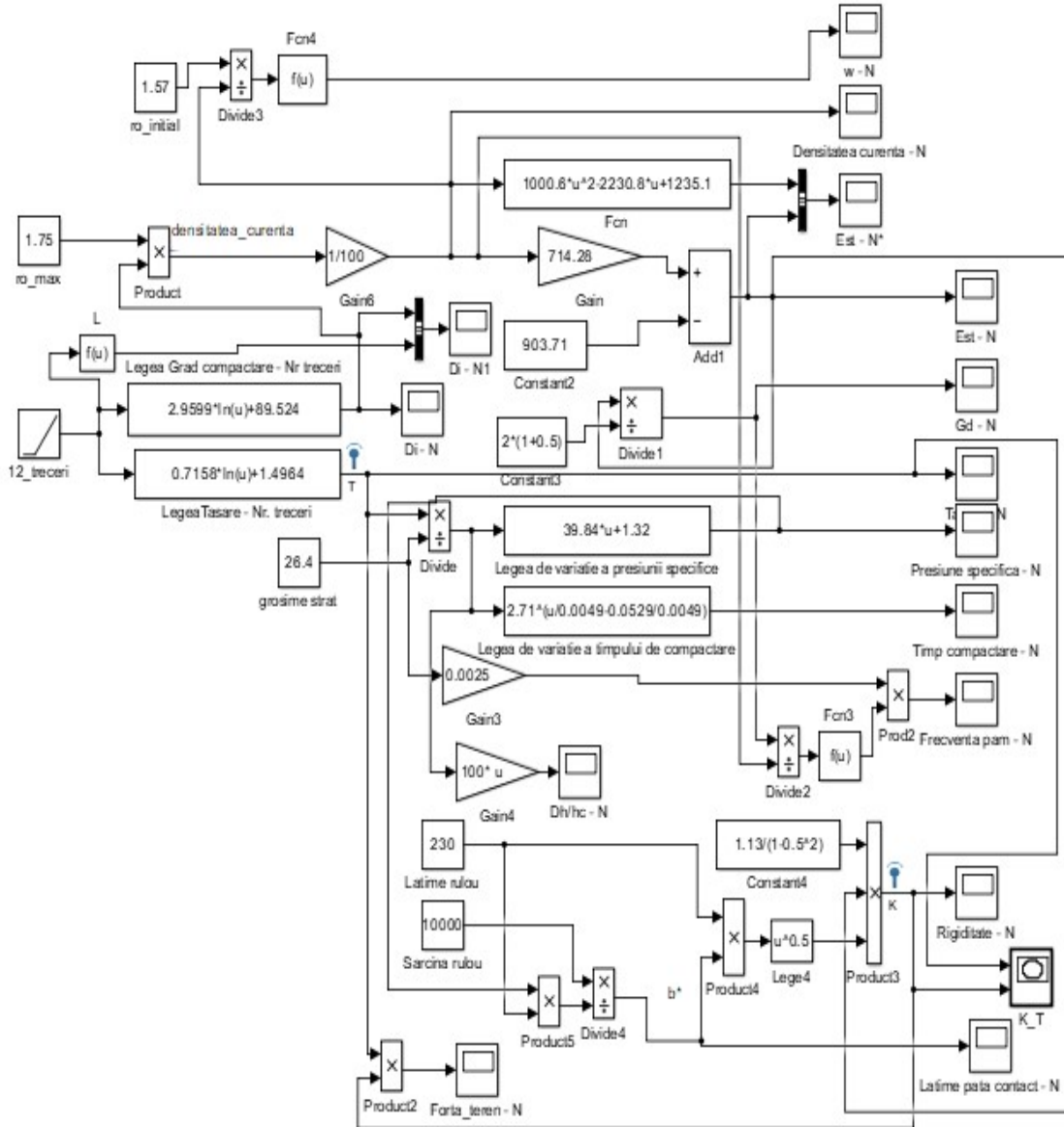


Fig. 5.18 Schema de lucru pentru simularea performanței globale a compactării unui teren corespunzător celui din punctul de măsură F (model MTC)

Schema propusă este una care poate fi generalizată, în sensul introducerii valorilor inițiale ale determinărilor geotehnice ale terenului completate cu legăturile interparametrice corespunzătoare unui alt caz de compactare care se dorește a fi analizat.

Toate rezultatele obținute sunt prezentate în Figurile 5.19 - 5.21, printr-un set de diagrame de variație a principalilor parametri ai terenului în funcție de gradul de compactare rezultat și de tasarea realizată.

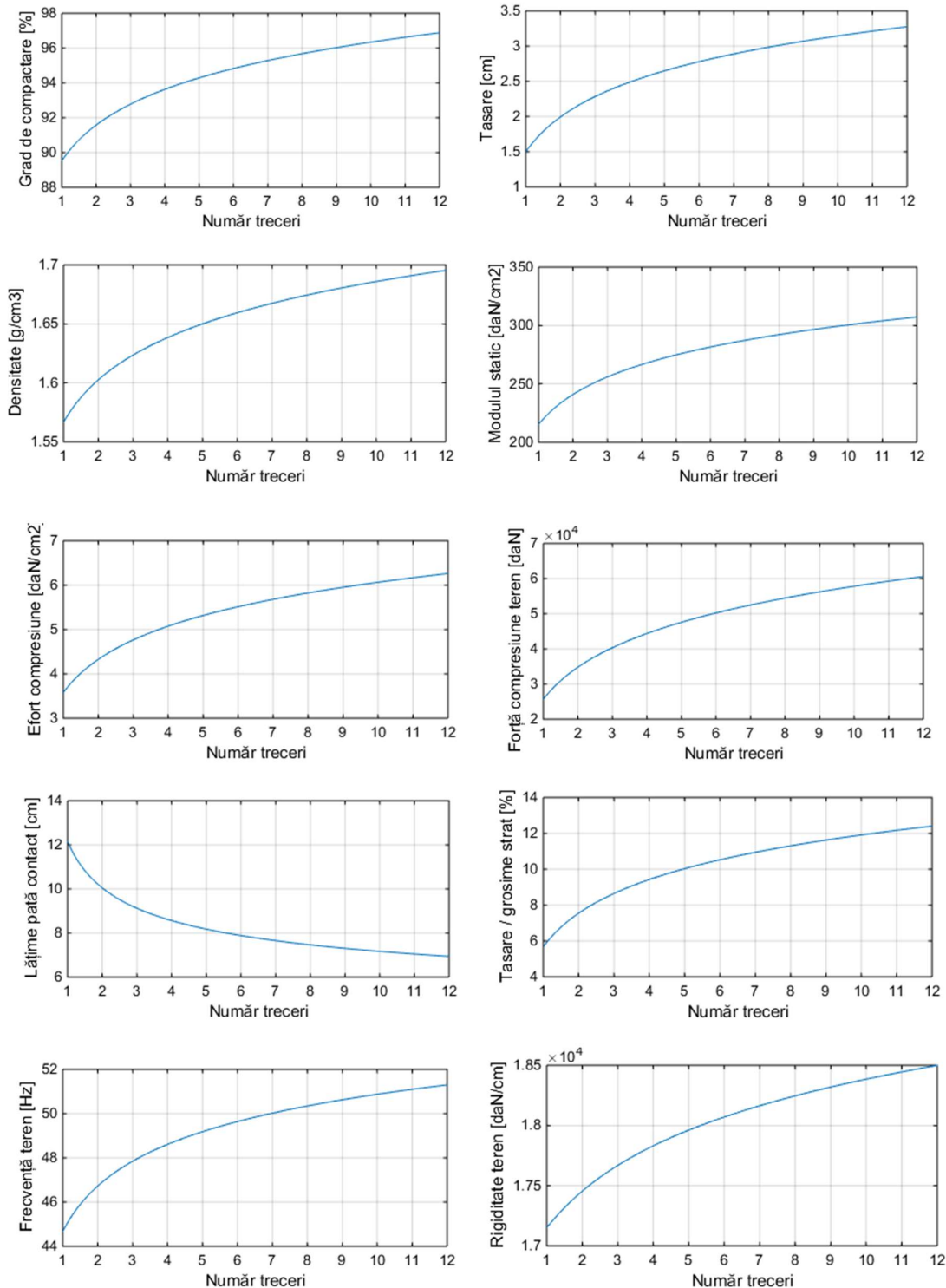


Fig. 5.19 Variația parametrilor specifici necesari identificării performanței procesului de compactare

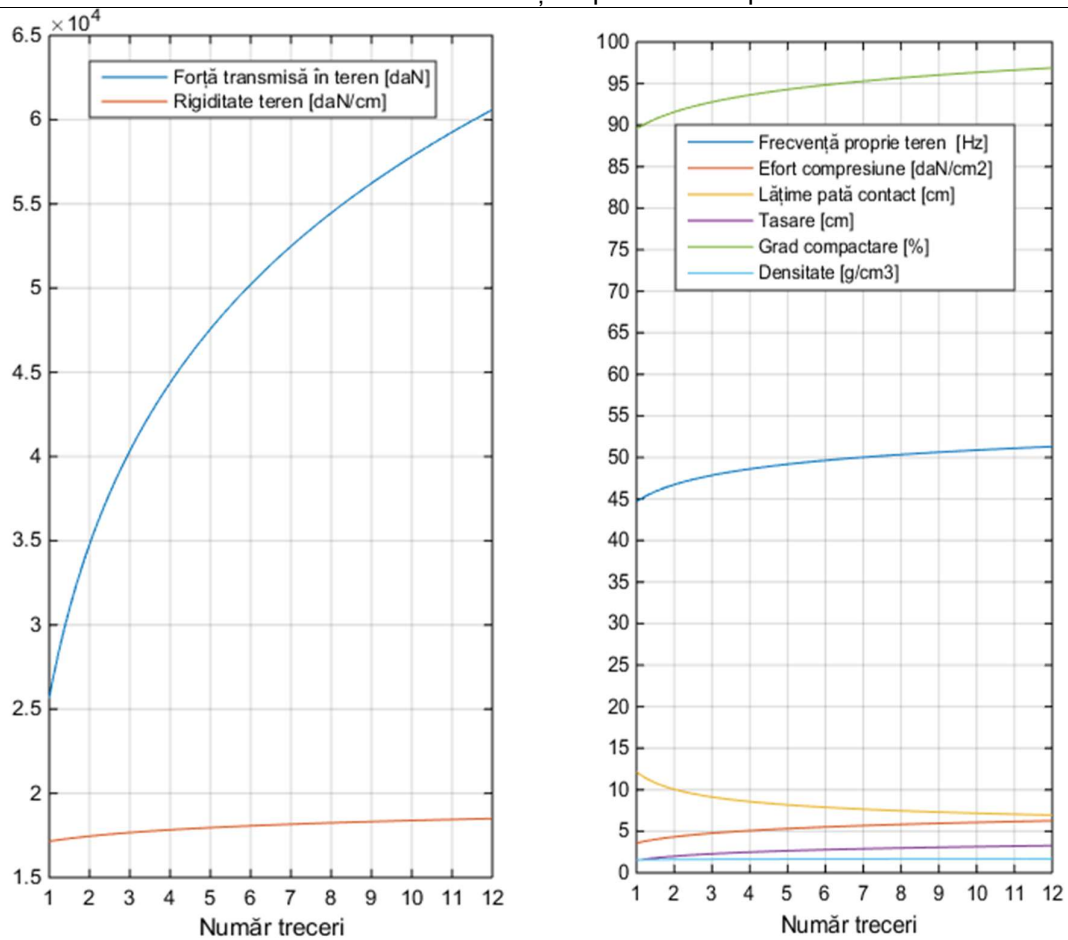


Fig. 5.20 Prezentarea în ansamblu a variației parametrilor specifici necesari identificării performanței procesului de compactare

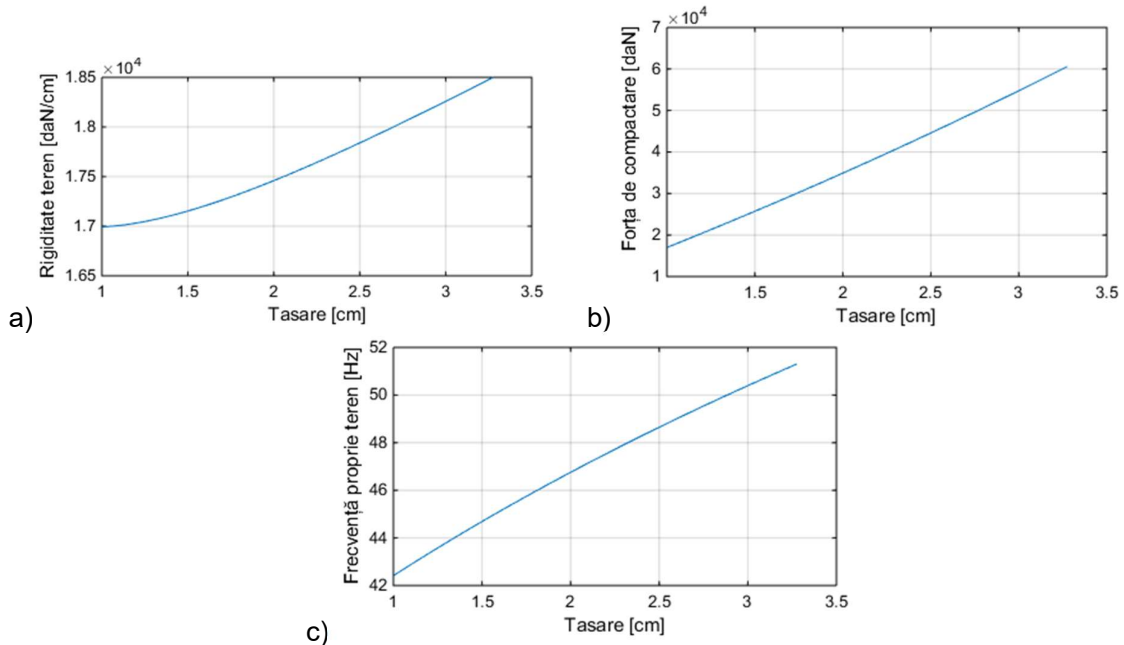


Fig. 5.21 Identificarea răspunsului terenului pe durata procesului de compactare, prin evoluția parametrilor specifici ai acestuia:
 a) coeficient de rigiditate; b) forță de compactare; c) frecvență proprie.

5.3.3. Concluzii parțiale

Datele experimentale primare rezultate în urma determinărilor in situ și investigațiilor în laborator, prelucrate și sintetizate sub forma unor rezultate finale, comparate cu rezultatele obținute în urma simulării procesului de compactare pe baza modelului teoretic de comportare a terenului, sunt prezentate în Tabelul 5.6.

Tabelul 5.6. Analiza rezultatelor obținute pe model teoretic vs determinări experimentale

Punct de măsurare (în teren)	Număr de treceri N		Grad de compactare D_i [%]		Densitate (uscată) ρ_d [g/cm ³]		Modulul static longitudinal, E_{st} [daN/cm ³]		Tasare teren, Δh [cm]	
	Model	Real	Model	Real	Model	Real	Model	Real	Model	Real
F	12	12	96,8	94,57	1,69	1,655	305	274	3,27	3,245

Rezultatele obținute permit sintetizarea următoarelor concluzii finale privind modelul teoretic de comportare a terenului (MTC):

- modelul se adaptează corect situațiilor de lucru reale, valorile indicate pentru parametrii modelați fiind apropiate de cele care descriu situația tehnologică optimă;
- se remarcă o corelație bună între valorile parametrilor principali finali ai proceselor de compactare modelare vs realitate (în ceea ce privește nr. treceri, grad de compactare, densitate în stare uscată, modul static longitudinal, tasare);
- modelul poate fi utilizat pentru estimări pertinente în fazele de proiectare și de pregătire tehnologică a proceselor de compactare, pentru terenurile slab coezive, oferind avantajul de a cunoaște corelația dintre modificarea coeficientului de rigiditate al terenului în funcție de evoluția stării terenului (prin valoarea tasării realizate).

5.4. Modelarea și simularea comportării pământurilor slab coezive în procesul de compactare, cu evidențierea tasării pe modele reologice (MRTTC, EVP)

5.4.1. Descrierea modelului MRTTC

Luând la cunoștință aspectele prezentate anterior, în continuare este propus un model reologic (Figura 5.22) care are comportare vâsco-elastică și disipativă (denumit MRTTC), util în realizarea unei simulări numerice având ca obiectiv principal punerea în evidență a modului în care se comportă un pământ slab coeziv sub acțiunea unui rulou al unui compactor autopropulsat.

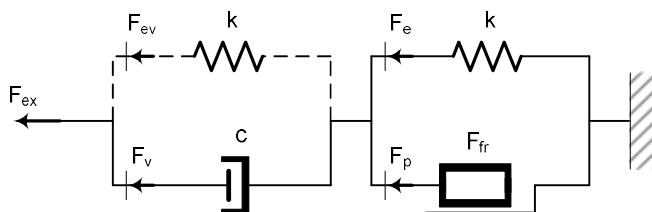


Fig. 5.22 Model reologic pentru simularea interacțiunii rulou – material în procesul de compactare cu vibrații

5.4.2. Rezultatele simulării

Pe baza măsurărilor efectuate în punctul de măsură notat cu F , s-au realizat simulări ale răspunsului terenului la acțiunea ruloului compactor (VV-170), corespunzătoare celor 12 treceri peste același strat de pământ (cu grosimea inițială de 26,4 mm), aspect care trebuie înțeles ca o evoluție continuă a creșterii gradului de compactare. Rezultatele obținute prin simularea numerică în mediul de programare Matlab sunt date în figurile 5.25 – 5.27, sub forma graficelor care indică

modul de variație a deformației totale și, respectiv, pe componente (elastică, plastică, vâscoasă) ale stratului compactat ca răspuns la acțiunea statică a ruloului compactor care s-a deplasat cu viteză și parametri ai regimului de lucru constant. Pentru cazul simulat s-a ținut cont de modificarea lățimii petei de contact după fiecare din cele 12 treceri ale ruloului, luându-se în considerare legea de variație (4.6) validată și de legile de aproximare centralizate în tabelul 4.11.

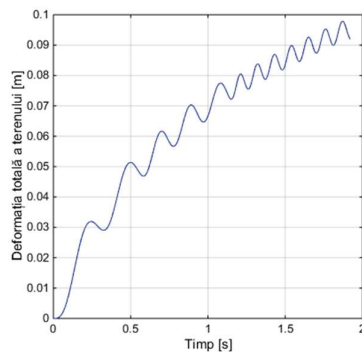


Fig. 5.25 Variația deformației totale transmise în teren ca răspuns la acțiunea statică a ruloului compactor

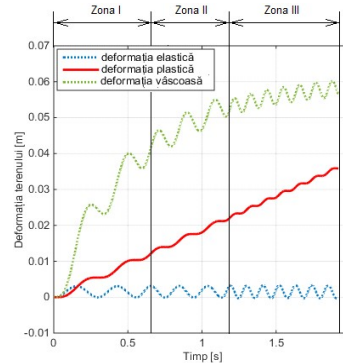


Fig. 5.27 Identificarea zonelor de interes pentru analiza procesului de compactare statică a terenului

Descrierea semnificației fiecărei zone identificată în fig. 5.27 este [85]:

- Zona I: zonă cu deformații mari ca răspuns la solicitările transmise de rulo în teren, în special a deformațiilor plastice (tasări / consolidări) și a celor de natură vâscoasă (frecări în structura internă a materialului supus compactării);
- Zona II: zonă cu deformații medii ale componentelor plastice și vâscoase, cu tendință crescătoare a valorilor înregistrate;
- Zona III: zonă cu deformații mici pentru ambele componente plastice și vâscoase, cu tendință spre valoare constantă a celei din urmă și cu intensitate de creștere foarte mică a tasării.

Se remarcă însă comportarea deformației elastice care este de forma unei mișcări oscilatorii cu frecvență diferită în timpul procesului de compactare a terenului. Astfel, în zona I, frecvența oscilațiilor este mică din cauza stării afânate a terenului, urmând ca în zona III unde terenul este rigid să se identifice un comportament vibratoriu cu frecvență crescută. În tot acest timp al procesului de simulare a compactării, amplitudinea deformației elastice se menține constantă. Deformația vâscoasă a terenului după fiecare trecere este greu de surprins în procesul de simulare numerică, întrucât aceasta are o evoluție specifică pe o durată mult mai mare de timp decât cea pe care se face simularea (vezi durată mare de timp între treceri în fig. 5.28, 5.29) [85].

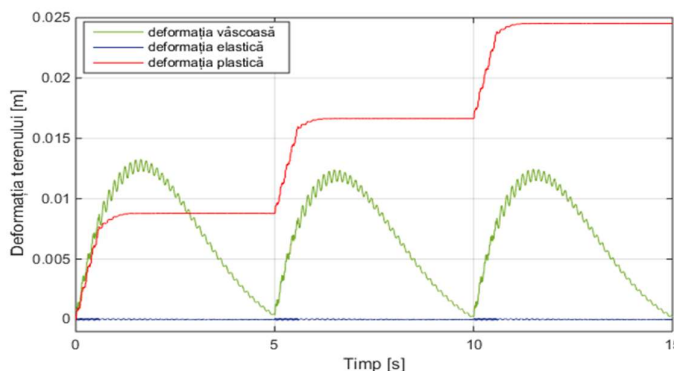


Fig. 5.28 Simularea răspunsului terenului (modelat corespunzător celui din punctul de măsură F) sub aspectul deformațiilor sale, după primele trei treceri

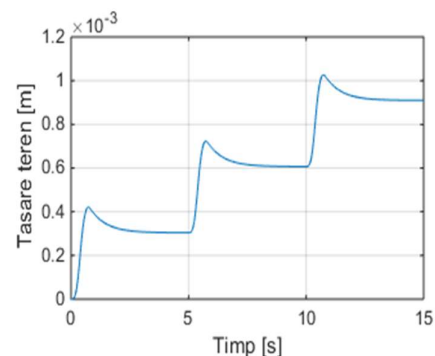


Fig. 5.29 Simularea răspunsului terenului (din G și H) după primele trei treceri

5.4.3. Concluzii parțiale

Principiul de lucru pe durata unui ciclu „ i ”, al acțiunii forței dinamice a ruloului vibrator (corespunzător duratei de contact t_{ci} pe o perioadă de acțiune a sarcinii) constă în următoarea succesiune de comportamente dinamice ale modelului propus, astfel:

- **comportare dinamică în regim de deformație elasto-plastică a materialului:** din momentul în care forța de excitație depășește valoarea de prag a forței de frecare statice modelul pune în evidență, atât deformațiile elastice, cât și plastice, care apar în elementele reologice. Această mișcare se păstrează până când valoarea instantanee a forței de excitație începe să scadă și ajunge să egaleze valoarea de prag a forței de frecare;
- **comportare dinamică în regim de deformație plastică a materialului:** la scăderea în continuare a forței de excitație, terenul înmagazinează deformație remanentă care este de fapt tasarea inițială corespunzătoare obținută pe durata ciclului de lucru „ i ”, analizat;
- **comportare dinamică în regim de revenire elastică a materialului:** când valoarea forței de excitație scade sub valoarea limită a forței de consolidare (tasare), atunci comportarea materialului constă într-o revenire elastică (mișcare care apare deoarece valoarea forței acumulate în elementul elastic crește peste valoarea de prag a forței de frecare din elementul disipativ și în acest fel îl condiționează pe acesta la o deplasare în sensul detensionării elementului elastic). Acest regim de revenire la o stare de echilibru structural, denumit regim de normalizare, evoluează până în momentul în care valoarea forței de excitație începe să crească și egalează din nou valoarea limită a forței de consolidare;
- **comportare dinamică în regim plastic consolidat al materialului:** după momentul în care forța de excitație devine egală cu forța de consolidare a materialului, acesta nu mai permite apariția deformațiilor în structura sa. Durata acestui regim se finalizează atunci când forța excitatoare a ruloului atinge valoarea de prag a forței de frecare statică specifică materialului. În situația în care limita de consolidare pe ciclul „ i ”, considerat nu se obține pe întreg domeniul de acțiune în care forța excitatoare are valori mai mici decât valoarea de prag a frecării statice, rezultă că materialul își schimbă comportamentul specific regimului elasto-plastic direct într-un comportament specific regimului plastic consolidat;
- ciclul „ $i + 1$ ”, se desfășoară în același mod descris anterior, cu precizarea că, la finalizarea fiecărui ciclu complet, valoarea forței limită de consolidare va crește cu valoarea ΔF (diferită în funcție de material), până se va ajunge la valoarea limită a forței de frecare statică. În acel moment se finalizează procesul de consolidare, iar materialul prelua în continuare sarcinile exterioare numai cu componenta elastică. Din analiza datelor experimentale se constată că după 8 treceri succesive ale utilajului, pe același strat, valoarea tasării tinde asimptotic către o valoare limită caracteristică stratului respectiv.

Rezultatele obținute prin simulare susțin rezultatele obținute pe care experimentală, prezentate în capitolele anterioare ale tezei, în ceea ce privește evoluția tasării unui teren slab coeziv sub acțiunea statică a unui rulou compactor (studiu de caz pe măsurătorile din punctul F).

5.4.4. Descrierea modelului EVP

În acest subcapitol al tezei, autorul a luat în considerare alte două tipuri de modele reologice pentru a analiza comportamentul terenului supus compactării cu vibrații.

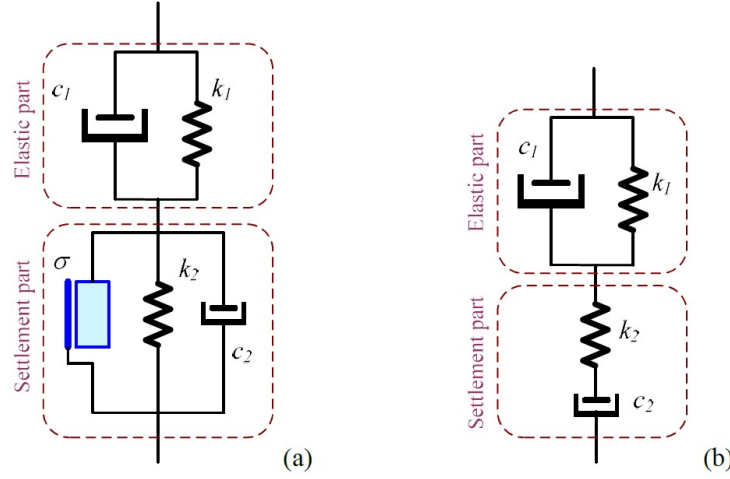


Fig. 5.30 Diagrame schematice pentru modelele reologice utilizate pentru simularea tasării terenului [86]:

a) model vâsco-elasto-plastic (EVP); b) model derivat din Burgers model.

Conform schematizării modelului EVP din figura 5.30a, răspunsul componentei elastice poate fi formulat astfel

$$x_1 = F(k_1 + c_1\Delta)^{-1}, \quad (5.18)$$

în același timp, răspunsul tasării poate fi exprimat ca o funcție pe intervale

$$x_2 = \begin{cases} (F - F_{lim})(k_2 + c_2\Delta)^{-1} & \text{dacă } F > (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ 0 & \text{dacă } F \leq (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ (F + F_{lim})(k_2 + c_2\Delta)^{-1} & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0, \\ 0 & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

unde F reprezintă excitația dinamică externă, $k_{1,2}$ și $c_{1,2}$ sunt rigiditatea și, respectiv, amortizarea în funcție de părțile constitutive ale modelelor, $F_{lim} = \sigma$ este parametrul de plasticitate (în termen de forță limită care permite sau nu mișcarea cursorului), Δ este operatorul de derivare în raport cu timpul. Indicele $(j-1)$ din inegalitățile condiționate indică faptul că evaluarea se va face în raport cu valoarea atinsă la pasul de calcul anterior. Ținând cont de faptul că răspunsul modelului este suma celor două deplasări parțiale $x_{1,2}$, se scrie rigiditatea echivalentă a modelului EVP astfel

$$k_e = \begin{cases} \frac{(k_1 + c_1\Delta)(k_2 + c_2\Delta)}{(k_2 + c_2\Delta) + (k_1 + c_1\Delta)(1 - F_{lim}/F)} & \text{dacă } F > (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ (k_1 + c_1\Delta) & \text{dacă } F \leq (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ \frac{(k_1 + c_1\Delta)(k_2 + c_2\Delta)}{(k_2 + c_2\Delta) + (k_1 + c_1\Delta)(1 + F_{lim}/F)} & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0 \\ (k_1 + c_1\Delta) & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0. \end{cases} \quad (5.20)$$

Conform modelului bazat pe Burgers din figura 5.30b rigiditatea echivalentă este:

$$k_e = \frac{k_2 c_2 \Delta (k_1 + c_1 \Delta)}{(k_2 + c_2 \Delta)(k_1 + c_1 \Delta) + k_2 c_2 \Delta}. \quad (5.21)$$

Analizele au fost efectuate pe baza evaluării spectrale a răspunsurilor ambelor modele. În acest sens, ecuațiile celor două modele au fost transferate în domeniul complex. Introducând notațiile $\tau_1 = c_1 / k_1$, $\tau_2 = c_2 / k_2$ pentru constantele în timp ale părților vâsco-elastice ale modelului EVP, relația (5.20) poate fi scrisă ca

$$k_e = \begin{cases} \frac{k_1(1+i\omega\tau_1)k_2(1+i\omega\tau_2)}{k_2(1+i\omega\tau_2) + k_1(1+i\omega\tau_1)(1-F_{lim}/F)} & \text{dacă } F > (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ k_1(1 + i\omega\tau_1) & \text{dacă } F \leq (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) \geq 0 \\ \frac{k_1(1+i\omega\tau_1)k_2(1+i\omega\tau_2)}{k_2(1+i\omega\tau_2) + k_1(1+i\omega\tau_1)(1+F_{lim}/F)} & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} > F > F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0 \\ k_1(1 + i\omega\tau_1) & \text{dacă } (k_2 + c_2\Delta)x_{2,(j-1)} \leq F \leq F_{lim}, \text{sgn}(\dot{x}_{2,(j-1)}) < 0. \end{cases} \quad (5.22)$$

și ecuația (5.21) a modelului bazat pe Burgers astfel

$$k_e = \frac{k_2 i \omega + k_1 (1 + i \omega \tau_1)}{k_2 i \omega \tau_2 + k_1 (1 + i \omega \tau_1) (1 + i \omega \tau_2)}, \quad (5.23)$$

unde $i^2 = -1$ și ω este pulsația de excitație.

Valorile numerice utilizate în analizele de calcul sunt: $m_{or} = 5.7 \text{ kgm}$, $k_1 = 10\text{e}6 \text{ N/m}$, $k_2 = 14\text{e}6 \text{ N/m}$, $c_1 = 0,75\text{e}3 \text{ Ns/m}$, $c_2 = 20\text{e}3 \text{ Ns/m}$, $\sigma = F_{lim} = 1\text{e}5 \text{ N}$.

5.4.5. Rezultatele simulării

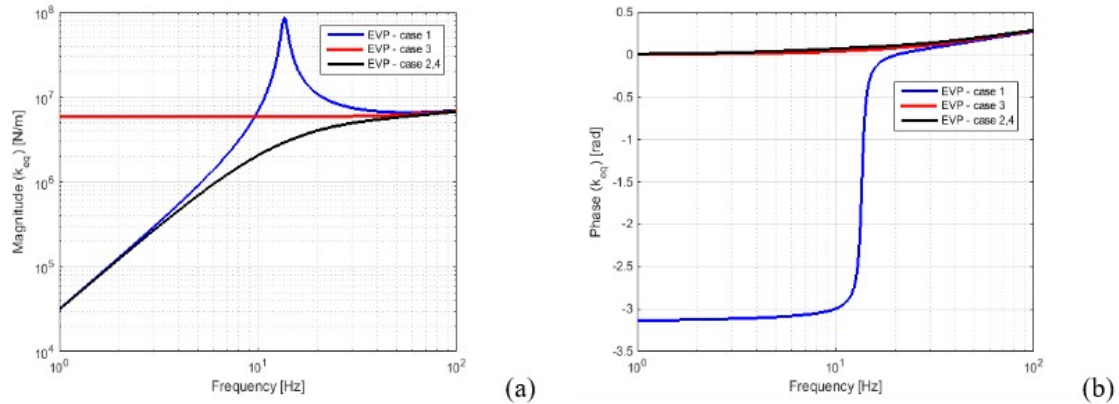


Fig. 5.31 Spectrul de răspuns al componentelor modelului EVP în:
a) amplitudine; b) fază

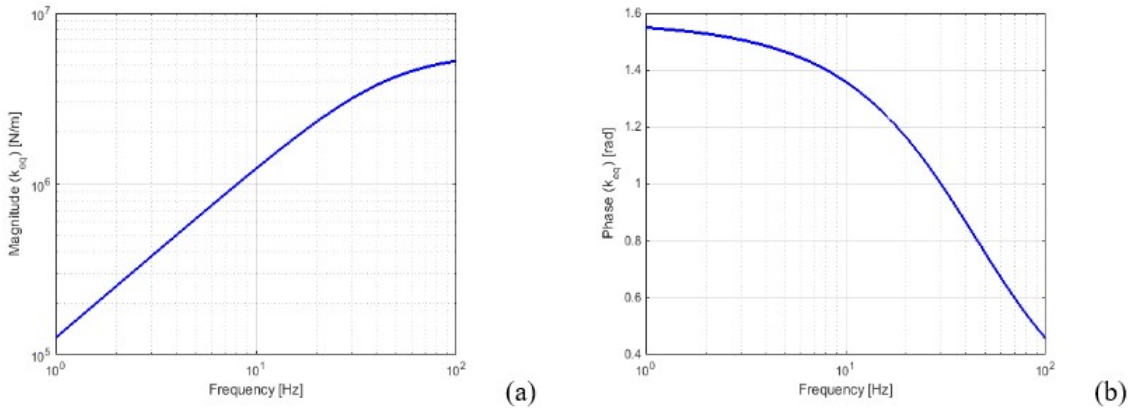


Fig. 5.32 Spectrul de răspuns al modelului derivat din Burgers în:
a) amplitudine; b) fază

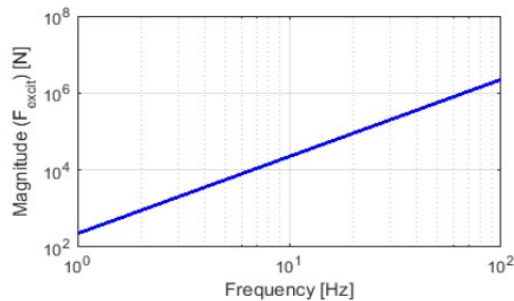


Fig. 5.33 Mărimea spectrală a forței de excitație externe

Vârful de mărime (Fig. 5.34a, EPV case 1) rezultă din prezența termenului $(1 - F_{lim}/F)$ la numitor, care duce la o reducere substanțială în momentele în care excitația devine egală cu limita de plasticitate. Evoluția acestui caz are o schimbare bruscă de fază cu π radiani (Fig. 5.34b).

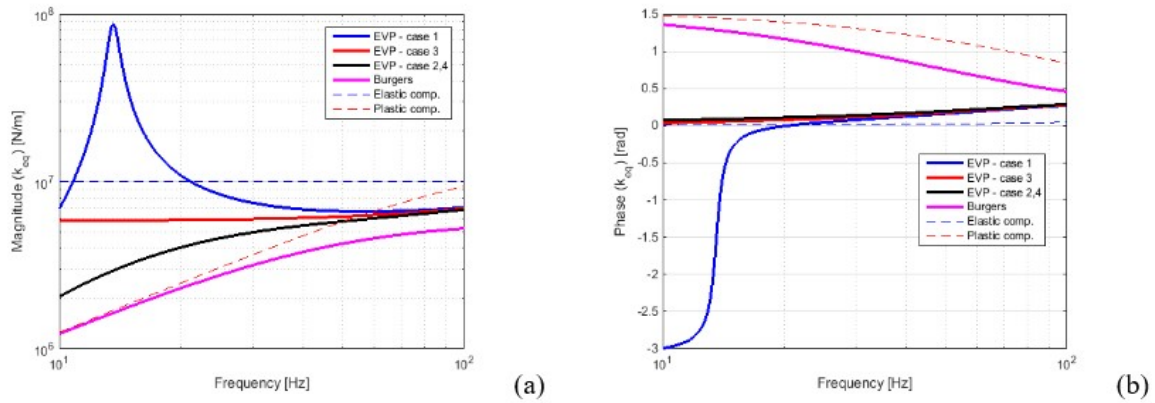


Fig. 5.34 Spectrul de răspuns al modelelor în:
a) amplitudine; b) fază

S-a realizat o analiză comparativă folosind diagramele suprapuse pentru ambele modele reologice, pentru o valoare minimă de 10 Hz a frecvenței de excitație, fiind evaluată funcția de admitanță pentru ambele modele, iar rezultatul, sub formă de amplitudine, e dat în figura 5.35.

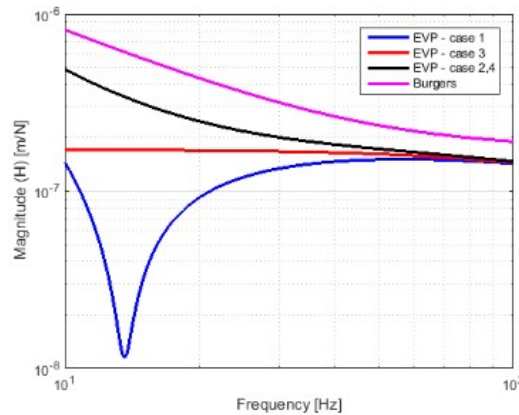


Fig. 5.35 Mărimea spectrală a funcției de admitanță în raport cu componentele modelului

Se observă că tendința generală de scădere a mărimii admitanței este respectată de toate componentele modelului.

5.4.6. Concluzii parțiale

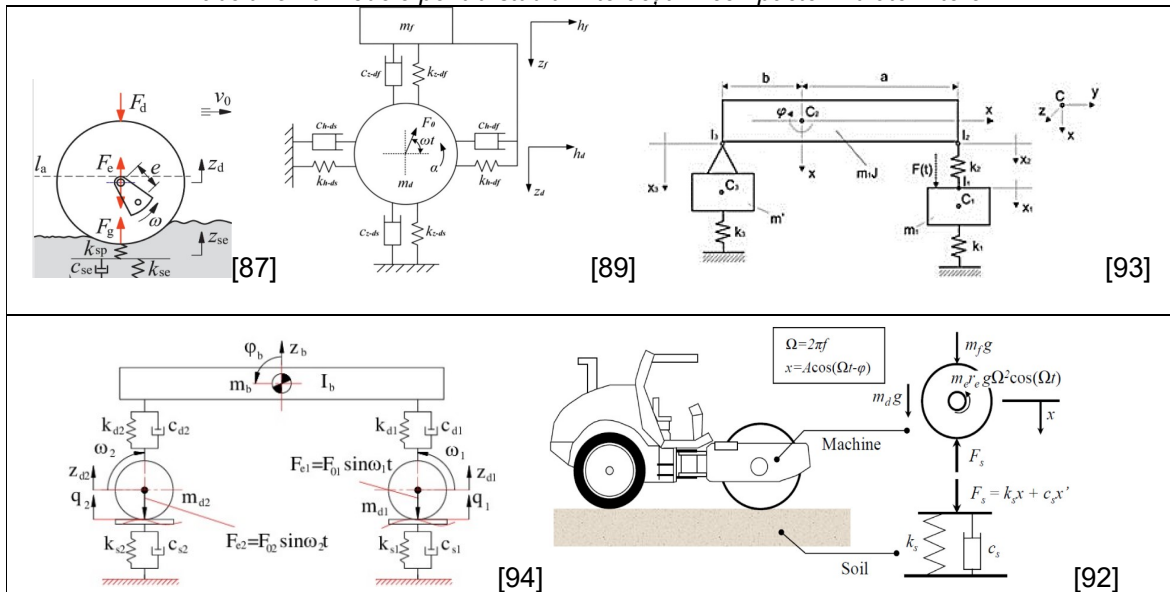
Rezultatele obținute pe modelul EVP, atât în ceea ce privește rigiditatea echivalentă, cât și funcția de admitanță sunt foarte utile pentru algoritmul de calcul din modelele computaționale predictive din sistemele automate implementate pe compactoarele moderne. Aceste modele sunt utilizate pentru reglarea continuă a parametrilor regimului de lucru ale echipamentelor tehnologice cu caracteristica locală de tasare instantanee a terenului, pentru a obține tasarea impusă după un număr minim de treceri. Pe baza unor astfel de modele se poate evalua continuu răspunsul estimat al terenului în timpul ciclului de lucru și se pot modifica instantaneu parametrii de lucru ai echipamentului. Analiza pune în evidență faptul că componenta vâscoasă disipativă a terenului afectează evoluția rigidității echivalente în raport cu frecvența de excitație. În același timp, componenta plastică induce modificări relativ bruște ale rigidității locale cu implicație directă asupra răspunsului dinamic. Aceste observații subliniază importanța modelelor neliniare în analiza interacțiunii rului vibrator - teren tasat, în special pentru optimizarea echipamentelor tehnologice.

5.5. Modelarea și simularea dinamică a interacțiunii teren – rulou vibrator folosind modele cu mai multe grade de libertate (MRIETC 1, MRIETC 2)

5.5.1 Stadiul cunoașterii

Ținând cont de direcția de cercetare din această teză de doctorat, în vederea realizării unei cerințe de performanță tehnologică impusă procesului de compactare, se vor prezenta modele dinamice elaborate pentru studiul interacțiunii dintre echipamentul de compactare și teren. În literatura de specialitate există numeroase referințe bibliografice (tabelul 5.10) cu modelele utile pentru simularea comportamentului dinamic al compactoarelor cu diferite forme constructive.

Tabelul 5.10 Modele pentru studiul interacțiunii compactor vibrator - teren



5.5.2. Modelarea și simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 1)

La lucrările de compactare a pământului desfășurate pe poligonul experimental de pe tronsonul 2 a fost utilizat compactorul VV-170 și de aceea se va dezvolta un model dinamic echivalent (MRIETC) cu care să se simuleze răspunsul terenului la acțiunea mașinii (fig. 5.36).

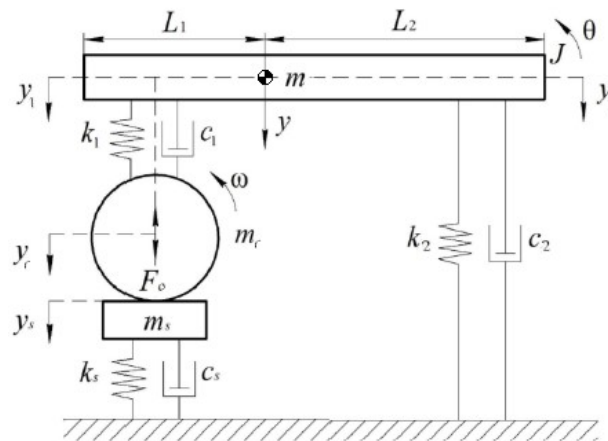


Fig. 5.36 Modelul dinamic pentru simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 1)

Ecuțiile diferențiale de mișcare ale modelului dinamic în forma finală sunt:

$$(m_r + m_s)\ddot{y}_r + k_s y_r + k_1(y_r - y_1) + c_s \dot{y}_r + c_1(\dot{y}_r - \dot{y}_1) = (m_r + m_s)g + F_0 \sin(\omega t), \quad (5.27)$$

$$m\ddot{y} + k_r(y_1 - y_r) + c_r(\dot{y}_1 - \dot{y}_r) + k_2 y_2 + c_2 \dot{y}_2 = mg, \quad (5.28)$$

$$J\ddot{\theta} - k_2 y_2 L_2 - c_2 \dot{y}_2 L_2 + k_1(y_1 - y_r)L_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_r)L_1 = 0, \quad (5.29)$$

unde

$$y = \frac{L_1 y_1 + L_2 y_2}{L_1 + L_2}, \theta = \frac{y_1 - y_2}{L_1 + L_2}, F_0 = m_0 r \omega^2, \dot{y}_s = \dot{y}_r, y_s = y_r. \quad (5.30)$$

Se vor prezenta în figurile 5.38-5.42 rezultatele obținute la simularea unor scenarii diferite de caz (în lipsa amortizării în sistemul considerat), urmărindu-se evidențierea influenței parametrilor care definesc interacțiunea rulou-teren în timpul realizării sarcinii tehnologice de compactare impuse.

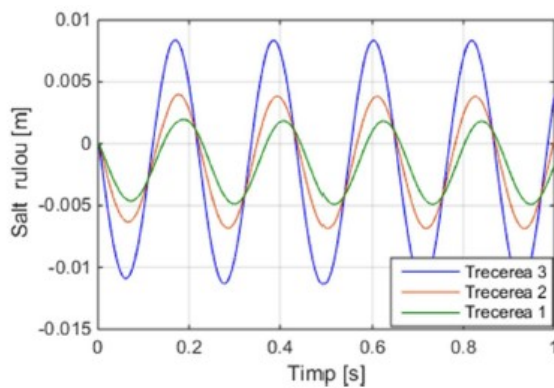


Fig. 5.38 Mișcarea pe verticală a ruloului la contactul cu terenul după primele 3 treceri (MRIETC 1)

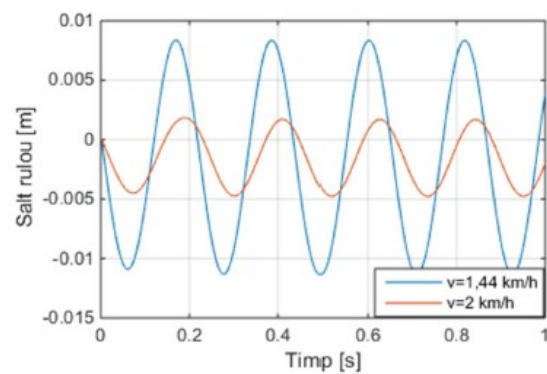


Fig. 5.39 Mișcarea pe verticală a ruloului când se modifică viteza de deplasare a utilajului, la prima trecere (MRIETC 1)

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulării numerice pe modelul MRIETC 1, analizând graficele din figurile 5.38 -5.42 se pot concluziona următoarele:

- parametrii care au în realitate evoluție predictibilă în timp și implicit după numărul de treceri sunt definiți în model cu legăturile interparametrice stabilite în capitolul 4 al tezei (în ceea ce privește rigiditatea, tasarea, gradul de compactare etc.) și se face astfel posibilă stabilirea comportamentului ruloului la evoluția continuă a stării terenului în timpul desfășurării procesului tehnologic;
- evoluțiile parametrilor care descriu performanța procesului tehnologic, după primele 3 treceri ale compactorului, sunt centralizate în figura 5.42 fiind posibilă o analiză a eficienței procesului tehnologic în ansamblu (la modificarea continuă a stării terenului, precum și a tehnologiei de lucru adoptate – creșterea sau scăderea vitezei de deplasare a utilajului).

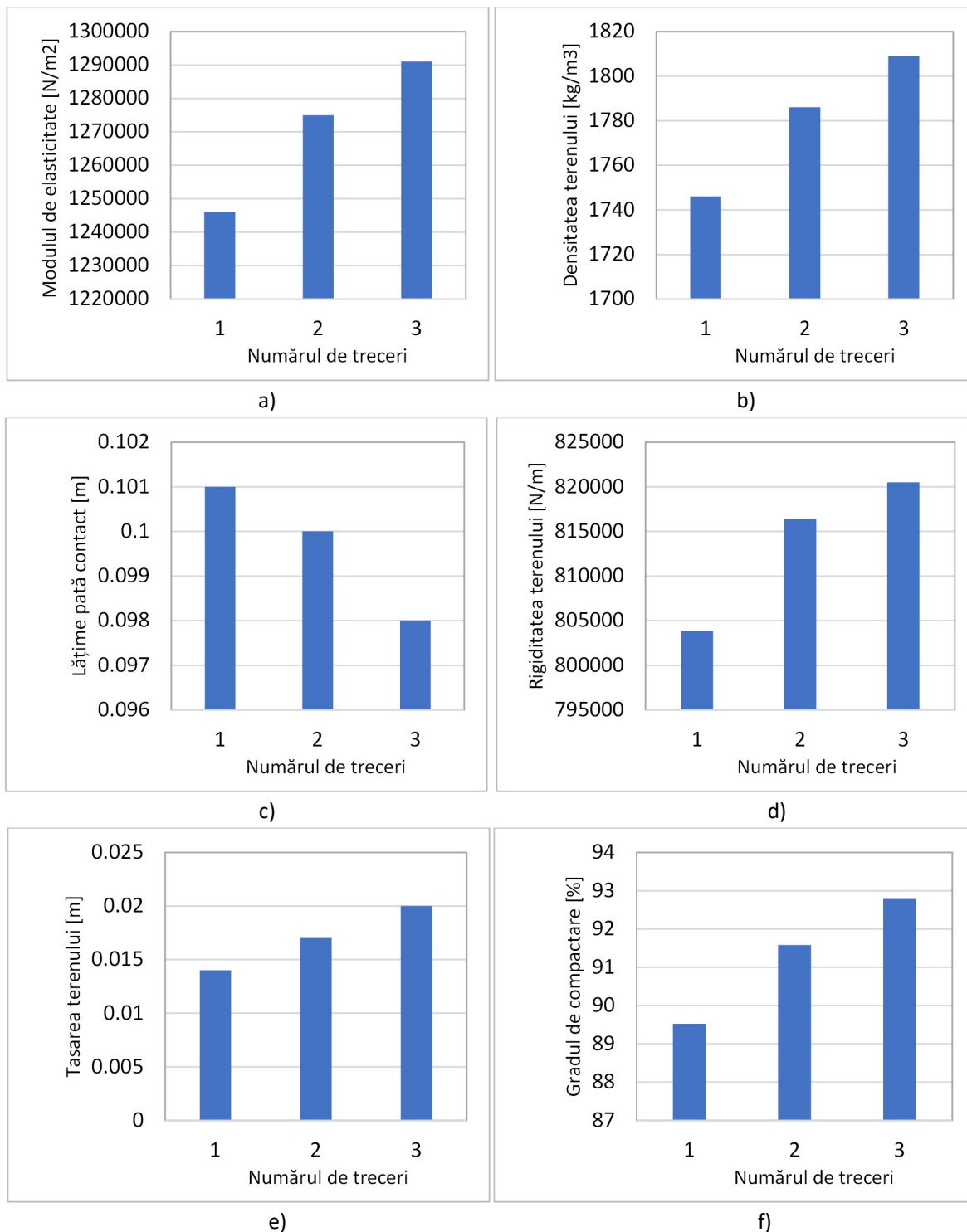


Fig. 5.42 Simularea parametrilor cu evoluție predictibilă care definesc performanța procesului de compactare (MRIETC 1):

- a) modulul de elasticitate; b) densitatea în stare uscată; c) lățimea petei de contact rului-teren; d) rigiditatea terenului; e) tasarea terenului; f) gradul de compactare realizat după treceri individuale.

5.5.3. Modelarea și simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 2)

Dacă se simplifică modelul MRIETC 1, în cazul în care nu se urmărește abordarea în ansamblu a mișcării compactorului, ci numai în direcția mișcării ruloului vibrator [98 - 101], atunci autorul tezei propune modelul MRIETC 2 prezentat în figura 5.43.

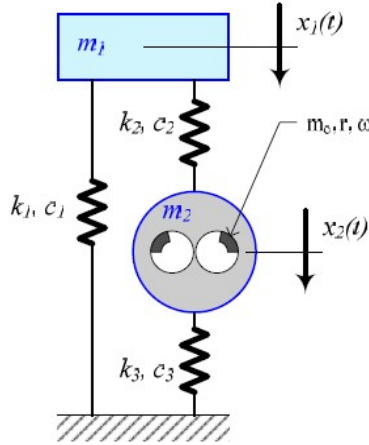


Fig. 5.43 Modelul dinamic simplificat pentru simularea compactoarelor pe pneuri cu un singur rulou vibrator (MRIETC 2) [98]

Mărimile răspunsului sistemului au rezultatele de forma

$$A_{10} = \frac{k_2 m_0 r \omega^2}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 + k_3 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (5.37)$$

$$A_{20} = \frac{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2) m_0 r \omega^2}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 + k_3 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (5.38)$$

Numărul ciclurilor vibrației transmise în teren de către un organ de lucru activ al unui compactor, când trece peste un punct monitorizat se poate estima pe baza figurii 5.44.

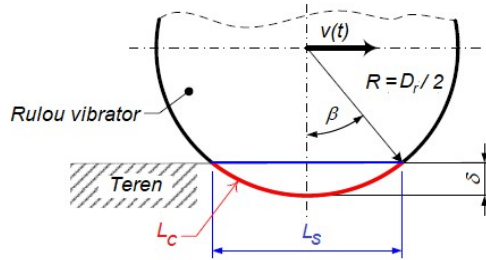


Fig. 5.44 Schemă pentru evaluarea numărului de cicluri ale vibrației la trecerea ruloului

$$L_c = D_r \beta = D_r \arccos\left(\frac{D_r - 2\delta}{D_r}\right) \quad (5.42)$$

$$L_s = 2[\delta(D_r - \delta)]^{0,5} \quad (5.43)$$

unde D_r reprezintă diametrul tamburului și δ este deformarea statică a terenului. Pentru oricare din expresiile anterioare, numărul de cicluri poate fi evaluat cu relația

$$n_{cicluri} = f L_{\{c,s\}} v^{-1}, \quad (5.44)$$

unde f este frecvența vibrației generate de ruloul vibrator și v reprezintă viteza echipamentului. Pe baza relației (5.44) s-a efectuat o analiză a dependenței dintre numărul de cicluri, frecvența vibrațiilor, viteza ruloului și deformarea statică a terenului. S-au adoptat: $D_r = 1,221$ m, $\delta = 0,014$ m, $v = 1,34$ km/h, $f = 32$ Hz și domeniile de variație $\delta = (0,008 - 0,020)$ m, $v = (1 - 3)$ km/h, $f = (20 - 34)$ Hz. Această analiză a fost efectuată pentru a justifica că la o singură trecere, consolidarea locală a terenului e o sumă a deformărilor parțiale datorită fiecărui ciclu implicat în procesul local.

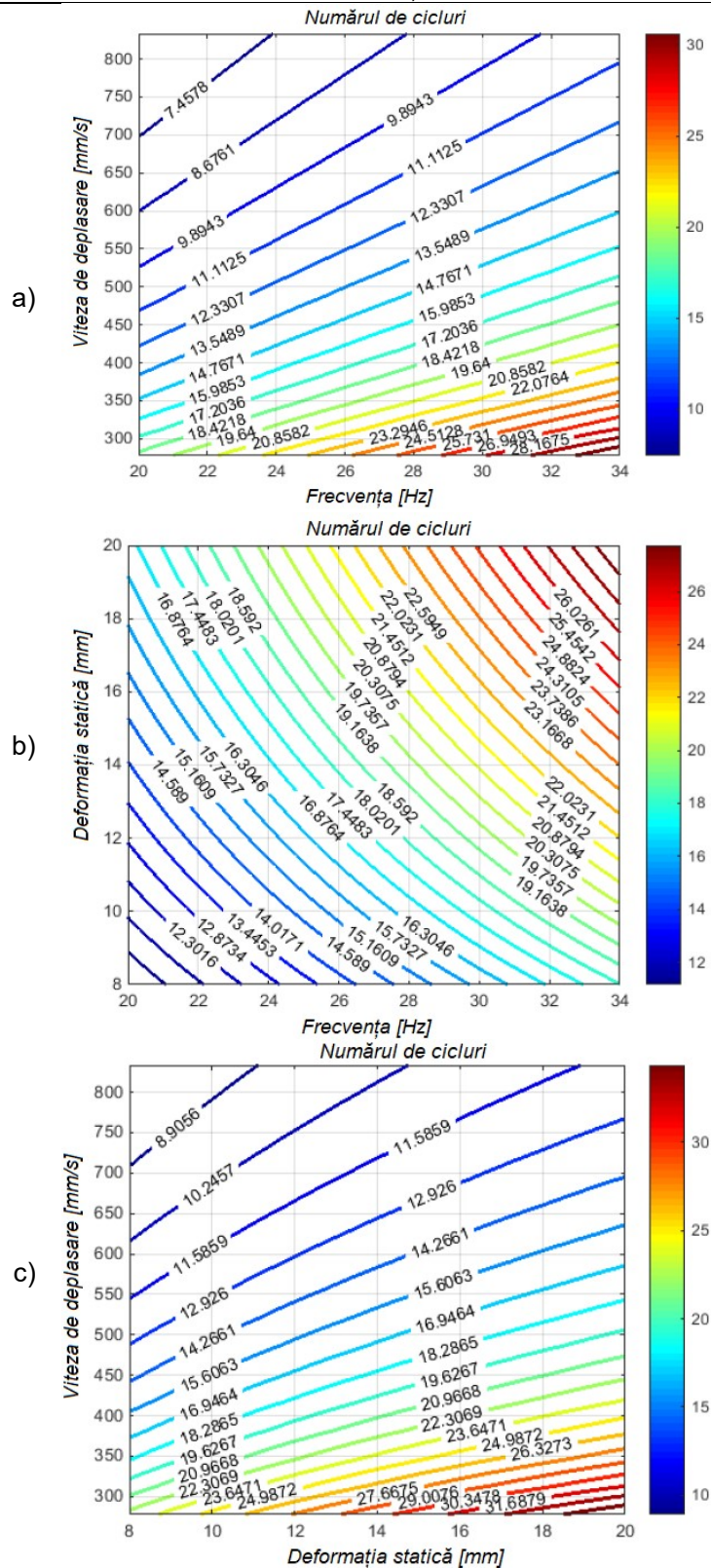


Fig. 5.45 Numărul de cicluri la o trecere a ruloului vibrator, în raport cu viteza mașinii și frecvența vibrațiilor, pentru $\delta = 14$ mm (a), la deformația statică a terenului și frecvența vibrațiilor, pentru $v = 1,34$ km/h (b) și, respectiv, la viteza mașinii și deformația statică a terenului, pentru $f = 32$ Hz (c). Numărul de cicluri este marcat pe diagramele izoclinelor.

Analiza a fost efectuată în ipoteza conform căreia consolidarea parțială a terenului (sub aspectul raportului de rigiditate k_3/k_{30}) variază într-un interval de (1 - 5) și răspunsul dinamic al sistemului într-un interval de (1 - 100) Hz. Evaluările au fost făcute pentru două scenarii de caz: cu și fără amortizare în model. În acest fel au fost simulate ambele răspunsuri dinamice, atât ale mașinii compactoare, cât și ale ruloului, dar numai pentru rulou se vor prezenta analizele detaliate. În lipsa amortizării, diagramele din figura 5.46 arată mărimile spectrale ale factorilor de amplificare A_{10} , A_{20} - vezi relațiile (5.37) și (5.38).

Pe baza diagramei din figura 5.46b, a fost evaluată deplasarea vârfurilor frecvențelor relevante în raport cu creșterea rigidității terenului. Pe de altă parte, când s-a luat în considerare prezența amortizării, evoluțiile spectrale ale factorilor de amplificare ale deformării statice, în termeni de amplitudine și, respectiv, de fază, au fost evaluate și reprezentate în figura 5.47.

Primele două diagrame prezintă ambele răspunsuri (mașină și rulou), iar ultimele două detaliază vibrația după trecerea ruloului. Prezența amortizării este recomandată dacă analizăm comparativ diagramele în figura 5.47 cu cele din figura 5.46. Astfel, primul vârf prezintă o diminuare puternică la consolidarea completă a terenului, și devine aproape imperceptibil odată cu creșterea raportului (k_3/k_{30}).

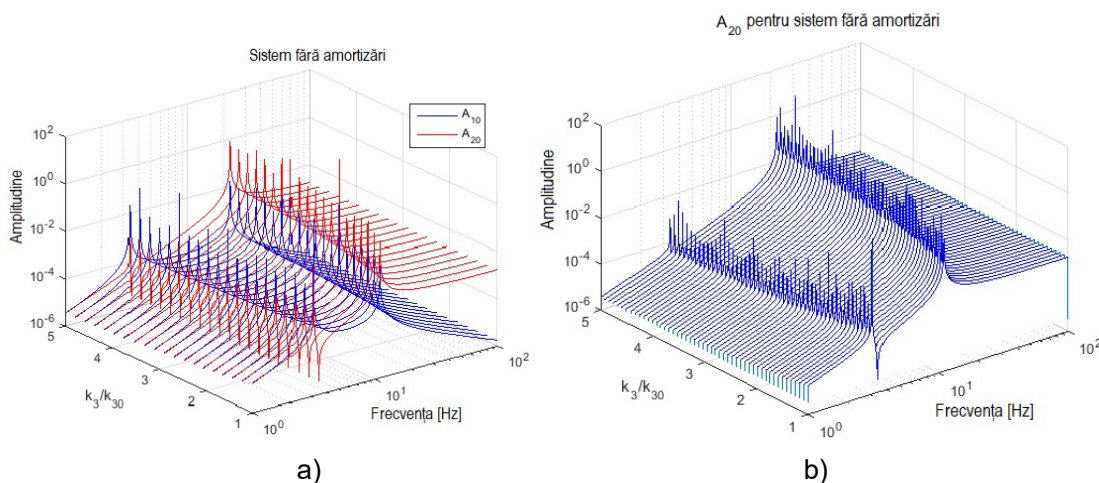


Fig. 5.46 Evoluția mărimilor spectrale ale factorilor de amplificare a deformației statice, pentru sistemul fără amortizare, în funcție de raportul de consolidare a terenului (k_3/k_{30}) și frecvența vibrațiilor: ambele răspunsuri (a) și exclusiv răspunsul ruloului (b). În diagrama (a), linia albastră ilustrează răspunsul mașinii și linia roșie ilustrează răspunsul ruloului.

Analiza comparativă a cazurilor simulate poate fi făcută mai simplu folosind o reprezentare suprapusă a rezultatelor care indică deplasarea vârfurilor frecvențelor relevante în ambele situații. Ținând cont de scopul acestui studiu, calculele au fost efectuate, atât pentru principalele valori ale parametrilor modelului, cât și pentru unele abateri ale valorilor de referință.

Pe baza observațiilor experimentale, s-a considerat o abatere de $\pm 20\%$ pentru rigiditatea interacțiunii sol-rulou (valabilă la trecerea anterioară) și pentru amortizare.

În același timp, s-a presupus că parametrii suspensiei rulou-șasiu rămân constanți pe durata unui ciclu de lucru.

Rezultatele au fost prezentate în figura 5.48, alături de două vederi detaliate din cele două zone care conțin evoluții relevante pentru deplasarea vârfurilor frecvențelor.

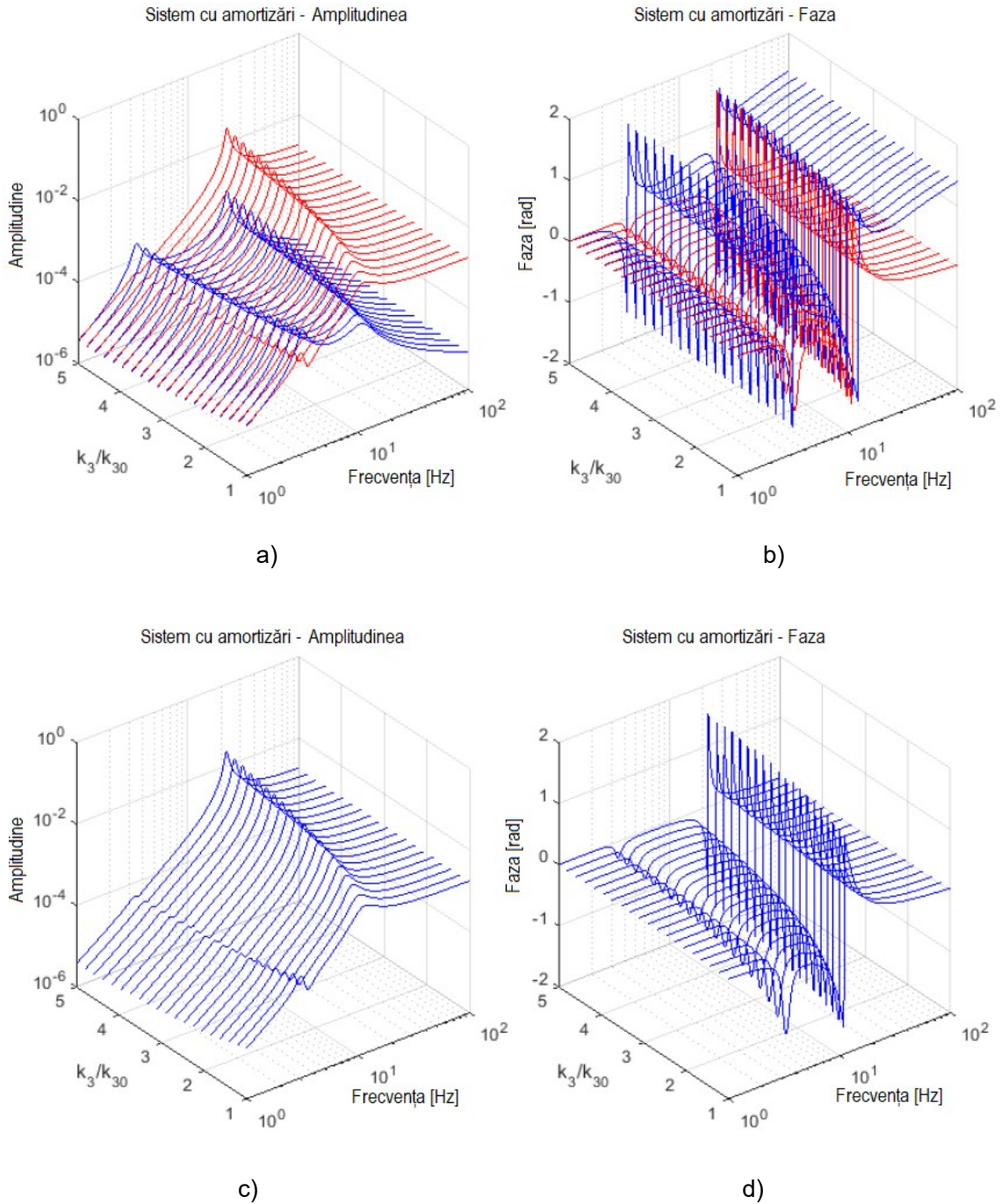


Fig. 5.47 Evoluții spectrale ale factorilor de amplificare a deformației statice, pentru sistem cu amortizare, în funcție de raportul de consolidare a solului (k_3/k_{30}) și frecvența vibrațiilor: ambele răspunsuri, în termeni de amplitudine (a) și faze (b) și, respectiv, răspunsul ruloului, în termeni de amplitudine (c) și faze (d). În diagramele (a, b), linia albastră indică răspunsul mașinii și linia roșie indică răspunsul ruloului.

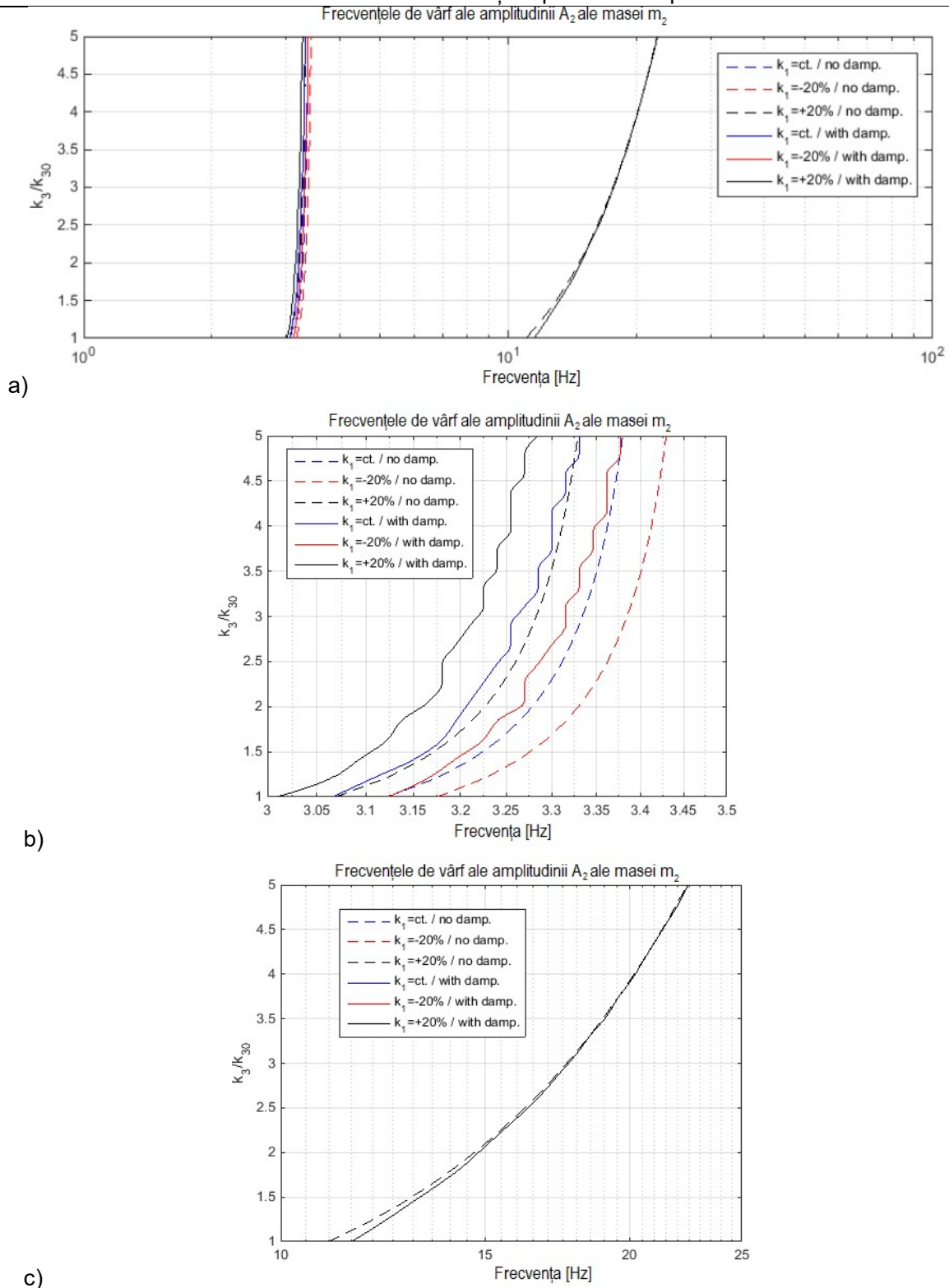


Fig. 5.48 Evoluția comparativă a frecvenței vârfurilor relevante în răspunsul ruloului, pentru sistemul cu și fără amortizare, în funcție de raportul de consolidare a terenului (k_3/k_{30}) și frecvența vibrațiilor: vedere generală (a) și detaliată cu vederi ale zonelor relevante (b, c). S-a presupus o abatere de $\pm 20\%$ a parametrilor de interacțiune, sub aspectul rigidității k_1 și amortizării c_1 (unde este cazul).

Analizând diagramele rezultă următoarele observații concludente. Vederea globală a diagramelor spectrale nu arată modificări majore ale vârfurilor frecvențelor relevante (sub aspect deplasare în funcție de consolidare). În același timp, pe imaginile mărite, se observă două comportamente diferite. Astfel, primul vârf (cu valoare mai mică) prezintă clar o evoluție distinctă în raport cu creșterea consolidării terenului. Pentru intervalul considerat al raportului (k_3/k_{30}), frecvența se schimbă cu aproximativ 0,25 Hz, lucru care este posibil de verificat în practică cu dispozitive instrumentale reale. În plus, se poate observa cu ușurință pe diagramă în figura 5.48b, că diferențele devin mai relevante odată cu creșterea raportului de consolidare. Pe de altă parte, al doilea vârf (cu frecvență înaltă) capătă aproximativ aceeași evoluție, independent de abaterea de la valoarea de referință (vezi figura 5.48c). Diferențele apar doar în cazurile fără amortizare, comparativ cu prezența amortizării. Suplimentar, se poate observa că cele două curbe devin foarte apropiate odată cu creșterea ratei de consolidare. Aceste observații conduc la o concluzie finală conform căreia **primul vârf al frecvenței reprezintă parametrul care trebuie să fie monitorizat în timpul procesului de compactare, pentru a caracteriza evoluția/permanența procesului de consolidare/tasare a terenului.**

5.5.4. Concluzii parțiale

Analiza comparativă a rezultatelor obținute prin simulare pe modelul teoretic de comportare a pământului (MTC) și pe modelul reologic de interacțiune mașină – teren (MRIETC 1), și a rezultatelor verificărilor experimentale în timpul procesului de compactare realizat în canalul de pământ (fig. 4.8 și fig. 4.9) conduce la validarea acestor modele, făcându-le utile în cadrul analizei oricărui proces de compactare desfășurat în condiții concrete de lucru pe șantier.

Modelele reologice de interacțiune mașină – teren (MRIETC 1, MRIETC 2) propuse aduc următoarele avantaje:

- conexiunea adecvată dintre cele două subsisteme ale modelului (cel al terenului și cel al mașinii de compactare) definite în contextul ipotezelor și legităților interparametrice propuse în subcapitolele anterioare ale tezei de doctorat, permite:
 - ✓ estimarea corectă a evoluției stării terenului în timpul procesului de compactare;
 - ✓ alegerea optimă a unui utilaj compactor adaptat specificului lucrării particulare de compactare;
 - ✓ optimizarea regimului de lucru al utilajului compactor;
 - ✓ stabilirea unei tehnologii optime de lucru;
- cunoașterea evoluției coeficientului de rigiditate k corelat permanent cu evoluția stării terenului Δh , oferind posibilitatea alegerii optime a mașinii de compactare, cu realizarea unui număr predefinit de treceri;
- algoritmi de calcul care stau la baza modelelor de interacțiune MRIETC 1 și MRIETC 2 propuse pot fi ușor de implementat în sisteme automate de control a calității execuției compactării pământurilor, cu compactoare vibratoare asigurând corelarea optimă a parametrilor regimului de lucru cu evoluția stării terenului, prin urmărirea creșterii coeficientului de rigiditate k , fie prin creșterea tasării stratului depus Δh ;
- posibilitatea creării unei baze de date tehnice în contextul actual al digitalizării tehnologiilor de pe șantierele de construcții de drumuri (*Industria 4.0*) în așa fel încât operatorii, instalațiile și echipamentele implicate în procesul tehnologic să poată comunica între ele nemijlocit prin internet folosind accesul la platforme digitale interconectate (la astfel de baze de date tehnice) permițând supravegherea întregului proces de la proiectare, producție, logistică, punere în operă, costuri etc.

6. Concluzii, contribuții personale și direcții generale de cercetare

6.1. Concluzii

Principala contribuție a tezei de doctorat o constituie dezvoltarea de către autor a unor modele dedicate pentru analiza performanței compactării prin evaluarea calitativă a comportării interacțiunii rulou – teren până la atingerea gradului de compactare impus realizat după un număr predefinit de treceri. Modelele conțin în algoritmul de calcul legități interparametrice pentru definirea stării inițiale a mediilor analizate făcând posibilă modelarea caracteristicilor vâscoase, elastice și disipative ale acestora completată și cu modelarea comportamentului dinamic al ansamblului structural și funcțional al compactorului cu rulouri vibratoare pus în operă.

Fiecare capitol al acestei teze de doctorat conține concluzii parțiale, iar în acest capitol vor fi evidențiate numai principalele concluzii obținute în cele două cazuri de abordare: teoretic (analitic) și practic (experimental).

În prima parte a tezei de doctorat este prezentată o sinteză bibliografică a cercetărilor din țară și străinătate în domeniul compactării materialelor de construcții cu ajutorul vibrațiilor.

Cercetările inițiate în cadrul acestei teze de doctorat au avut ca punct de plecare necesitatea elaborării și implementării unor noi modele (prin îmbunătățirea celor existente) pentru studiul comportării pământurilor slab coezive și a unor modele dinamice pentru obținerea unor informații cât mai apropiate de realitate în ceea ce privește estimarea calitativă a parametrilor specifici care definesc performanța procesului de compactare cu vibrații a unui teren. S-au efectuat analize comparative între comportarea terenului la funcționarea în regim static și dinamic al utilajului de compactare pe modele fizice, reologice, numerice și virtuale, cu număr diferit de grade de libertate (de la model cu un grad la model cu trei grade de libertate) pentru diferite tipuri de terenuri slab coezive.

Astfel, s-a creat o bază de date tehnice care este utilă în contextul actual al digitalizării tehnologiilor de pe șantierele de construcții de drumuri (*Industria 4.0*), folosită pentru:

- stabilirea numărului de treceri necesar (adaptat neomogenităților structurii terenului);
- alegerea tehnologiei adecvate de compactare cu un număr de treceri prestabilit (evitându-se în felul acesta fenomenele de supracompactare);
- cunoașterea valorilor parametrilor ρ_d , E_{st} , k , Δh , D_i ca fiind definatorii pentru evaluarea performanței procesului de compactare prin vibrație a materialelor de construcții la punerea în operă.

Rapoartele consultate (puse la dispoziție de Institutul de cercetări ICECON S.A. București) cu rezultatele seriilor de încercări experimentale în condiții de laborator și in situ a făcut posibilă acordarea parametrică a modelelor propuse (fiind mărimi de intrare în modelele adoptate) astfel încât acestea să simuleze cât mai fidel realitatea identificabilă și măsurabilă a fenomenelor studiate.

Evaluarea nivelului de performanță a compactării cu vibrație a terenurilor slab coezive a fost obiectivul central urmărit în teză și un aspect deosebit de important a fost pus pe identificarea parametrilor specifici care să descrie evoluția stării terenului sub acțiunea trecerii utilajului compactor, ca parametri cu evoluție predictibilă în timp și verificabili pe cale experimentală.

Concepția modelelor a fost una parametrizată, astfel putându-se modela facil diferite tipuri de terenuri slab coezive, grosimile straturilor, tehnologia adoptată (compactare statică sau dinamică), numărul de treceri, precum și particularizarea fiecărui utilaj de compactare pus în operă.

În final, rezultatele experimentale și cele simulate au fost validate.

6.2. Contribuții personale

Ca urmare a cercetărilor efectuate atât pe cale numerică prin modelare și simulare, cât și experimentală în cadrul ICECON S.A. București pot fi reținute următoarele contribuții personale:

- a) analiza stadiului actual, atât pe plan național, cât și la nivel internațional, în domeniul controlului compactării prin vibrații a terenurilor;
- b) stabilirea conceptului de model interactiv în procesul tehnologic de lucru cu compactoarele (stative sau vibratoare), printr-o estimare calitativă a performanței procesului de compactare;
- c) modelarea fizică și matematică a terenului supus la acțiuni statice și dinamice (în funcție de regimul de lucru adoptat corespunzător tehnologiei aplicate) pentru medii de compactare diferite încadrate în gama pământurilor slab coezive;
- d) stabilirea unor legături interparametrice (pe baza testelor geotehnice inițiale și ale celor experimentale efectuate pe durata desfășurării proceselor de compactare exemplificate) care stau la baza algoritmului de calcul al modelului teoretic al pământurilor slab coezive (MTC);
- e) modelarea fizică și matematică a interacțiunii utilaj compactor-teren în regim dinamic de funcționare, cu modificarea semnificativă a coeficientului de rigiditate al terenului și, respectiv, atunci când parametrii de vibrație sunt discret variabili, pe model Voigt-Kelvin;
- f) evidențierea componentelor vâsco-elasto-plastice, ca răspuns al terenului la acțiunea compactorului (cu estimarea calitativă a tasării finale realizate), pe baza sistemelor instrumentale și informatice specializate Matlab/Simulink&SimMechanics (pe modele MRTTC și EVP);
- g) crearea unei baze de date tehnice pentru optimizarea și particularizarea modelelor propuse, cu rol aplicativ, ținând seama de caracteristicile vâsco-elastice și disipative ale mediilor analizate (pământurile slab coezive) și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional al compactorului pus în operă;
- h) evaluarea răspunsului dinamic al ruloului utilajului după treceri succesive peste strat, pentru caracterizarea performanței procesului de compactare, prin cunoașterea parametrilor care definesc evoluția stării terenului sub aspectul tasării, rigidității, modulului de elasticitate, gradului de compactare (pe modele MRIETC 1 și MRIETC 2).

6.3. Direcții generale de cercetare

Continuarea cercetărilor în viitor pot fi grupate pe trei direcții:

- creșterea preciziei de măsurare a parametrilor monitorizați pe durata desfășurării procesului de compactare prin utilizarea instrumentației de măsurare de ultimă generație care asigură înregistrarea în timp real a variației acestora;
- optimizarea modelelor propuse folosind legături interparametrice descrise de funcții neliniare de variație a parametrilor implicați în procesul de compactare;
- conceperea unui sistem de monitorizare și control automat în timp real al parametrilor esențiali în procesul de compactare (prin corelarea regimului de lucru al utilajului cu caracteristicile fizico-mecanice ale terenului după fiecare trecere) în vederea execuției la nivel maxim de performanță în ceea ce privește numărul de treceri, utilajul folosit, tehnologia aplicată și gradul de compactare realizat în final. Toate aceste informații obținute pot fi transferate către o bază de date tehnice aflată pe o platformă digitală la care au acces toți factorii de decizie implicați în execuția lucrării respective (în contextul obiectivelor conceptului cu implementare actuală *Industria 4.0*)

LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE ȘI PREZENTATE

A. Publicații în reviste cotate Web of Science

1. Bratu, P., Buraga, A., Chilari, O., Ciocodeiu, A.I., Oprea, I., *Evaluation of the linear viscoelastic force for a dynamic system (m, c, k) excited with a rotating force*, RJAV, Vol 16, No 1(2019), pp.39-46
2. Buraga, A., Debeleac, C., *Experimental Investigations and Numerical Simulations of Vibratory Compaction of Weakly Cohesive Soils*, RJAV, No 19(2022), Issue 2, pp.143-148

B. Publicații în volume indexate ISI Proceedings

1. Debeleac, C., Nastac, S., Buraga, A., *On Nonlinear Dynamics of Vibrating Compaction Process of Construction Materials*, Proc. of the 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019, 2019, Montreal, Canada, 7 - 11 July 2019

C. Articole în reviste indexate BDI

1. Debeleac, C., Nastac, S., Buraga, A., *Randomly aspects within the response of terrain due to characteristics uncertainty at vibrating compaction process*, Proc. of the 27th International Congress on Sound and Vibration - ICSV 27, 11-16 July 2021, 8p, SCOPUS
2. Debeleac, C., Buraga, A., Nastac, S., *Nonlinear analysis of the terrain layers response at vibrating compaction process*, Proc. of the 27th International Congress on Sound and Vibration - ICSV 27, 11-16 July, 2021, 8p, SCOPUS
3. Buraga, A., Debeleac, C., *A State-of-the-art Review of Compaction Control Tests Methods*, Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics - Hidraulica, nr. 4, pp. 42-50, 2022, EBSCO

D. Lucrări prezentate la manifestări științifice și publicate în volumele acestora

1. Dobrescu, C., Braguta, E., Buraga, A., *Cercetări privind folosirea deșeurilor reciclabile pentru îmbunătățirea capacității mecanice și a stabilizării pământurilor argiloase*, în vol. Conferința tehnico-științifică internațională "Problemele actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului" ediția a X, p. 392-398, 27 noiembrie 2021, Chișinău, RM, ISBN 978-9975-87-779-4
2. Debeleac, C., Buraga, A., *Soluții tehnice și tehnologii ecologice utilizate pe șantierele de construcții*, în vol. Conferința tehnico-științifică internațională "Problemele actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului" ediția a IX, p.305-313, 16-17 nov. 2018, Chișinău, RM
3. Bejan, S., Buraga, A., *Compactarea pământurilor coezive și slab coezive, modele dinamice pentru studiul interacțiunii rulou-teren*, în vol. Conf. tehnico-științifică internațională "Problemele actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului" ediția a IX, p.256-264, 16-17 noiembrie 2018, Chișinău, RM, ISBN 978-9975-87-384-0

E. Lucrări prezentate la manifestări științifice

1. Debeleac, C., Buraga, A., *Field evaluation of compaction degree using internet-of-things*, The 9th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering, COMAT 2022, 17-18 October 2022, Univ. Transilvania Brasov, Romania.
2. Debeleac, C., Buraga, A., *Behavior model of weakly cohesive soils in the static compaction process*, The 18th International Conference of Constructive Design and Technological Optimization in Machine Building Field, OPROTEH 2023, May 11-13, 2023
3. Buraga, A., *Evaluation of the action of the roller on weakly cohesive soils in the static compaction process*, 18th International Conference of Constructive Design and Technological Optimisation in Machine Building Field, OPROTEH 2023, Bacău, May 11-13, 2023
4. Buraga, A., Debeleac, C., *Computational method for road layers compaction degree identification*, The 9th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2021, 21-23 October 2021, Univ. Transilvania Brasov, Romania, Poster
5. Buraga, A., Debeleac, C., *Compaction quality inspection method of soil embankment based on compaction control system*, 9th Internat. Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2021, 21-23 Oct. 2021, Univ. Transilvania Brasov, RO, Poster
6. Buraga, A., Debeleac, C., Nastac, S. *In Field Testing of Vibratory Compaction Performance Level for Construction Materials*, eMECH 2020&COMAT 2020, Brasov, Romania, Poster

F. Premii

1. Premiul 2 pentru lucrarea Debeleac, C., Buraga, A., *Field evaluation of compaction degree using internet-of-things*, The 9th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering, COMAT 2022, 17-18 October 2022, Univ. Transilvania Brasov, Romania.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Hakansson, I. and Lipiec, J., *A Review of the Usefulness of Relative Bulk Density Values in Studies of Soil Structure and Compaction*, Soil and Tillage Research, 53, 71-85, 2000
[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- [2] Townsend, F.C., Anderson, B., *A Compendium of Ground Modification Techniques*, Research Report BC-354, pp.16-60, Florida Department of Transportation (FDOT), 2004
- [3] Debeleac, C.N., *Mașini și echipamente tehnologice pentru construcții*, Editura Galati University Press - GUP, ISBN 978-606-696-173-8, 231 pag., 2019
- [4] Gysi, M., Klubertanz, G., Vulliet, L., *Compaction of an Eutric Cambisol under wheel traffic in Switzerland—field data and modelling*, Soil and Tillage Research, 56, 117-129, 2000
- [5] Bratu, P., *Analiză dinamică și optimizarea răspunsului pentru mașinile de compactat prin vibrație. Raport de cercetare științifică*. MCIInd, 1975
- [6] Kolumban, V., *Contribuții la optimizarea performanțelor mașinilor de compactare prin vibrație*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2000
- [7] Căpățână G.F., *Analiza comportării dinamice a rulourilor compactoare vibratoare pentru lucrări de drumuri*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2013
- [8] Panfiloiu, Gh., *Sistem suport de decizie pentru analiza dinamică a modelelor reologice la compactarea prin vibrații*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2013
- [9] Săvulescu, A., *Controlul vibrațiilor de răspuns la echipamentele tehnologice în regim dinamic de funcționare*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2016
- [10] Proctor, R.R., *Design and Construction of Rolled Earth Dams*, Engineering News record, 3: 245-248, 286-289, 348-351, 372-376, 1933
- [11] Kodikara, J.K., *New framework for volumetric constitutive behaviour of compacted unsaturated soils*, Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(11), pp. 1227-1243, <https://doi.org/10.1139/t2012-084>
- [12] Basheer, L., Kropp, J. și Cleland, D.J., *Assessment of the Durability of Concrete from Its Permeation Properties: A Review*, Construction and Building Materials, 15, 93-103, 2001, [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- [13]*** ASTM D698-12E2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))
- [14]*** ASTM D1557-12E1, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))
- [15] Johnston M.M., *Laboratory Studies of Maximum and Minimum Dry Densities of Cohesionless Soils, Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*, ASTM, STP 523, pp. 133-140, 1973
- [16] Hausmann M. R., *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill, New York, 1990
- [17] Masoud T. , Alsharie H., Qasaimeh A., *Energy Analysis for the Compaction of Jerash Cohesive Soil*, Computational Water, Energy and Environmental Engineering, 4: 1-4, 2015
- [18] Smith C.W., Johnston M.A., Lorentz, S., *Assessing the Compaction Susceptibility of South African Forestry Soils. The Effect of Soil Type, Water Content and Applied Pressure on Uniaxial Compaction*, Soil and Tillage Research, 41: 53-73, 1997
- [19] Das, B. M., *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth Edition, pp.83-108, 664-668, 2002
- [20] Pinard, M.I., *Innovative developments in compaction technology using high energy impact compactors*, Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart, Australian Geomechanics Society, 2: 775-781, 1999
- [21] Mosaddeghi M., Hajabbasi M., Hemmat A., Afyuni M., *Soil Compatibility as Affected by Soil Moisture Content and Farmyard Manure in Central Iran*, Soil and Tillage Research, 55: 87-97, 2000
- [22] Vorobieff G., *A new Approach to Laboratory Testing of Stabilized Materials*, Australian Stabilization Industry, 22nd ARRB Conference, 2000
- [23] Håkansson, I., Lipiec, J., *A Review of the Usefulness of Relative Bulk Density Values in Studies of Soil Structure and Compaction*, Soil and Tillage Research, 53: 71-85, 2000
- [24] Adam, D., *Continuous Compaction Control (CCC) with vibrating rollers*, Doctoral thesis (in German), Vienna University of Technology, 1996

- [25] **Buraga, A.**, Debeleac, C., *A State-of-the-art Review of Compaction Control Tests Methods*, Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics - Hidraulica, nr. 4, pp. 42-50, 2022
- [26] ECON Technologies Co., Ltd. "Dynamic Signal Analyzer." Accessed November 29, 2022. <https://www.econ-group.com/en/productshow33.html>.
- [27] Benstone Instruments Inc. "Portable Sound & Vibration Analyzers. impaq Pro Portable Vibration Analyzer." Accessed November 28, 2022. <https://www.benstone.com/tm/?mode=product&mid=1&id=31&name=impaq-Pro-portable-vibration-analyzer>.
- [28] National Instruments. "Sound and Vibration." Accessed November 29, 2022. <https://www.ni.com/ro-ro/shop/hardware/sound-and-vibration-category.html#>
- [29] <http://www.apao.org/presentations/past-asphalt-conferences/intelligent-compaction-technology-discussion.pdf>
- [30] Yuan Ma, S.M., Yang Zhang, A.M., Wei Zhao, Ximao Ding, Zhiwen Wang, Tao Ma, *Assessment of Intelligent Compaction Quality Evaluation Index and Uniformity*, Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Vol. 148, Issue 2, 2022
- [31] Anderegg, R., *ACE AMMANN Compaction Expert*, Technical Paper, Ammann Verdichtung AG, Langenthal, Swiss
- [32] Mooney, M. and Rinehart, R., *InSitu Soil Response to Vibratory Loading and Its Relationship to Roller Measured Soil Stiffness*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, August, 2009
- [33] Vennapusa, P.K.R., White, D.J., Morris, M.D., *Geostatistical analysis for spatially referenced roller-integrated compaction measurements*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 136, no. 6, pp. 813–822, 2010
- [34] Kelm M., *Nummerische Simulation der Verdichtung rolliger Böden mittels Vibrationswalzen*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2004
- [35] https://intelligentconstruction.com/downloads/PapersReports/Texas_Briaud_IC%20Report200409.pdf
- [36] <https://www.bomag.com/ww-en/>
- [37] <http://www.apao.org/presentations/past-asphalt-conferences/intelligent-compaction-technology-discussion.pdf>
- [38] <https://es.slideshare.net/gkchang/fundamentals-of-intelligent-compaction/12>
- [39] Zhang, Qinglong, Tianyun Liu, and Qingbin Li., *Roller-Integrated Acoustic Wave Detection Technique for Rockfill Materials*, Applied Sciences, Vol. 7, no. 11, 1118, 2017
- [40] Donghai Liu, Youle Wang, Junjie Chen, Yalin Zhang, *Intelligent compaction practice and development: A bibliometric analysis*, Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 27, No. 5, pp.1213-1232, 2020
- [41] Soomin Lee, Abubakar Sharafat, In Sup Kim, and Jongwon Seo, *Development and Assessment of an Intelligent Compaction System for Compaction Quality Monitoring, Assurance, and Management*, Applied Science, 12, 6855, 2022
- [42] ***Digitalizarea tehnologiilor de procesare și punere în operă a materialelor de construcții pentru lucrări de drumuri, ICECON S.A.
- [43] Nițu, M.C., *Managementul tehnologic și specializarea resursei umane pentru dezvoltarea eficientă a industriei construcțiilor*, Teză de doctorat. Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2013
- [44] Liu, D.H., Li, Z.L., Lian, Z.H., *Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology*, Automatization in Construction, 44, 234–246, 2014
- [45] Soomin Lee, Abubakar Sharafat, In Sup Kim, and Jongwon Seo, *Development and Assessment of an Intelligent Compaction System for Compaction Quality Monitoring, Assurance, and Management*, Applied Science, 12, 6855, 2022
- [46] Sescu-Gal, C., Frâncu, C., Panaitescu-Liess, R., *BIM - concepts regarding construction automation*, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, Vol. 11, Nr. 4, pp.241-248, 2020
- [47] Xu, Y., D'Angelo, G., Widyatmoko, I., Khojinian, A., Hudson-Griffiths, R., Simms, M. and Giles, D., *Evaluation of innovative automated systems for monitoring asphalt pavement surface conditions in England. Part 2: Automated quality monitoring systems*, Proc. of the 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress, vol 1.0, 2020
- [48] ***C 29-85 Caiet 1: Normativ privind îmbunătățirea terenurilor de fundare slabe prin procedee mecanice (publicat în Buletinul Construcțiilor nr. 8/1985 și completat apoi în 1991)

- [49]***STAS 8942/1-89: Teren de fundare. Determinarea compresibilității pământurilor prin încercarea în edometru
- [50]***P 125-84: Îndrumător tehnic pentru studiul proprietăților pământurilor necoezive lichefiabile (publicat în Buletinul Construcțiilor nr. 4/1985)
- [51]***STAS 9850-89: Lucrări de îmbunătățiri funciare. Verificarea compactării terasamentelor
- [52]***STAS 3300/2-85: Teren de fundare. Calculul terenului de fundare în cazul fundării directe
- [53]***STAS 8942/3-90: Teren de fundare. Determinarea modului de deformare liniară prin încercări pe teren cu placa
- [54] **Buraga, A.**, Debeleac, C., *Experimental Investigations and Numerical Simulations of Vibratory Compaction of Weakly Cohesive Soils*, Romanian Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 19, No 2, 2022, pp.143-148
- [55] Păunescu, M., *Îmbunătățirea terenurilor slabe în vederea fundării directe*, Editura Tehnică București, 1982
- [56] Păunescu M., Vâță I., Scordaliu I., *Mecanizarea lucrărilor de îmbunătățire a terenurilor de fundare*, Editura Tehnică, București, 1990
- [57] Pană, G.D., *Contribuții la studiul sistemelor de mașini cu acțiune vibrantă și a tehnologiilor folosite pentru lucrări de fundații*, Teză de doctorat. Editura Politehnică Timișoara, 2007
- [58] Anderegg, Roland, Dominik A. von Felten and Kuno Kaufmann, *Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors*, Engineering, 2006
- [59] Kloubert, H.-J., *Intelligent VARIOCONTROL rollers with integrated quality control system for soil compaction: principle, measurement, applications*, 83rd TRB Annual Meeting, Washington, DC, January, 2004
- [60] ***www.hamm.eu
- [61] ***www.bomag.eu
- [62] Debeleac, C., *Interacțiunea echipament-mediu și modelare dinamică*, Editura Galati University Press - GUP, ISBN 978-606-696-022-9, 143 pag., 2015
- [63] Bratu, P., *Mecanica teoretică*, Editura IMPULS, București, 2006
- [64] Debeleac, C., Axinti, G., *Sinteze de mecanică newtoniană cu aplicații. Vol. III Dinamica*, Editura Galati University Press - GUP, ISBN 978-606-696-023-6, ISBN 978-606-696-026-7, 168/84 pag., 2015
- [65] Debeleac, C., *Analiza performanțelor de capacitate ale echipamentelor tehnologice în regimuri dinamice variate*, Editura Galați University Press - GUP, Galați, 2018
- [66] Debeleac, C., *On Computational Dynamics of Tool-Soil Interactions*, Chapter 4 in Research Trends in Mechanics, vol. IV, Eds.: Munteanu L., Chiroiu V., Sireteanu T., Editura Academiei Romane, ISBN 978-973-27-1945-1, pp. 83-108, 2010
- [67] Bratu, P., *Numerical Monitoring of the Dynamic Behavior in Frequency of the Parametric Systems in Forced Vibration Regime*, Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Anul XX, Nr. 3, 2013
- [68] Bratu, P., Debeleac, C., Vasile, O., *Rheological models for dynamic systems of second order specific for compaction processes of road structures*, Proc. of SISOM 2012 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 30-31 May, pp. 364-369.
- [69] Bejan, S., *The roller-ground dynamic interaction in the compaction process through vibrations for road construction*, Romanian Journal of Transport Infrastructure, Vol.5, No.2, 2016
- [70] Dobrescu, C., *Dynamic Response of the Newton Voigt-Kelvin Modelled Linear Viscoelastic Systems at Harmonic Actions*, Symmetry, Vol. 12, No. 9, 1571, 2020
- [71] Braguță, E., Dobrescu, C., *Aspects regarding evaluation of compacting process by vibration of enzyme-stabilized soils*, Journal of Engineering Science May, Vol. XXVII (2), pp. 135-144, 2020
- [72] Dobrescu, C., *The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil*, Applied System Innovation, Vol. 3, No. 2, 25, 2020
- [73] Bratu, P., Drăgan, N., Dobrescu, C., *Dynamic Performances of Technological Vibrating Machines*, Symmetry, Vol. 14, No. 3, 539, 2022
- [74] Bratu, P., Debeleac, C., *The analysis of vibratory roller motion*, The Proceedings of the VIIth Triennial International Conference Heavy Machinery – HM 2011, Session Earthmoving and transportation machinery, Vrnjačka Banja, Serbia, 29 June -2 July, 2011
- [75] Debeleac, C., *On the efficiency of compacting equipment*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Vol.2, Issue XVI, Fascicle XIV Mechanical Engineering, pp.51-54, 2010
- [76] Mihăilescu, Șt. și alții, *Mașini de construcții*, Vol.2, Editura Tehnică, București, 1985

- [77] Oproescu, Gh., Debeleac, C., Leopa, A., Năstac, S., *On the rheological behaviour of the soil in the artificial compacting process*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XIV, pp. 63-70, 2008
- [78] Dobrescu, C., *Analysis of Dynamic Earth Stiffness depending on Structural Parameters in the Process of Vibration Compaction*, Romanian Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 16, No. 2, pp. 174-177, 2019
- [79] Li, J., Bai, X., Ma, F., *Energy transfer and influencing factors in soil during compaction*, PLoS One, Nov 20, Vol. 15, No. 11, 2020
- [80] Bratu, P., **Buraga, A.**, Chilari, O., Ciocodeiu, A.I., Oprea, I. *Evaluation of the linear viscoelastic force for a dynamic system (m, c, k) excited with a rotating force*, Romanian Journal of acoustics and Vibration, Vol 16 No 1(2019), pp. 39-46
- [81] V. L. Nguyen and K. T. Nguyen, *Enhancing the ride comfort of the off-road vibratory roller cab by adding damper hydraulic mount*, Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 21, pp. 89–95, Dec. 2018, <https://doi.org/10.21595/vp.2018.20339>
- [82] Van Quynh, L., Duy, N.T., Van Liem, N., Van Cuong, B., Long, L.X., *Optimal Design of Cab's Isolation System for a Single-Drum Vibratory Roller*, Sattler, KU., Nguyen, D.C., Vu, N.P., Long, B.T., Puta, H. (eds) Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 178. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64719-3_68
- [83] Van Quynh, L., Vu, L.A., Van Cuong, B., Tan, H.A., Long, L.X., *A Comparative Analysis of Ride Performance of Double-Drum Vibratory Roller with Two Cab Mount Systems*, Nguyen, D.C., Vu, N.P., Long, B.T., Puta, H., Sattler, KU. (eds) Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 366. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92574-1_3
- [84] R. Jiao, V. Nguyen, and V. Le, *Ride comfort performance of hydro pneumatic isolation for soil compactors cab in low frequency region*, Journal of Vibroengineering, Vol. 22, No. 5, pp.1174–1186, 2020, <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21345>
- [85] Debeleac, C., Nastac, S., **Buraga, A.** *On Nonlinear Dynamics of Vibrating Compaction Process of Construction Materials*, Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019, 2019, Montreal, Canada, 7 to 11 July 2019
- [86] Debeleac, C., **Buraga, A.**, Nastac, S., *Nonlinear analysis of the terrain layers response at vibrating compaction process*, Proc. of the 27th International Congress on Sound and Vibration - ICSV 27, 11-16 July, 2021, 8 pag
- [87] Zhou, H., Nguyen, V., Wu, X., *Performance of the combined hydropneumatic isolations on improving vibration of vibratory roller cab: Experiment and simulation*, Noise & Vibration Worldwide, 52(4-5):102-112, 2021
- [88] Paulmichl, I., Adam, C. & Adam, D., *Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum*, Acta Mechanica 230, 2019, pp. 3103–3126
- [89] Fang X, Bian Y, Yang M, Liu G., *Development of a path following control model for an unmanned vibratory roller in vibration compaction*, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 5, 2018
- [90] Zhengheng Xu, Hadi Khabbaz, Behzad Fatahi, Di Wu, *Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 14, Issue 5, 2022, pp.1609-1625
- [91] Tianbo Hua, Xingguo Yang, Qiang Yao and Hongtao Li, *Assessment of Real-Time Compaction Quality Test Indexes for Rockfill Material Based on Roller Vibratory Acceleration Analysis*, Hindawi Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018, Article ID 2879321
- [92] Sung-Ha Baek, Jin-Young Kim, Jin-Woo Cho, Namgyu Kim, Yeong-Hoon Jeong, Changho Choi, *Fundamental Study on Earthwork Quality Control Based on Intelligent Compaction Technology*, Journal of the Korean Geotechnical Society, December 2020, pp. 45-56
- [93] Bratu, P., *Multibody System with Elastic Connections for Dynamic Modeling of Compactor Vibratory Rollers*, Symmetry, nr.12, 2020, pp. 1617
- [94] L. V. Quynh, V. T. P. Thao, and T. T. Phong, *Optimal design parameters of drum's isolation system for a double-drum vibratory roller*, Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 31, pp. 74–79, May 2020, <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21445>
- [95] Wrana, B., *Soil Dynamics Computation Models*, Book, 2018
- [96] Long, Jianmin & Wang, Gangfeng & Yu, Shou-Wen, *Two-dimensional Hertzian contact problem with surface tension*, International Journal of Solids and Structures, 49, 2012, 1588-1594. 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.017

- [97] Zhou, Songsheng, *New Solutions of Half-Space Contact Problems Using Potential Theory*, Surface Elasticity and Strain Gradient Elasticity, 2012
- [98] Debeleac, C., Nastac, S., **Buraga, A.**, *Randomly aspects within the response of terrain due to characteristics uncertainty at vibrating compaction process*, Proc. of the 27th International Congress on Sound and Vibration - ICSV 27, 11-16 July, 2021, 8 pag.
- [99] Nastac, S., *Rheological model for stress and strain analysis in soils subjected to vibratory compaction technological process*, Proceedings of the 3rd Interdisciplinary Technical National Colloquium, FIB, Braila, Romania, 1997
- [100] Debeleac, C., Nastac, S., *Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process*, The 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), 14(1), 2014, pp. 749–750
- [101] Debeleac, C., Nastac, S., *On Non-linear Characteristics Evaluation of Vibratory Tool and Terrain Interaction for Embankment Works*, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics - PAMM, 12(1), 2012, pp. 605–606
- [102] ***Rapoarte încercări – ICECON SA București (1980 – 2022).