

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Școala doctorală de Inginerie



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

COMPACTAREA DINAMICĂ PRIN VIBRARE A STRUCTURILOR RUTIERE DIN PĂMÂNT STABILIZAT CU LIANȚI ECOLOGICI

Doctorand

Ing. Eugeniu BRAGUȚA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof. univ. em. dr. ing. Polidor-Paul BRATU

Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România

Seria I6: Inginerie mecanică Nr.45

GALAȚI

2018

CUPRINS

CUVANT INAINTE	1	
CUPRINS	2	1
INTRODUCERE	6	3
NOTAȚII ȘI ABREVIERI	10	
LISTĂ FIGURI. LISTĂ TABELE	13	
CAPITOLUL I		
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR. OBIECTIVELE TEZEI	16	5
1.1. Introducere.....	16	5
1.2. Noțiuni generale ale compactării dinamice.....	16	5
1.3. Modelarea reologică în procesul de compactare mecanică a pământurilor.....	19	7
1.4. Stadiul actual în domeniul compactării prin vibrații.....	20	7
1.5. Modelarea pământurilor necoezive încărcate dinamic vertical.....	25	11
1.6. Oportunitatea și obiectivele tezei de doctorat.....	31	14
CAPITOLUL II		
CERINȚELE PARAMETRICE ALE TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE A PĂMÂNTURILOR STABILIZATE	32	15
2.1. Generalități.....	32	15
2.2. Compactoare autopropulsate cu un singur rulo vibrator.....	34	16
2.3. Compactoare cu două rulouri vibratoare.....	36	17
2.4. Caracteristici dinamice pentru compactoare vibratoare.....	39	18
2.5. Capabilitatea tehnologică.....	47	21
CAPITOLUL III		
ANALIZA DINAMICĂ A INTERACȚIUNII RULOU VIBRATOR-TEREN PENTRU PĂMÂNTURI	49	23
3.1. Generalități.....	49	23
3.2. Metode de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrație.....	50	23
3.2.1 Modelul Voigt-Kelvin (E/V).....	50	23
3.2.1.1. Răspunsul sistemului E/V la excitația dinamică inerțială armonică.....	51	23
3.2.2 Modelul Maxwell (E-V).....	52	24
3.2.2.1. Răspunsul sistemului E-V la excitația dinamică inerțială armonică.....	52	24
3.2.3 Modelul Zener E/(E-V) și răspunsul sistemului E/(E-V) la excitația dinamică inerțială armonică.....	53	24
3.2.4 Modelul Voigt-Kelvin-Hooke E - (E/V) și răspunsul sistemului E-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică.....	55	24
3.2.5 Modelul Voigt-Kelvin-Newton V - (E/V) și răspunsul sistemului V-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică.....	56	25
3.2.6 Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton (E-V) - (E/V) și răspunsul sistemului (E-V) - (E/V) la excitația dinamică inerțială armonică.....	57	25
3.3. Mișcarea vibratorii a ansamblului vibrator-teren.....	59	26
3.3.1 Vibrațiile de translație verticală, răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastic..	59	26
3.3.2 Răspunsul dinamic pentru modelul elastic.....	62	26
3.3.3 Răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastoplastic.....	64	27
3.3.4 Răspunsul dinamic pentru modelul elastoplastic E-P.....	64	27
3.3.5 Răspunsul dinamic pentru sistemul cu o masă.....	65	28
3.4. Vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale.....	69	28

3.4.1	Modelul dinamic al sistemului compactor vibrator-teren.....	69	28
3.4.2	Pulsațiile proprii ale ansamblului compactor vibrator-teren.....	69	28
CAPITOLUL IV			
ANALIZA PARAMETRILOR DE CONTACT RULOU COMPACTOR-PĂMÂNT.....			
		76	29
4.1.	Modulul static de deformare liniară a pământului.....	76	29
4.2.	Lățimea amprente de contact dintre rulou și teren, în dependență de densitatea în stare uscată a pământului.....	77	29
4.3.	Grosimea optimă a stratului de pământ compactat.....	78	29
4.4.	Tasarea stratului de pământ.....	78	30
4.5.	Modulul static de deformare liniară funcție de tasarea terenului.....	81	30
4.6.	Coeficientul de rigiditate funcție de tasarea terenului.....	82	30
4.7.	Forța de rezistență a terenului funcție de tasarea acestuia.....	84	31
4.8.	Efortul unitar (tensiuni) axial de compactare funcție de tasarea terenului.....	84	31
4.9.	Parametri esențiali implicați în procesul de interacțiune vibrator-teren.....	85	32
CAPITOLUL V			
ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE PENTRU VALIDAREA TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE DINAMICĂ.....			
		87	33
5.1.	Generalități.....	87	33
5.2.	Cercetări experimentale parametrice privind pământurile stabilizate cu enzime...	87	33
5.2.1	Rigiditatea structurii de pământ stabilizat procesat.....	87	33
5.2.2	Modulul de elasticitate longitudinală.....	88	34
5.2.3	Coeficientul lui Poisson.....	89	35
5.2.4	Modulul de elasticitate volumică.....	89	35
5.2.5	Indicele Californian CBR.....	90	36
5.3.	Determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat.....	90	37
5.4.	Interpretarea rezultatelor experimentale.....	94	40
5.5.	Concluzii.....	95	41
CAPITOLUL VI			
CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII GENERALE DE CERCETARE.....			
		96	42
6.1.	Concluzii.....	96	42
6.2.	Contribuții personale.....	97	43
6.3.	Direcții generale de cercetare.....	98	44
LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE.....			
		99	45
ANEXA A.....			
		100	
BIBLIOGRAFIE.....			
		102	46

INTRODUCERE

În general pământul, fie ca material de fundare a unei construcții, fie ca material propriu-zis de construcție, nu are forma ideală din punctul de vedere al inginerului în domeniu. Este cunoscut că această problemă este depășită prin diverse procedee specifice de îmbunătățire a calității pământului, una dintre cele mai importante și frecvente acțiuni asupra pământurilor fiind densificarea realizată prin compactare. Adesea utilizată pentru densificarea pământului, compactarea dinamică este de multă vreme aplicată în cazul diferitelor tipuri de pământuri, dar lucrarea dată se ocupă de compactarea dinamică prin vibrație a structurilor rutiere din pământ stabilizat cu lianți ecologici. Compactarea de suprafață a pământurilor necoezive se poate efectua foarte eficient cu ajutorul cilindrilor vibratorii, acestea fiind utilaje de compactare cu cilindri netezi dotați cu mecanism vibrator.

Metoda prin care se specifică și se controlează gradul de compactare depinde de natura elementului compactat și este foarte importantă pentru obținerea proprietăților dorite pentru materialul utilizat, în special dacă se urmărește un rezultat relativ uniform al procesului de compactare. Un nivel ridicat al calității necesită și un control corespunzător asupra întregii suprafețe compactate, acest lucru putând fi obținut în mod economic printr-un sistem integrat de control continuu al compactării.

Astfel, unul din factorii care afectează în mod semnificativ proprietățile unui pământ, și în consecință procesul de compactare al pământului, este conținutul de apă care deseori este considerabil în afara posibilităților de influență a constructorului. Întrucât conținutul de apă variază inevitabil, fie datorită schimbărilor atmosferice, fie din punctul de vedere al întinderii suprafeței asupra căreia se lucrează, important a fi stabilite implicațiile acestui fenomen asupra metodei de control a rezultatului compactării.

Această teză de doctorat are ca scop, aprecierea instrumentală și informatică a legităților structurale și funcționale care conduce interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul compactat având ca scopul formularea unui set de modele aplicative care să ne permită și să asigure interfața utilaj – proces tehnologic și cu monitorizarea și controlul parametrilor funcționali și cu menținerea acestora în zona de lucru optim.

Luând în considerare necesitatea și de oportunitatea acestei teze de doctorat, au fost urmărite pe tot parcursul cercetărilor următoarele **obiective principale** și anume:

- evaluarea multicriterială a actualului nivel de cercetare în domeniu pe baza examinării critice a realizărilor relevante atât pe plan național, la fel și pe plan internațional;
- cercetarea comparativă a comportării în regim static, dar în special în regim dinamic a modelelor reologice, cu scopul de a identifica și evidenția elementele de specificitate privind capacitatea acestora de a simula intimitatea (profundimea) fenomenologică a interacțiunii organ de lucru – material procesat;
- determinarea setului de elemente reologice care să constituie baza teoretică pentru dezvoltarea și fundamentarea modelelor finale, cu rol aplicativ, luând în considerare caracteristicile elastice și disipative ale mediilor analizate și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat;
- crearea unui set de teste instrumentale „in situ” suplimentate cu o gamă de încercări experimentale de laborator, efectuate pe baza unui plan sistemic de analiză multicorelativă, să garanteze baza de date pentru procesul de armonizare comportamentală și cu atribuirea parametrică a modelelor matematice/numerice cu realitatea identificabilă și măsurabilă;
- îmbinarea la nivel teoretic a setului de modele de interfață, prin crearea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu verificare, cu scopul optimizării, a următorilor parametri esențiali: complexitatea structurală versus fidelitatea simulării, nivelul de detaliere versus disponibilitatea de rezolvare;
- determinarea configurației finale, conferirea caracteristicilor de lucru și confirmarea setului de modele de interfață cu evaluarea nivelului de performanță obținut.

Teza de doctorat este structurată în 6 capitole dezvoltate pe 108 pagini conținând 55 figuri, 19 tabele și 130 referințe bibliografice.

În cele ce urmează, se va prezenta o scurtă descriere a conținutului capitolelor acestei teze.

Capitolul 1 cuprinde actualul stadiu al cercetărilor privind nivelul cunoașterii și a recentelor studii în domeniul compactării straturilor rutiere (formate din pământ stabilizat, mixtură asfaltică). La fel, sunt prezentate noțiunile generale a compactării dinamice, modelarea reologică și obiectivele tezei de doctorat.

În **capitolul 2** sunt prezentate cerințele parametrice constructive, funcționale și tehnologice a organelor de lucru ale compactoarelor, ținând cont și punând accent pe cele care folosesc vibrațiile în procesul tehnologic de compactare a pământurilor stabilizate. La fel, este argumentată pe considerente teoretice și practice importanța corelației între soluția tehnologică, natura terenului și echipamentul de compactare folosit, astfel încât să se ajungă la un anumit nivel de performanță impus la executarea lucrărilor specifice de structuri rutiere.

Capitolul 3 cuprinde o gamă variată de modele dinamice utilizate la simularea compactoarelor vibratoare, fiind prezentate în ordinea complexității constitutive a acestora. Analiza dinamică a interacțiunii rulou vibrator-teren pentru pământuri, precum și metodele de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrație, răspunsul sistemului E-V la excitații dinamice inerțiale armonice. Mișcarea vibratorii a ansamblului vibrator-teren, vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale. Pentru aceste modele dinamice s-au efectuat ecuațiile diferențiale de mișcare, arătând deplasările instantanee ale maselor sau punctelor de interes ale compactorului (modelat ca un rigid). S-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de forța de rezistență, de coeficientul de rigiditate, la fel și de efortul unitar (tensiuni) axial de compactare a terenului. La final, pe baza acestor legități s-a constatat dependența globală a tuturor parametrilor expuși anterior care au implicare directă în procesul de interacțiune compactor-teren.

Capitolul 4 sunt analizate și deduse legitățile funcționale dintre parametrii caracteristici ai pământurilor stabilite pe baza determinărilor experimentale. S-a stabilit în primul rând dependența densității pământului în stare uscată funcție de modulul static de deformare liniară, de grosimea optimă, de lățimea amprentei de contact dintre rulou și teren, la fel și de tasarea stratului din componența sistemului rutier. La fel, s-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de coeficientul de rigiditate, de forța de rezistență, la fel și de efortul unitar axial de compactare a terenului. S-a stabilit, pe baza acestor legități dependența globală a tuturor parametrilor examinați anterior care are implicare directă în procesul de interacțiune compactor-teren.

În **capitolul 5** este descrisă metodologia și planul de realizare a testelor experimentale pentru validarea tehnologiei în cazul compactării pământurilor stabilizate, indicându-se metodele de experimentare folosite, la fel și aparatura specifică de monitorizare a parametrilor esențiali ai procesului de compactare. Au fost făcute teste experimentale pe terenuri de umplutură în cadrul Poligonului de încercări. Astfel, prin aceste teste s-au determinat parametrii fizico-mecanici ai terenului (umiditate, grad de compactare, densitate, tasare plastică, modulul de elasticitate longitudinală, coeficientul lui Poisson, modulul de elasticitate volumică, indicele californian CBR, determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat) după treceri succesive, la fel și spectrul în frecvență al vibrațiilor în timpul desfășurării procesului tehnologic de compactare. Necesitatea evaluării acestor parametri este deoarece o parte dintre ei reprezintă mărimi de intrare în modelul dinamic al interacțiunii compactor-teren propus în această teză.

Capitolul 6 cuprinde concluzii finale, contribuții personale în domeniul tezei și direcțiile viitoare de cercetare.

CAPITOLUL I

Stadiul actual al cercetărilor. Obiectivele tezei

1.1 Introducere

Conform lucrărilor de terasament ale structurilor rutiere din pământ stabilizat și teren natural utilizat pentru umplutură, pot fi definite de următorii factori: porozitate, umiditate, compactitate. La anumite valori ale factorilor care redau starea pământurilor, se constată o anumite comportare a terenului la acțiunea unor forțe exterioare aplicate prin mijloace mecanice static sau dinamic.

În componența sa pământul are particule solide minerale, concepută prin degradarea chimică sau fizică a rocilor care pot conține materii organice sau nu. Așadar, pot fi menționate următoarele trei faze:

- faza solidă alcătuită din scheletul mineral;
- faza lichidă (în apă) care umple total sau parțial golurile dintre granule;
- faza gazoasă (aer) care umple golurile neocupate de faza lichidă. [14]***

Este posibil în unele cazuri ca una din ultimele două faze să lipsească. Atunci când lipsește faza lichidă, pământul se consideră uscat, iar atunci când golurile dintre granule sunt umplute cu apă, pământul se consideră saturat. În dependență de proporția celor trei faze (solidă, lichidă și gazoasă), în compoziția unui pământ, de mărimea granulelor, de modul de asociere a elementelor componente, rezultă diverse tipuri de pământuri precum și caracteristicile fizico-mecanice ale acestora. [14]***

1.2. Noțiuni generale ale compactării dinamice

Termenul de compactare se consideră în dependență de proporția volumelor sau maselor dintre conținutul de aer, conținutul de apă și partea solidă a solului. În acest mod, gradul de compactare este controlat prin densitatea solului în stare uscată, ceea ce arată masa părții solide din unitatea de volum a materialului compactat. În figura 1.1. sunt prezentate sub forma unei diagrame fazele solidă, lichidă și de aer a unui material compactat.

În anexa A sunt prezentate definițiile unor termeni considerați în fenomenul compactării, precum și relațiile de legătură dintre aceștia.

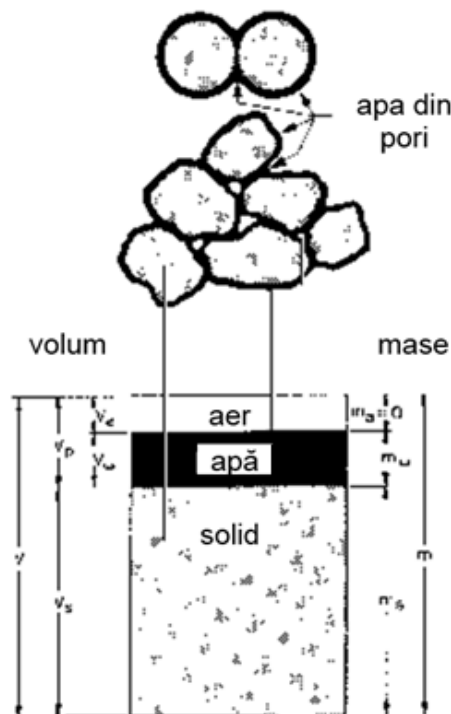


Figura 1.1. Compoziția solului

Pentru a aprecia efectul unei încărcări dinamice asupra unui material granular sub presiune, sau efectuat diverse studii de laborator în două moduri, prin folosirea unei presiuni verticale ciclice controlate, respectiv prin folosirea unei accelerații verticale ciclice controlate prezentate în figura 1.2. [2; 3, 33]

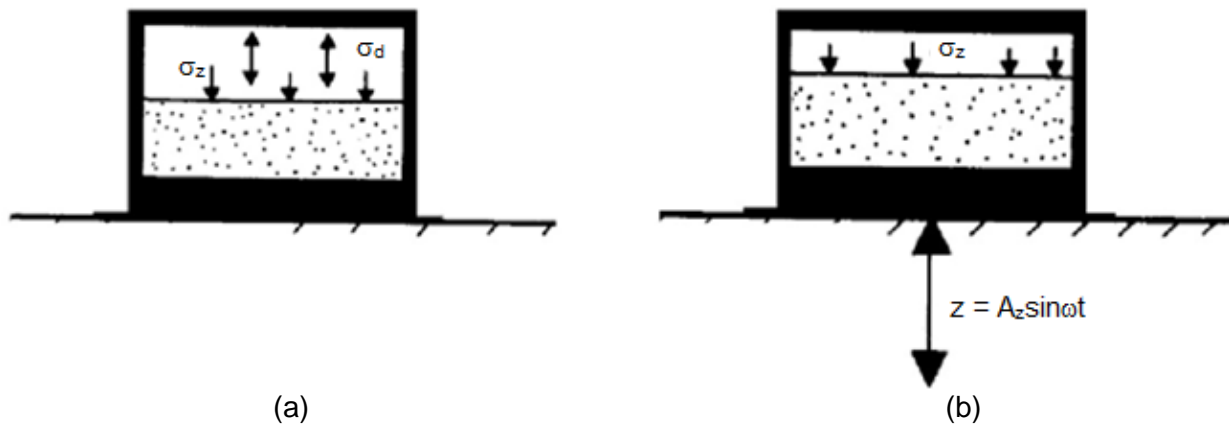


Figura 1.2. Compactarea dinamică a unui material granular: [33]

- (a) presiune verticală ciclică;
- (b) accelerații verticale ciclice.

Testele au arătat că și în cazul unei presiuni înconjurătoare nule $\sigma_{z(1)} = 0$, descreșterea porozității nu are loc înainte de atingerea unui vârf al accelerației egal cu accelerația gravitațională. În același timp, se observă că odată cu creșterea presiunii înconjurătoare, magnitudinea vârfului accelerației la care porozitatea începe să descrească este din ce în ce mai mare. [4]

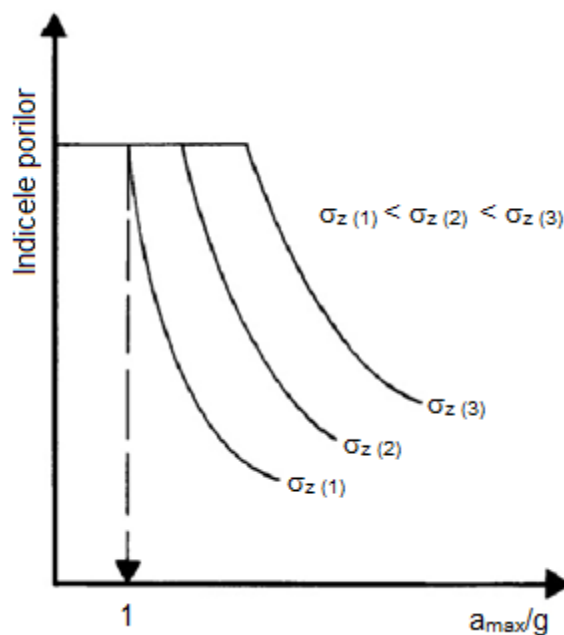


Figura 1.3. Variația porozității unui nisip uscat pe parcursul testelor de compresie cu accelerație ciclică verticală

În figura 1.4. este prezentată variația greutatei specifice nete în raport cu perioada de vibrație atât pentru un nisip uscat cât și pentru un nisip umed, ambele supuse unei accelerații ciclice verticale.

Reieșind din figura 1.4. la fel se poate observa că, în comparație cu nisipurile uscate, nisipurile umede prezintă o plajă mai largă de distribuție a greutatei specifice nete finale. Ce ar înseamnă că în cazul compactării nisipurilor umede, pe lângă magnitudinea accelerației ciclice există și alți parametri cu o influență importantă asupra fenomenului dat.

Prin urmare, dezvoltarea deformațiilor specifice ciclice cauzată de oscilațiile cilindrului vibrator, este considerată ca fiind cel care furnizează cea mai bună relație a compactării produse cu acest utilaj. Experimentele au demonstrat că acest mecanism este prezent în compactarea dinamică a tuturor mostrelor de materiale granulare, atât coezive cât și necozive.

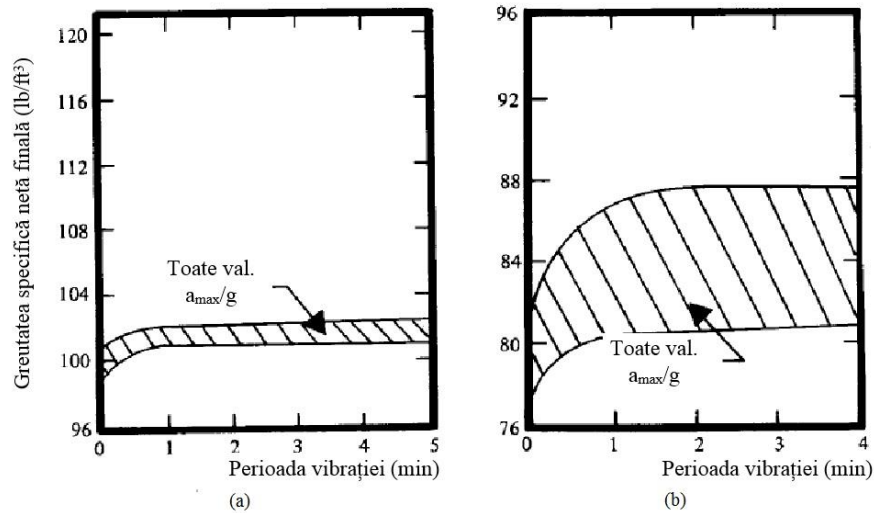


Figura 1.4. Influența perioadei de vibrație în cazul compactării dinamice [33]

- (a) nisipuri uscate
- (b) nisipuri umede

1.3. Modelarea reologică în procesul de compactare mecanică a pământurilor

Modelarea și simularea comportării pământului, sub acțiunea sarcinilor exterioare, depinde după caz de cunoașterea tendințelor moderne de dezvoltare a reologiei completate de unele realizări actuale, cât și dificultățile care apar în stabilirea unor legi de guvernare mecanică a solurilor. [46]

Luând în considerare studiile teoretice de determinare a legilor de comportare mecanică a pământurilor distingem următoarele modele reologice: [46]

- a) Modele microreologice
- b) Modele fenomenologice

1.4. Stadiul actual în domeniul compactării prin vibrații

Astfel, parametrii solului ca densitatea inițială în stare uscată, distribuția granulometrică, forma particulelor și conținutul de apă sunt factorii cei mai importanți care ne dă informații cu privire la eficiența procesului de compactare. Așadar, diferite tipuri de soluri au curbe de compactare variate, putem observa în Figura 1.9.

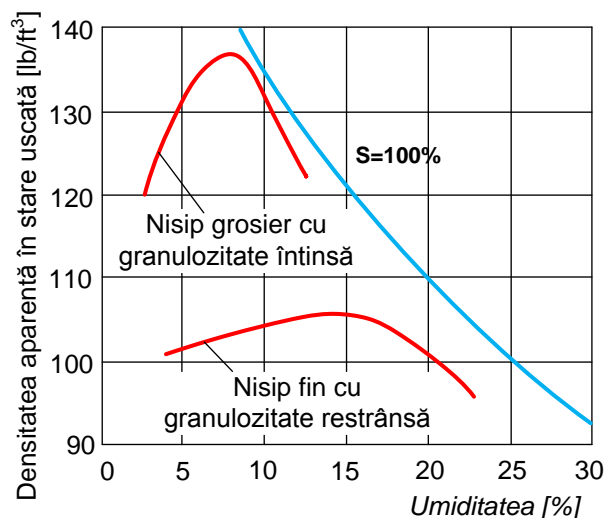


Figura 1.9. Curbele de compactare pentru diferite tipuri de teren în dependență de umiditate [15]

Potrivit Santamarina [24] care argumentează că mișcarea particulelor pe direcție orizontală e diminuată mai rapid decât a celei pe direcție verticală, astfel este prezentat în Figura 1.11.

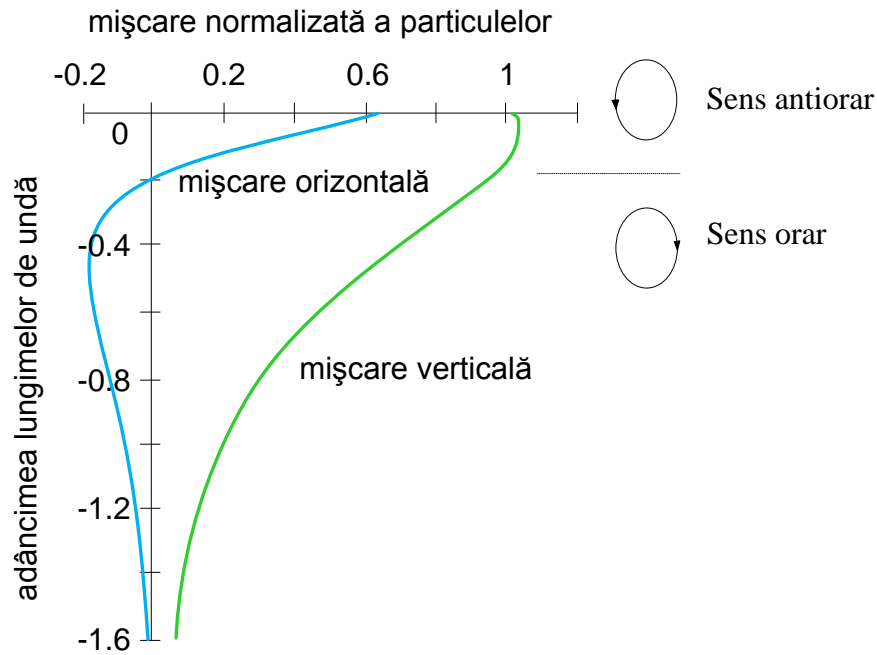


Figura 1.11. Mișcarea pe direcție orizontală și verticală a particulelor funcție de adâncime [24, 46]. Pe ambele axe dimensiunile sunt în metri.

În figura 1.12. ne demonstrează cum componenta dinamică a compactării este utilizată în cazul materialelor macro-granulare și ajută la creșterea densității în stare uscată a solului referitor la compactarea dinamică. Toate acestea sunt generate de rotația unor mase excentrice fiind montate în interiorul ruloului.

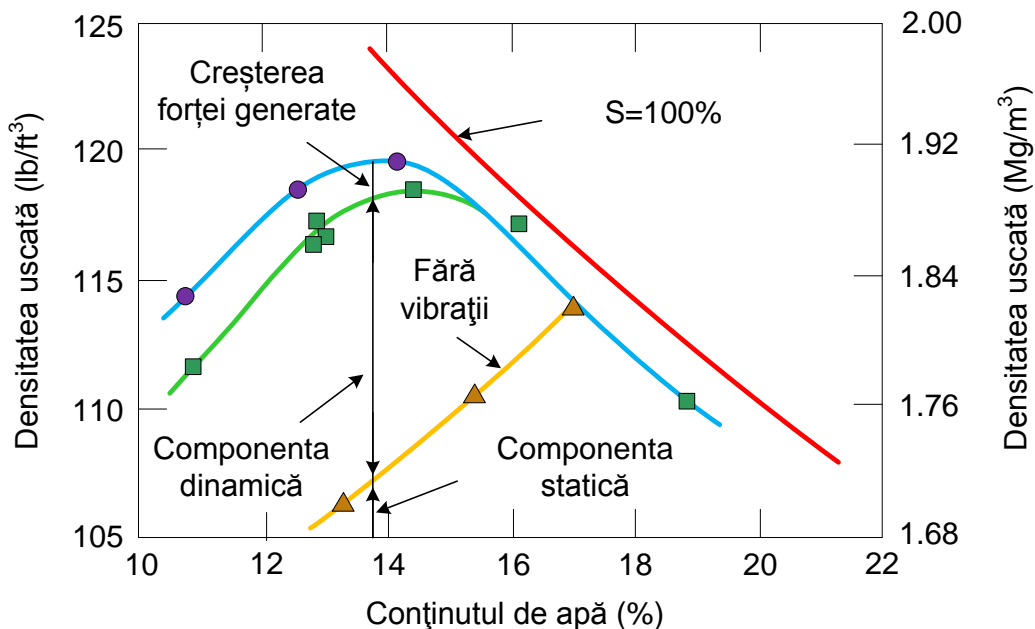


Figura 1.12. Curbe de compactare a solului compactat cu și fără efect dinamic [16, 17, 44, 46].

1.5. Modelarea pământurilor necoezive încărcate dinamic vertical

La modelarea pământului se ia în considerare faptul că în zona de contact între cilindru și sol apar efecte elasto-plastice, astfel la adâncime se dezvoltă o comportare elastică [25]. Folosind

procedeul suprapunerii efectelor, se consideră solul ca fiind compus din două substructuri, zonele plastică și elastică, modelate separat. La final rezultatele sunt suprapuse îndeplinind condițiile de compatibilitate.

Semispațiul este idealizat printr-un con elastic semi-infinit de înălțime ζ_0 , iar suprafața de contact dintre sol și cilindru este considerată ca o bază rigidă fără masă, de arie A_0 (Figura 1.13.).

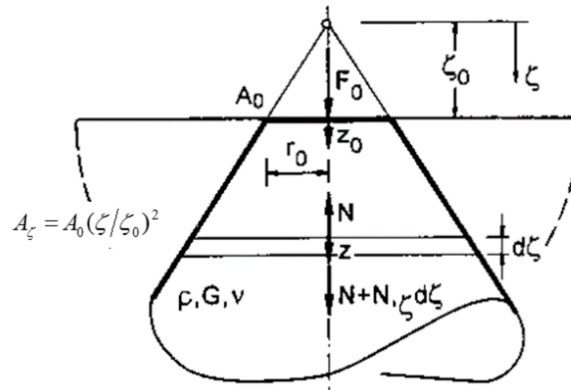


Figura 1.13. Modelul conului semi-infinit elastic

Dimensiunile suprafeței de încărcare corespund cu dimensiunile ariei rectangulare considerate ($a = a_0$, $b = b_0$ și deci $A = A_0$), iar, datorită echilibrului necesar la nivelul sol – cilindru, forța de contact este egală cu forța elastică de interacțiune ($F = F_0$). Deplasarea totală elasto-plastică a cilindrului z_d constă din deformațiile elastică z_0 și plastică z_p ale solului figura 1.14.

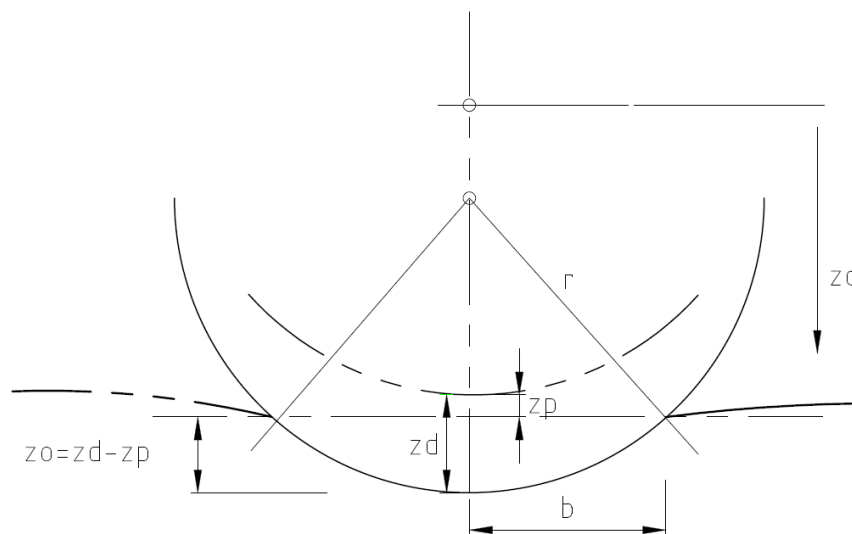


Figura 1.14. Deformația elasto-plastică a solului necoeziv sub impactul cilindrului

Relația dintre forța de contact și deformația plastică este dobândită prin utilizarea formulei dată de teoria capacității portante a fundațiilor pe teren. Astfel, capacitatea portantă este:

$$N_B = A\sigma_B \quad (1.2)$$

în care $A = 4ab$ este aria suprafeței de încărcare, iar

$$\sigma_B = cN_c s_c + \gamma_o t N_q s_q + \gamma 2b N_\gamma s_\gamma \quad (1.3)$$

este tensiunea de compresiune capabilă pe teren dată de formula Prandtl-Buisman,

unde c - coeziunea solului,

γ - greutatea specifică a solului,

γ_o - greutatea specifică a umpluturii laterale (eventuală),

t - grosimea umpluturii,

N_c , N_q și N_γ - factori ai capacității portante,
 s_c , s_q și s_γ coeficienți de formă).

Din această expresie observăm că echilibrul plastic se dezvoltă ca o relație lineară forță - deplasare. Deoarece pe parcursul fazei de descărcare (de ridicare a cilindrului) în sol au loc doar efecte elastice, relația 1.7 este valabilă numai pentru faza de încărcare (Figura 1.15. a).

În Figura 1.16. este prezentată comportarea elasto-plastică a solului încărcat de cilindrul vibrator. În conformitate cu teoria prezentată, deformațiile plastice sunt lineare (relația 1.7).

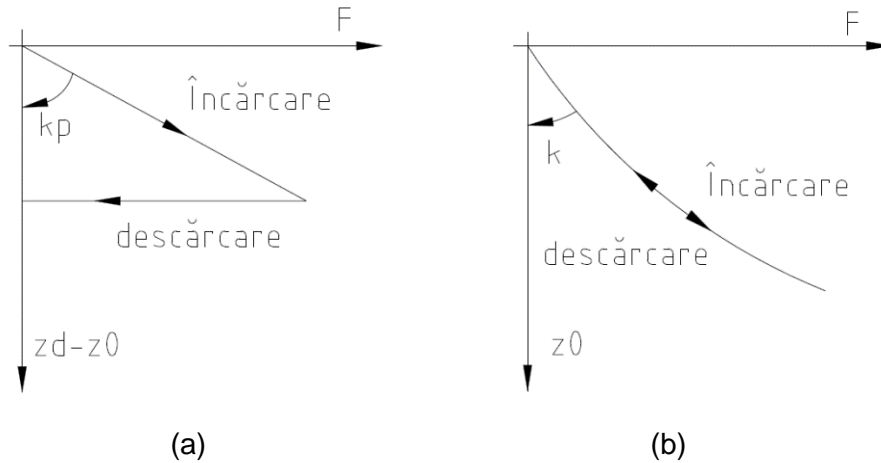


Figura 1.15. Relația forță - deplasare în cazul comportărilor plastice ideale (a) și elastice ideale (b)

Materialul compactat, cu ambele substructuri considerate în modelarea acestuia, și cilindrul excitat dinamic al cilindrului vibrator, sunt suprapuse respectând condițiile de compatibilitate. Luând în considerare că între sol și cilindru nu pot apare întinderi, trebuie luată în calcul pierderea contactului.

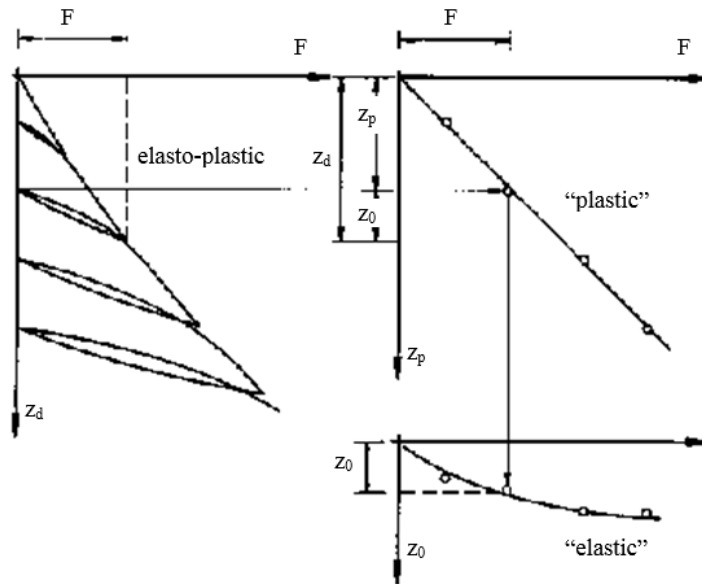


Figura 1.16. Stabilirea punctuală a deformațiilor plastice și elastice ale solului

Astfel, forma generală a relației de legătură dintre tensiune de tăiere și deformație specifică care apare în cazul unei sollicitări dinamice, reprezentată în figura 1.17. Un ciclu de încărcare se definește ca începând și sfârșind într-un același punct dat de o tensiune de tăiere maximă. O buclă, reprezentată printr-o revenire completă a tensiunii, este descrisă prin intermediul celor doi parametri G și D .

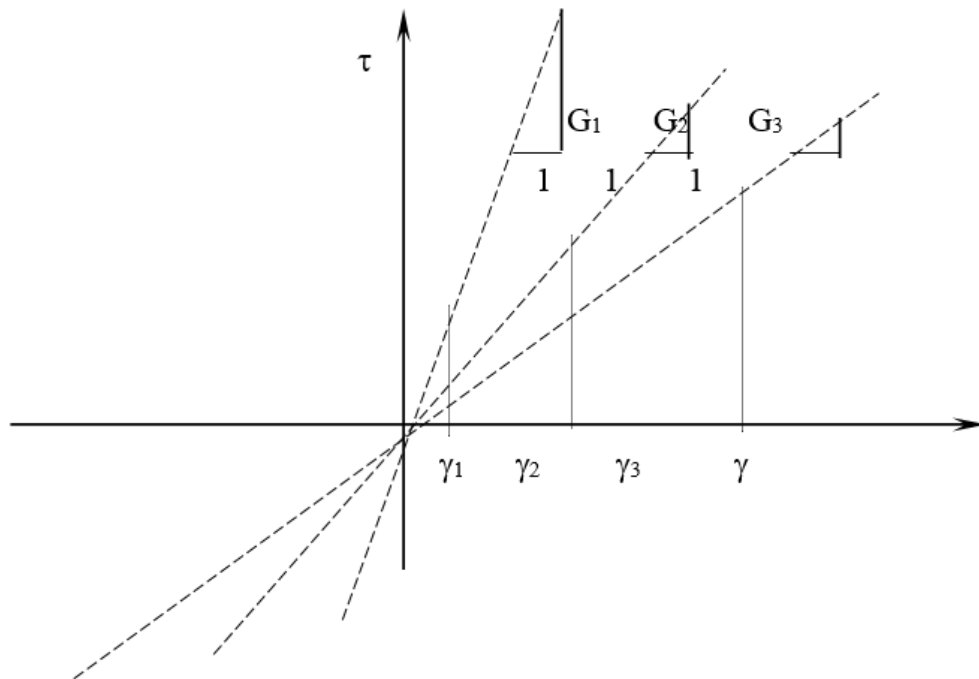


Figura 1.17. Relația tensiune tăietoare – deformație specifică pentru solicitarea dinamică

1.6. Oportunitatea și obiectivele tezei de doctorat

Astfel, conform analizei de oportunitate precum și a cerințelor ce fundamentează necesitatea acestor cercetări, **scopul** acestei teze de doctorat trebuie să accentueze următoarele:

- *aprecierea instrumentală și informațională a legităților structurale și funcționale care conduce la interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul compactat;*
- *verificarea parametrilor funcționali și păstrarea acestora în zona optimă.*
- *monitorizarea instrumentală și informațională.*

Luând în considerare necesitatea și oportunitatea acestei teze de doctorat, sunt stabilite următoarele **obiective principale**:

- evaluarea nivelului actual ale cercetărilor în domeniu;
- stabilirea modelelor reologice care prezintă baza teoretică pentru progresarea și fundamentarea caracteristicilor elastice, disipative și dinamica ansamblului structural și funcțional între teren-echipament;
- indicarea modelelor de interfață, prin crearea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative, în scopul optimizării, procesului de compactare;
- comportarea în regim static și în regim dinamic a modelelor reologice în ideea de a identifica și evidenția elementele de specificitate a interacțiunii organ de lucru și material procesat;
- corelații caracteristice ale mărimilor valorilor de laborator și a mărimilor obținute în teren „în situ” pentru agregate minerale, pământ natural și stabilizat ecologic;

CAPITOLUL II

Cerințele parametrice ale tehnologiei de compactare a pământurilor stabilizate

2.1 Generalități

Compactarea reprezintă un proces de îndesare a pământului (sau orice alt material de umplură), ca rezultat al utilizării echipamentelor tehnologice. În acest mod, prin aplicarea succesivă a forțelor de compresiune sau a sarcinilor dinamice pe suprafața terenurilor de fundație ori a straturilor puse în operă la lucrările de terasamente, care drept scop au redistribuirea particulelor solide cu eliminarea pe cât e posibil a aerului și apei din structura internă a terenului. [46]

Obiectivele compactării terenurilor sunt:

- a) în cazul pământurilor:
 - mărirea densității și a capacității portante a straturilor rutiere;
 - scăderea compresibilității și a permeabilității.
- b) în cazul mixturilor asfaltice:
 - mărirea densității;
 - mărirea stabilității;
 - mărirea rezistenței la uzură.

Funcție de modul cum este aplicată sarcina de compactare peste terenul analizat se deosebesc câteva metode de compactare:

- statică (prin cilindrare);
- dinamică (prin vibrație, impact, frământare).

În figura 2.1. sunt prezentate o gamă variată de utilaje de compactare care nu utilizează vibrațiile în procesul de lucru.



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

Conform analizei caracteristicilor tehnice ale compactoarelor vibratoare produse atât în țară, cât și pe plan internațional, deosebim câteva clase constructive, în principal, după tehnologia de lucru și natura terenului, în acest mod: [46]

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

2.2 Compactoare autopropulsate cu un singur rulou vibrator

Sistemul de vibrare cu forțe rotitoare este compus din axul ruloului, pe care se află amplasate simetric față de planul median și în fază mase excentrice, rezemarea în flansele laterale ale ruloului și sistemul de acționare.

Sistemul de vibrare cu forța unidirecțională este aplicată în două variante constructive și adică: cu vibrator inerțial cu două mase excentrice montate în fază, sincronizate cinematic, și cu vibrator pendular montat pe axul ruloului.

Pentru deplasare se folosesc, de obicei, sisteme hidrostactice cu *circuit închis* care oferă următoarele avantaje:

- comandă lentă și progresivă în ambele sensuri de deplasare (înainte/înapoi);
- posibilitatea mării turației pompei cu implicații favorabile asupra cantității mai scăzute de ulei vehiculat în circuit;
- frânare fără pierderi în circuit;
- dimensionarea mai economică a conductelor circuitului de forță.

Cu ajutorul *compactoarelor autopropulsate cu un singur rulou vibrator* putem efectua compactarea unei game variată de pământ. Unele din cele mai reprezentative exemple constructive de rulouri vibratoare sunt prezentate în Figura 2.2.



a)



b)

Figura 2.2. Utilaje de compactare autopropulsate cu un singur rulou vibrator:[1]***

a) rulou vibrator neted; b) rulou vibrator profilat (cu crampoane).

2.3 Compactoare cu două rulouri vibratoare

Cilindrii compactori vibrator tandem reprezentați în Figura 2.3. fiind larg utilizate la toate tipurile de lucrări și în special în cele de punere în operă a mixturilor asfaltice, unde execută o mare productivitate și o bună calitate a lucrărilor îndeplinite. [46]



a)



b)



c)



d)

Figura 2.3. Utilaje de compactare cu două rulouri vibratoare

a) model Catterpillar; b) model Bomag; c) model Hamm; d) model Ammann. [1, 2, 3, 4]***

Astfel, soluțiile constructive sunt corelate la nivelul tehnologiei de vârf și se caracterizează prin: [44, 46]

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

- control automat al frecvenței, vitezei de deplasare, comenzii vibratorului și determinării efectului de compactare (ca exemplu, sistemul inteligent de monitorizare a gradului de compactare Variocontrol, sistemul de conducere a procesului de compactare „Asfalt Manager”, cu control în regim real de timp și cu poziționare GPS, aplicații ale companiei Bomag);
- șasiu articulat, direcție hidrostatică integrală față-spate;
- echipament și dotări auxiliare: ruluu față secționat (compus din două semirulouri), echipat cu post comandă rotativ, cu dispozitiv de tăiere-teșire a marginilor și cu deplasare pe direcție transversală pe axa principală a mașinii. [46]

Vibrogeneratoarele concepute și construite de firma Hamm generează oscilații pe orizontală, care determină o alură a diagramei accelerației din Figura 2.4, îmbunătățind considerabil efectul de compactare prezentată în Figura 2.5, față de cazul vibrații [27, 46].

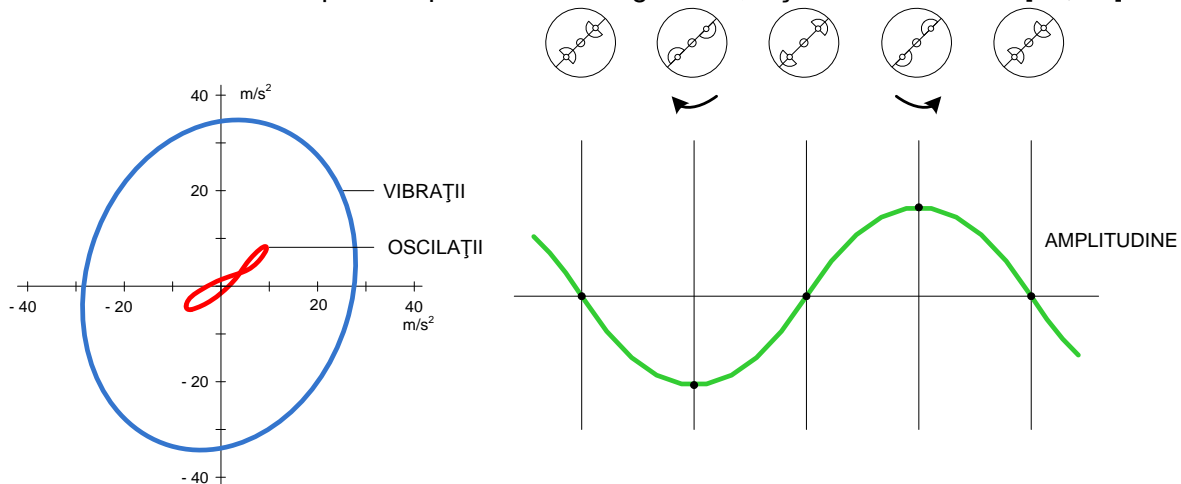


Figura 2.4. Oscilațiile produse de vibrogeneratoarele concepute de firma Hamm [27]

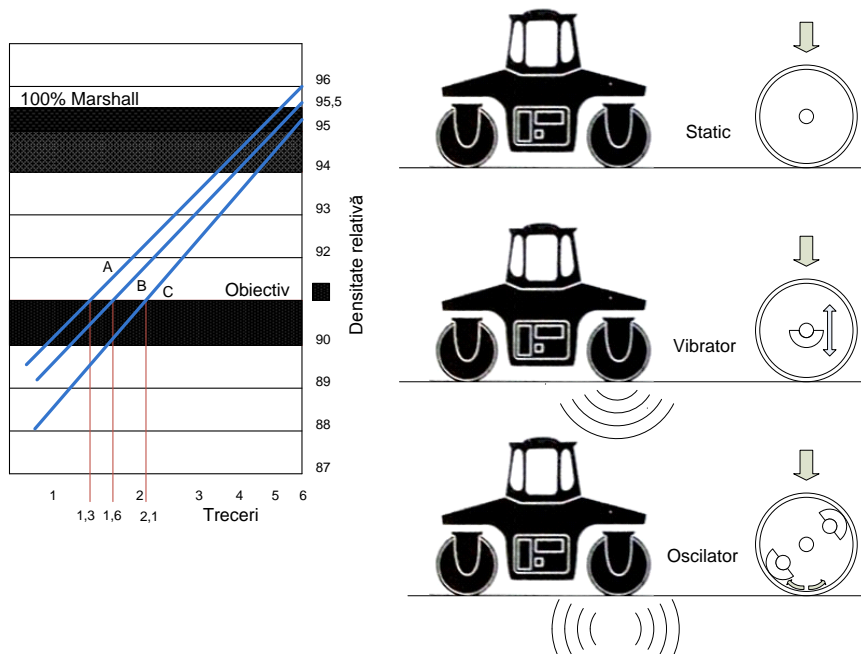


Figura 2.5. Influența oscilațiilor asupra efectului de compactare [27]

2.4 Caracteristici dinamice pentru compactoare vibratoare

Parametri principali tehnologici ce influențează asupra caracteristicilor dinamice și de vibrații ale utilajelor de compactare prin vibrație vor fi în continuare prezentate succint.

a) *Frecvența vibrațiilor* este factorul primar ce se stabilește atât funcție de tehnologia de compactare, la fel și funcție de implicațiile funcționale și constructive ale utilajului. Cercetările efectuate [30, 31, 32, 33, 46] în condițiile compactării diferitelor materiale arată că fiecărui sistem,

alcătuit din particule fine de minerale argiloase, hidroxizi de fier și aluminiu, silice coloidală, îi corespunde o frecvență proprie la care se obține cel mai ridicat efect de compactare.

Tabelul 2.1. Valorile recomandate pentru frecvența vibrațiilor la utilajele de compactat [27]

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

Regimul vibrațiilor tehnologice este caracterizat prin trepte dinamice stabile, cu funcționarea rulourilor vibratoare în postrezonanță prezentată în Figura. 2.8. astfel încât

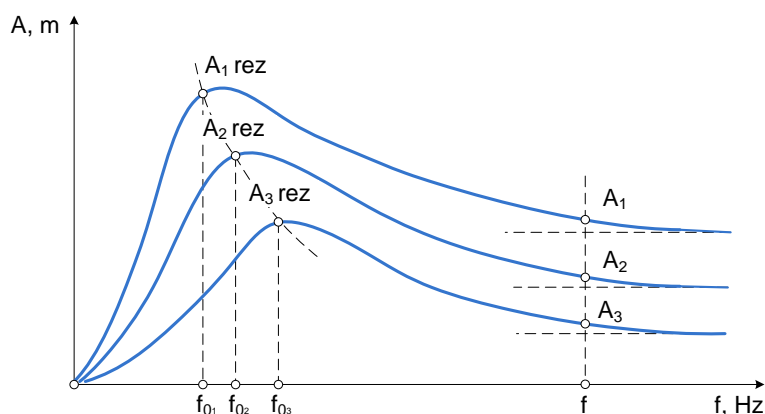


Figura 2.8. Regimul vibrațiilor tehnologice [44, 46]

b) Un factor care influențează asupra adâncimii de compactare este *amplitudinea vibrațiilor*. Astfel, pentru diferite categorii de pământ se recomandă valorile din în tabelul 2.2. [46]

Tabelul 2.2. Valorile recomandate pentru amplitudinea vibrațiilor de lucru la compactoare

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

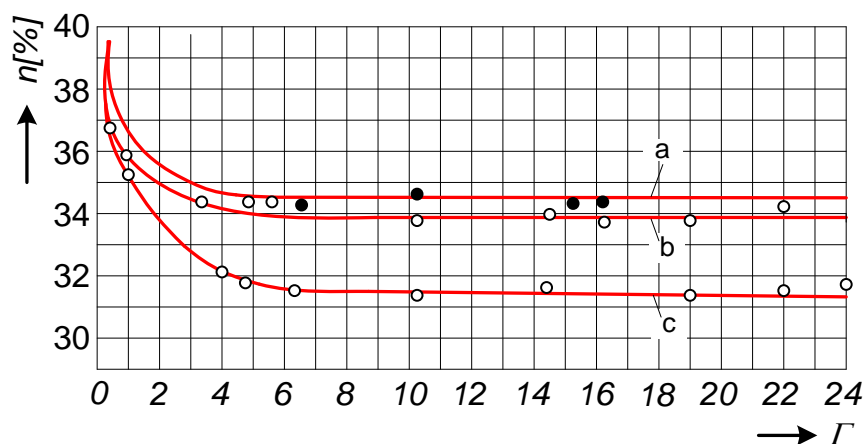


Figura 2.9. Variația porozității funcției de raportul accelerațiilor corelat cu granulozitatea pământului a, b, c. [34]

c) *Acceleerația vibrațiilor.* Pentru vibrații armonice, acceleerația maximă a organului de compactare, dată de relația $A\omega^2$, are o influență decisivă asupra modificării porozității.

Deci, în Figura 2.9. este ilustrată variația porozității funcție de raportul acceleerațiilor $\Gamma = A\omega^2/g$ pentru trei pământuri de aceeași natură dar cu granulometrii diferite. Constatăm că de la valoarea $\Gamma = 5 \dots 7$ în sus, gradul de porozitate se menține constant. Prin urmare, în vederea unei proiectări raționale, se recomandă ca raportul $\Gamma \in 5 \dots 7$. [44, 46]

d) *Forța perturbatoare* reprezintă factorul dinamic fundamental, pentru utilajul de compactare prin vibrație, fiindcă pe dintr-o parte aceasta caracterizează mărimea amplitudinii, iar pe de altă parte, presiunea dinamică în teren și regimul de compactare (vibrații sau vibropercuții) la zona de contact între ruloul vibrator și mediul de compactat.

e) *Viteza de deplasare și numărul de treceri* constituie parametri tehnologici cu ponderea cea mai mare în determinarea productivității.

$$v = 0,2\sqrt{f} \text{ [km/h]}, \quad (2.1)$$

unde f este frecvența vibrațiilor, în Hz.

Pentru realizarea unui proces de compactare corespunzător este indicat să ținem cont de câteva corelații între următorii parametri tehnologici, constructivi și funcționali ai echipamentelor de compactat:

a) *Efortul unitar de compresiune în procesul de compactare*

În cazul compactării prin acțiune statică, efortul unitar maxim se determină cu relația:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{qE_{st}}{R}} \leq 0,9\sigma_r, \quad (2.2)$$

unde q - este încărcarea specifică liniară a ruloului;

E_{st} – modulul de deformare al pământului;

R – raza ruloului; σ_r - rezistența la rupere a stratului de compactat.

În figura 2.10. sunt prezentate distribuțiile efortului de compresiune sub pneurile unui compactor, în timpul desfășurării procesului de lucru.

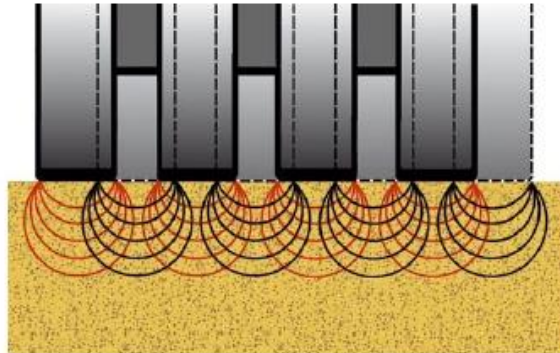


Figura 2.10. Distribuția pe adâncime a efortului de compresiune sub pneurile compactorului

b) *Adâncimea de compactare*

c) *Numărul de treceri*

d) *Încărcarea specifică liniară*

Concluzionând procesul de compactare poate fi afectat de următorii factori variabili:

- pentru soluri necoezive:

a) categoria solului și coeficientul de neuniformitate;

b) conținutul de apă;

c) mărimea efortului de compactare;

d) grosimea stratului care trebuie compactat;

- e) caracteristicile tehnico-funcționale ale echipamentului de compactare.
- pentru soluri coezive:
 - a) textura solului inclusiv conținutul de argilă și plasticitatea;
 - b) conținutul de apă și gradul de saturație;
 - c) mărimea efortului de compactare;
 - d) grosimea stratului care trebuie compactat;
 - e) caracteristicile tehnico-funcționale ale echipamentului de compactare.

Această categorie de mașini pentru teresamente, în mod deosebit, se impune a fi satisfăcut un criteriu specific, fundamental, care înglobează două aspecte contradictorii și anume:

- realizarea parametrilor vibrațiilor de lucru la ruloul vibrator pentru compactare;
- încadrarea parametrilor de vibrații în limitele admisibile la postul de lucru al mecanicului, în scopul asigurării parametrilor ergonomici și, în același timp, al menținerii parametrilor caracteristici siguranței de funcționare.

Spre deosebire de aceste deziderate structura mașinilor de compactat prin vibrație a cunoscut o evoluție explozivă materializată prin realizarea unor mașini cu performanțe operaționale ridicate. Pe această temă se subliniază câteva elemente constructive după cum urmează:

- șasiul este articulat la mijloc, cu părțile componente echilibrate pe cele două axe (față/spate);
- tracțiunea se realizează fie numai pe puntea din spate, fie total pe ambele punți;
- acțiunea vibroexcitatorului inerțial și a sistemului de deplasare se realizează integral hidrostatic.
- vibroexcitatorul este de tip inerțial cu forță perturbatoare unidirecțională sau rotitoare;

2.5. Capabilitatea tehnologică

Capabilitatea tehnologică a noilor echipamente de compactare exprimă nivelul de performanță tehnică exprimat de parametrii constructivi și funcționali ce au rol determinant în calitatea și eficiența procesului de compactare. [46]

Așadar, capabilitatea tehnologică poate fi determinată prin nivelurile de performanță ale parametrilor constructivi, parametrilor funcționali și parametrilor capacității de lucru.

a) Parametrii constructivi

Din această categorie de parametri constructivi care au influență directă asupra tehnologiilor de compactare fac parte următorii:

- parametri geometrici:
 - diametrul ruloului/pneului;
 - lățimea ruloului/pneului;
 - distanța dintre axe (ampatamentul);
 - razele de viraj;
 - garda la sol;
 - dimensiunile de gabarit (înălțime, lungime, lățime);
 - suprafața plăcii/maului;
- parametri gravimetrici:
 - greutatea totală;
 - greutatea repartizată la nivelul suprafeței de sprijin pe organele de compactare și/sau rulare (sprijinire/deplasare). [46]

b) Parametrii funcționali

Din această categorie de parametri funcționali ai echipamentului de compactare cu influență directă asupra calității compactării mixturii asfaltice sunt:

- viteza de deplasare în timpul compactării;
- încărcarea statică liniară la contactul rulou-suprafață de compactare;
- regimul vibrațiilor tehnologice.
- factorul de apăsare tehnologică (factorul Nijboer);

c) Parametrii capacității de lucru

CAPITOLUL III

Analiza dinamică a interacțiunii rulou vibrator-teren pentru pământuri

3.1. Generalități

Sistemele mecanice au în structura lor elemente de mișcare, corpuri rigide, elastice și articulații. Ceea ce privește de elementele de mișcare acestea sunt materializate prin corpuri care au diferite configurații geometrice și care sunt legate unele față de altele prin articulații. Astfel, rolul articulațiilor este unul de a efectua posibilitatea mișcării elementelor sau de a impune restricții sau constrângeri ale mișcărilor relative ale elementelor componente ale sistemului mecanic. [46]

3.2. Metode de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrație

Pentru efectuarea procesului de compactare a pământurilor se folosesc procedee dinamice de rulare-comprimare. Prin contactul dintre un rulou cilindric și suprafața pământului se transmite un câmp staționar de vibrații armonice care au misiunea de a produce efectul de undă pe întreaga adâncime a stratului. [45].

Prin urmare sau analizat modelele vâscoelastice Maxwell, Voigt-Kelvin, Voigt-Kelvin-Hooke, Zener, Voigt-Kelvin-Newton și Voigt-Kelvin-Hooke-Newton, care în careva condiții dau informații foarte precise ale comportării în timp real al terenului.

3.2.1. Modelul Voigt-Kelvin (E/V)

Excitația cinematică de tipul $x(t) = A_0 \sin \omega t$ face ca sistemul să transfere energie la bază, anume să ducă la un răspuns dinamic în legături care este reprezentat prin forța vâscoasă $Q(t) = c\dot{x} + kx$. [45]

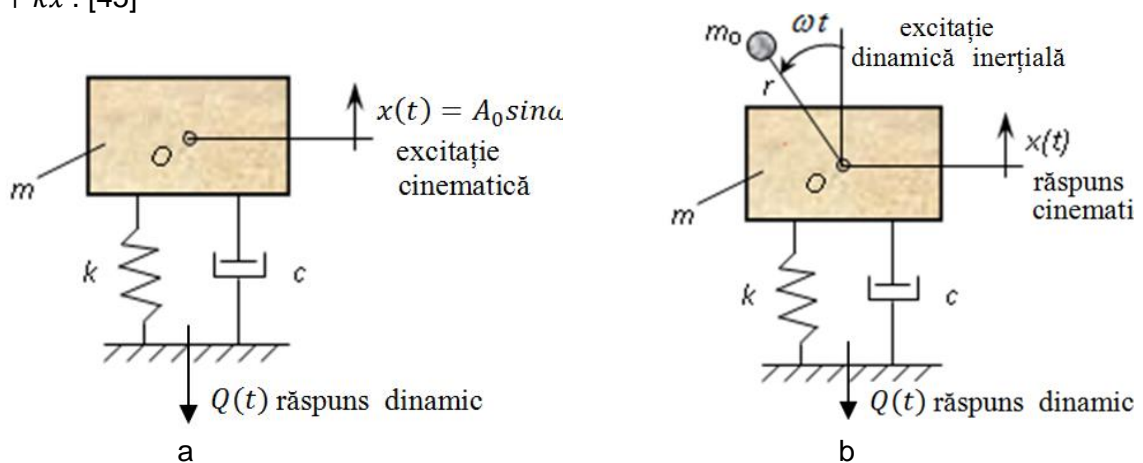


Figura 3.1. Modelul Voigt-Kelvin [45]

3.2.1.1. Răspunsul sistemului E/V la excitația dinamică inerțială armonică

Astfel pot fi determinate următoarele etape de analiză [41, 45, 129]:

a) excitația de tip inerțial în mișcare de rotație a masei m_0 cu raza r și viteza unghiulară ω , este arătată prin funcția de forță armonică, după cum urmează:

$$F(t) = m_0 r \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

b) răspunsul la deplasare instantanee este de forma $x(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$, dar forța de reacție este $Q(t) = Q_0 \sin(\omega t - \varphi - \theta)$.

c) ecuația diferențială de echilibru dinamic are următoarea formă:

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

3.2.2. Modelul Maxwell (E-V)

Comportarea fizică liniară a terenului este descrisă de modelul dat. Este schematizat prin legarea în serie a unui element elastic cu un element vâcos. În figura 3.2.a se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.2.b este modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

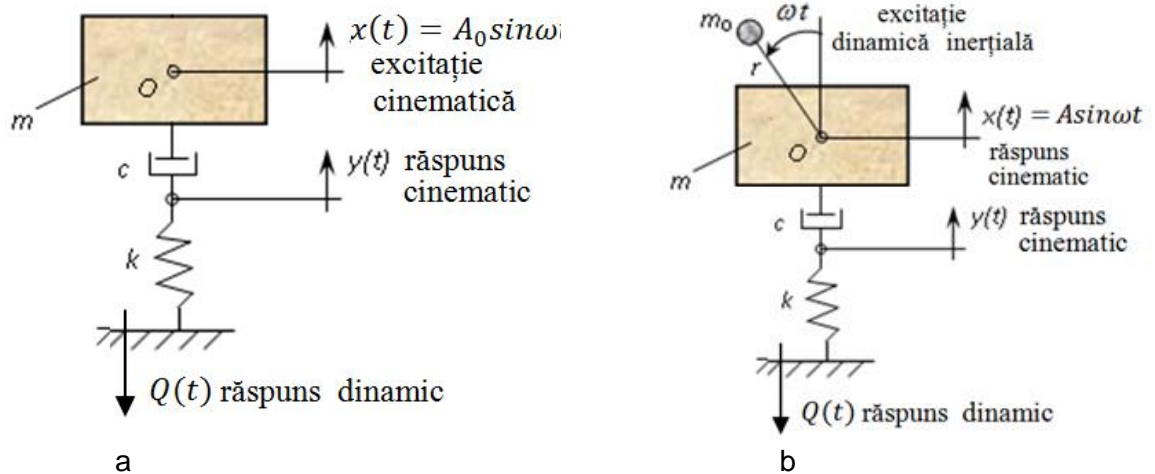


Figura 3.2. Modelul Maxwell [45]

3.2.2.1. Răspunsul sistemului E-V la excitația dinamică inerțială armonică

3.2.3. Modelul Zener E/(E-V) și răspunsul sistemului E/(E-V) la excitația dinamică inerțială armonică

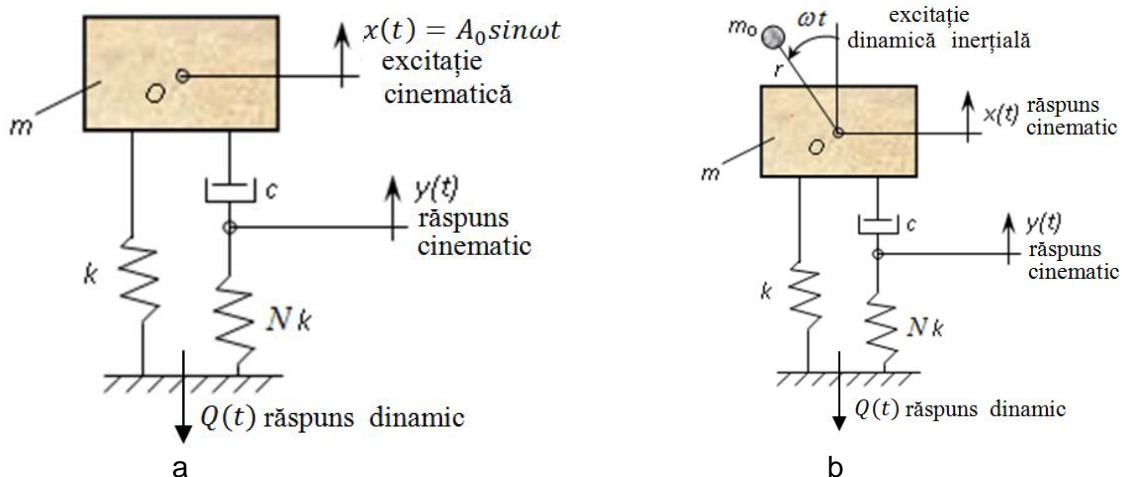


Figura 3.3. Modelul Zener [45]

3.2.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke E - (E/V) și răspunsul sistemului E-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică

Model dat este schematizat printr-un sistem cu deformare preponderent elastică. Este alcătuit prin legarea în serie a unui element multiplu elastic cu un ansamblu format dintr-un

element elastic cuplat cu unul vâscos. În figura 3.4.a se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.4.b modelul cu excitație dinamică, model care este studiat [40, 45, 129].

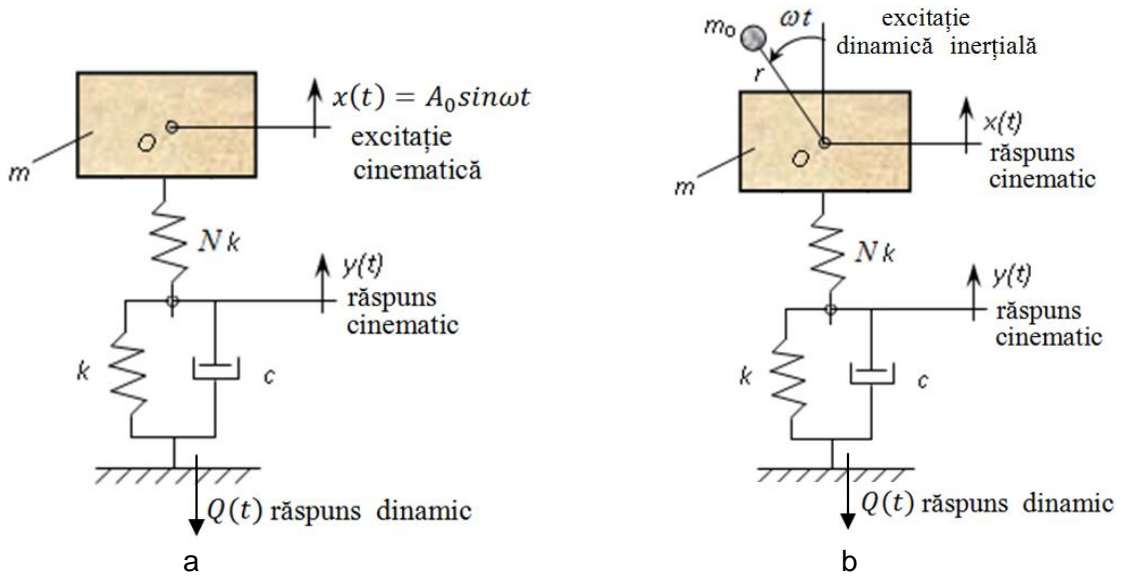


Figura 3.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke [45]

3.2.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton V - (E/V) și răspunsul sistemului V-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică

Schematizarea liniară din figura 3.5.b demonstrează faptul că la excitația dinamică cu forță perturbatoare rotitoare $F_0 = m_0 r \omega^2$ răspunsul sistemului constă în $x(t)$ și $y(t)$ ca mărimi cinematice (deplasări) instantanee și o mărime dinamică instantanee $Q(t)$ ca forță de reacție la bază, anume la contactul vibrator-teren. [45]

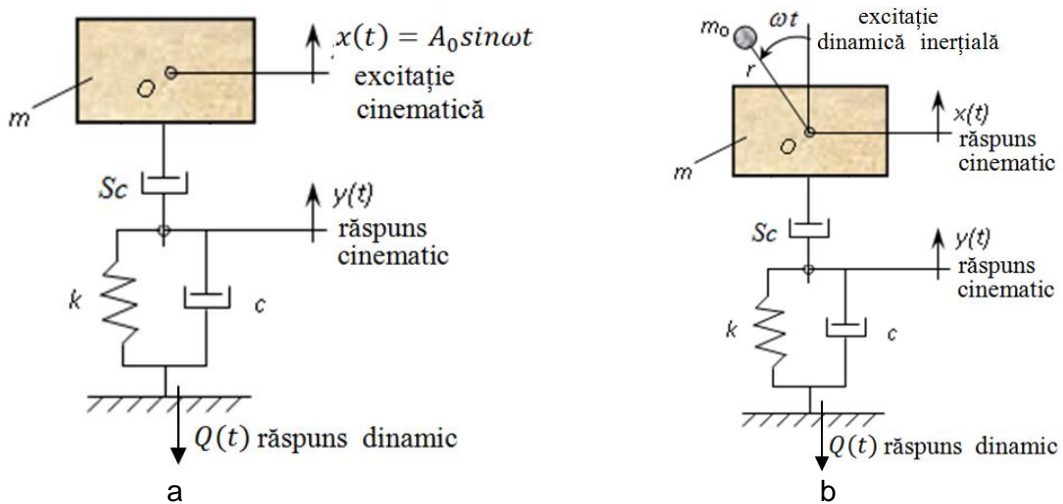


Figura 3.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton [45]

3.2.6. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton (E-V) - (E/V) și răspunsul sistemului (E-V) - (E/V) la excitația dinamică inerțială armonică

Modelul dat este un model liniar cu deformație vâscosă. Este alcătuit prin legarea în serie a trei elemente: un element vâscos, un element elastic și un ansamblu de element elastic legat în paralel cu un element vâscos. În figura 3.6.a se argumentează reprezentarea simbolică a

modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.6.b modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

3.3 Mișcarea vibratorii a ansamblului vibrator-teren

Studiul dinamic al utilajelor de compactat prin vibrare se formulează în condițiile acceptării ipotezei comportării liniare elastice și de amortizare cu excitație inerțială armonică. Astfel, rezultatele sunt suficient de exacte pentru a recepționa răspunsuri utile în majoritatea cazurilor, erorile fiind destul de mici [40, 45]. Teoria dată este necesară pentru determinările preliminare a unor parametri constructivi și funcționali ai organului de lucru.

În așa mod vom adopta următoarele ipoteze de calcul asupra comportării dinamice a ansamblului vibrator-teren [42, 45]:

- pământul, ca mediu reologic în general este reprezentat de modelul compus Voigt E/V, iar în afara zonei de rezonanță de modelul simplu Hooke E;
- modelul dinamic al sistemului vibrator-teren nu ține seama de masa pământului (se neglijează proprietățile inerțiale ale pământului);
- sistemul cu două mase execută numai mișcări verticale, într-un singur plan și pe direcție verticală;
- organul de lucru ce execută compactarea (placă, rulou) rămâne tot timpul orizontal (vibrațiile de rotații se neglijează);
- generatorul de vibrații unidirecționale este amplasat în așa mod, încât forța perturbatoare ce acționează pe verticală trece prin centrul de greutate al organului compactor (placă, rulou) care se află pe axa ei de simetrie [37, 45];
- axele de rotație ale excentricelor au deplasări mici, așa încât nu se iau în considerare (forțele de inerție care apar datorită deplasărilor cu valori mici).

3.3.1. Vibrațiile de translație verticală, răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastic

Amplitudinile mișcării vibratorii [41, 45], în cazul modelului dinamic al pământului, schematizat după Voigt-Kelvin E/V potrivit Figura 3.7 vor fi determinate în regim stabil de excitație dinamică inerțială cu $P_0 = m_0 r \omega^2$ și armonică cu $P = P_0 \cos \omega t$.

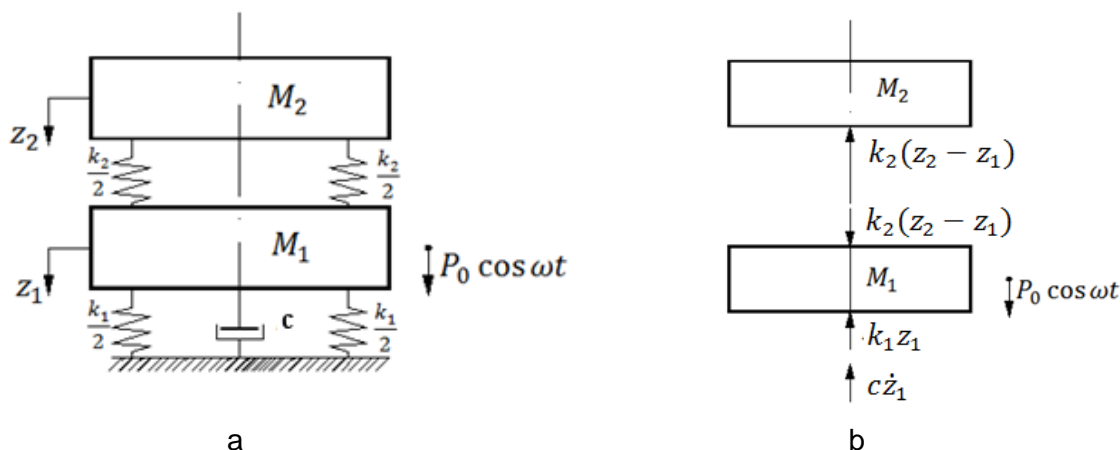


Figura 3.7. Modelul mecanic al ansamblului vibrator-teren cu două mase de vibrare, a) Modelul dinamic; b) Schema de forțe în regim de echilibru dinamic instantaneu [41,45]

3.3.2. Răspunsul dinamic pentru modelul elastic

Amplitudinea mișcării vibratorii, în cazul modelului dinamic al pământului, Hooke (E) schematizat în figura 3.8. se caracterizează similar cu abordarea anterioară [41, 45].

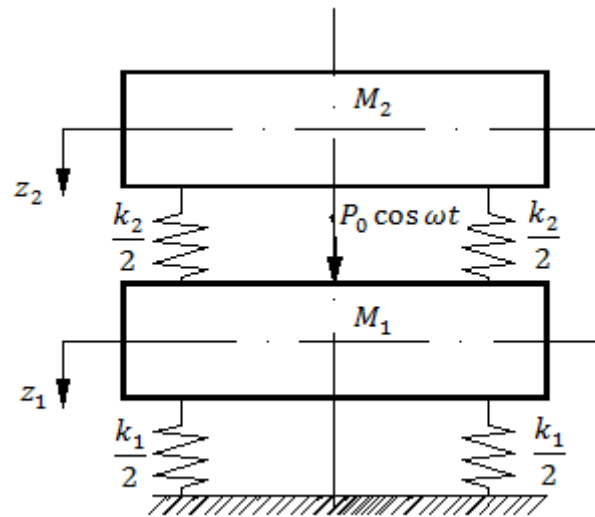


Figura 3.8. Modelul mecanic idealizat al ansamblului vibrator-teren cu două mase în vibrație [41, 45]

3.3.3. Răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastoplastic

Amplitudinea mișcării vibratorii, în cazul modelului dinamic al pământului, ca fiind vâscoelastoplastic de tip VI(E-P) se caracterizează prin regim stabil de lucru [41, 45] (Figura 3.10.).

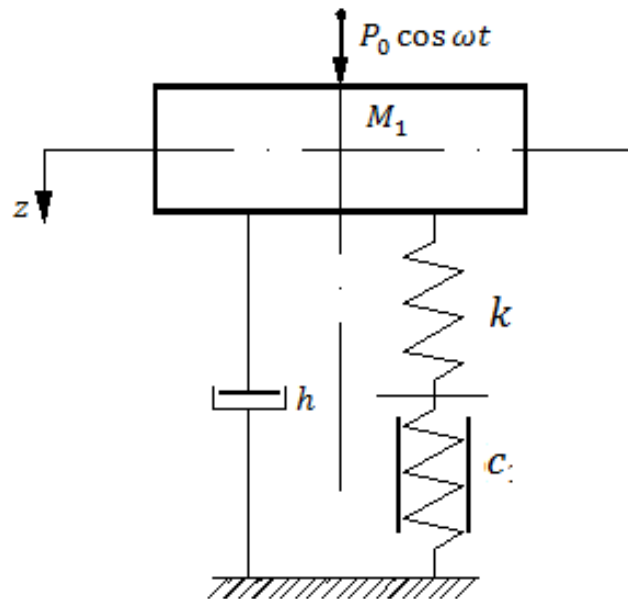


Figura 3.10. Modelul dinamic al ansamblului vibrator-teren cu o singură masă de vibrație, iar pământul modelat VI(E-P) [41, 45]

3.3.4. Răspunsul dinamic pentru modelul elastoplastic E-P

Amplitudinile mișcării vibratorii, în cazul modelului compus E-P [41, 45], se va preciza pentru modelul ansamblului vibrator-teren cu două mase în vibrație și care funcționează în afara zonei de rezonanță, astfel influența amortizării este neglijabilă, adică $h = 0$, valoarea amplitudinii masei M_1 se va obține dacă în expresia (3.42) se va schimba pe k_e cu valoarea sa din (3.48), așadar avem:

$$A_1 = \frac{P_0 \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2 \right)}{\left(\frac{k \cdot c}{k + c} + k_2 - M_1 \omega^2 \right) \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2 \right) - \frac{k_2^2}{M_2}} \quad (3.51)$$

3.3.5. Răspunsul dinamic pentru sistemul cu o masă

a) Modelul reologic E-P

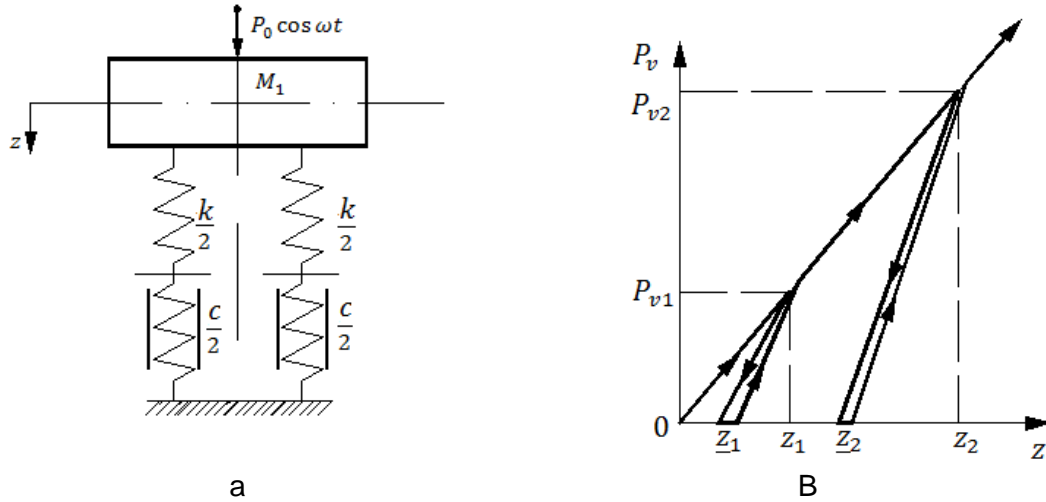


Figura 3.11. Model dinamic al ansamblului vibrogenerator-pământ cu o singură masă în vibrație unde pământul este modelat E-P. a) reprezentarea simbolică; b) curba caracteristică de deformare liniară a pământului [41, 45]

b) Modelul reologic V/E-P

3.4. Vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale

3.4.1. Modelul dinamic al sistemului compactor vibrator-teren

3.4.2. pulsațiile proprii ale ansamblului compactor vibrator-teren

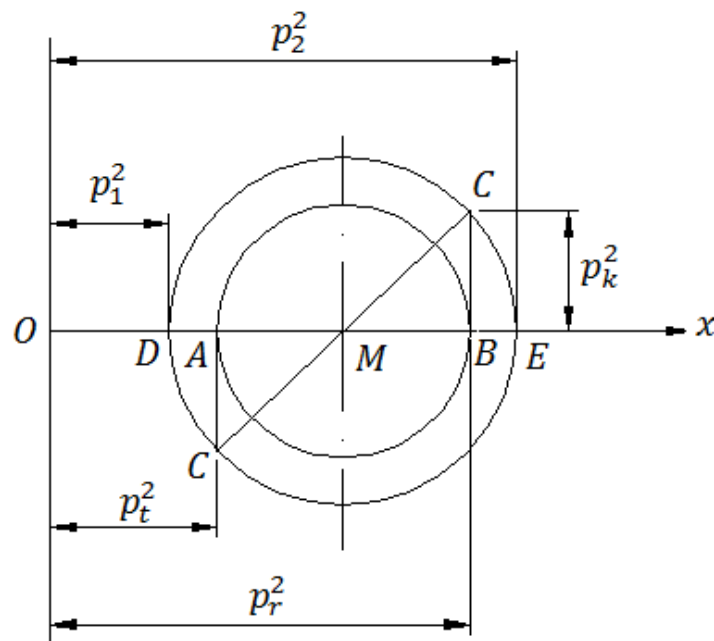


Figura 3.14. Reprezentarea grafică a pulsațiilor proprii similar „cercului Mohr” [39, 45]

CAPITOLUL IV

Analiza parametrilor de contact rulou compactor-pământ

Efectul contactului rulou-pământ are la bază acțiunea eficientă a utilajului permanent. Aceasta impune ca procesul de compactare să se finalizeze înainte ca valoarea de prag pentru rigiditatea pământului să fie atinsă și anume, să nu se producă funcționarea utilajului cu desprindere de teren.

4.1. Modulul static de deformare liniară a pământului

Determinările experimentale pentru stabilirea modului static de deformare liniară E_{st} a pământului și a densității sale în stare uscată ρ_d au sesizat existența unei corelații între valorile acestor doi parametri caracteristici ai acestuia. Tipurile principale de terenuri de fundare, cu umidități corespunzătoare, W des întâlnite sunt: [46]

- nisip, pământuri necoezive: $W = (5...12)\%$;
- pământuri slab coezive: $W = (12...15)\%$;
- balast.

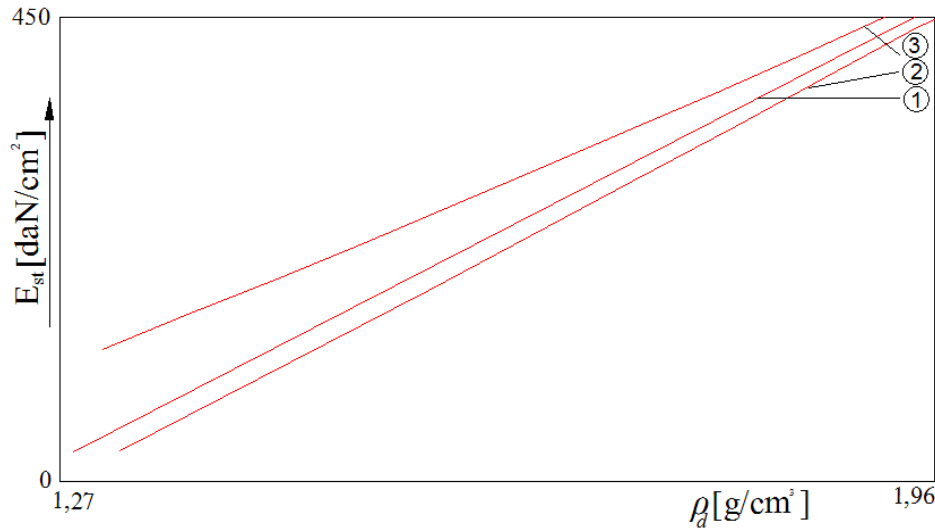


Figura 4.1. Dependența modului static de deformare liniară funcție de densitatea în stare uscată și anume 1. pentru nisip, pământuri necoezive; 2. pentru pământuri slab coezive; 3. balast.

4.2. Lățimea amprente de contact dintre rulou și teren, în dependență de densitatea în stare uscată a pământului

Determinările experimentale au stabilit că lățimea b^* a amprentei ruloului la contactul cu pământul se înscrie în domeniul de valori:

$$b^* = (0,1 \dots 0,2)D_r, \quad (4.6)$$

4.3. Grosimea optimă a stratului de pământ compactat

Pe baza interpolărilor liniare se pot stabili relații de interdependență între parametrii specifici procesului de compactare, și anume sub forma:

$$h_c = 0,667(1 - D_c)b^* [\text{cm}], \quad (4.10)$$

$$h_c = 4,44(1 - D_c)^2 D_r \text{ [cm]}, \quad (4.11)$$

$$h_c = 4,44(1 - \rho_d / \rho_{d \max})^2 D_r \text{ [cm]}. \quad (4.12)$$

4.4. Tasarea stratului de pământ

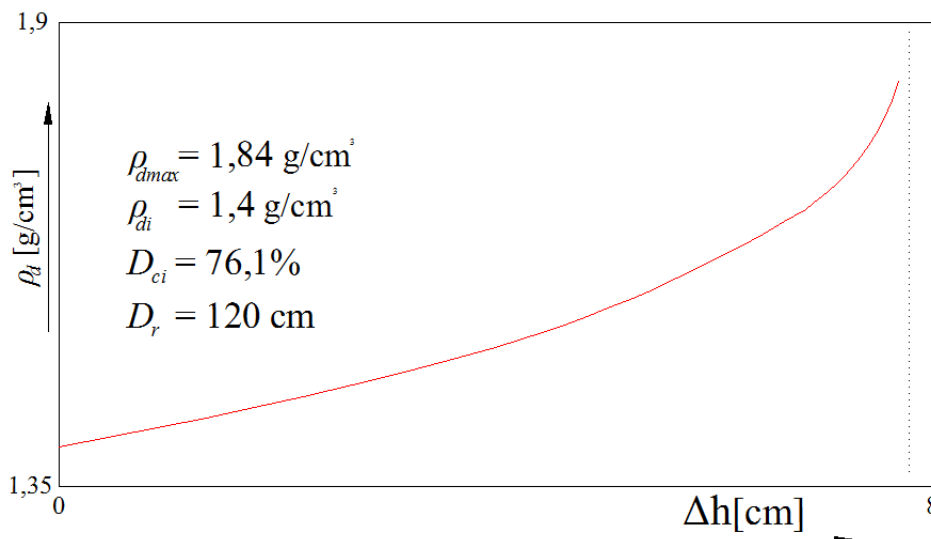


Figura 4.2. Dependența densității în stare uscată funcție de tasarea pământului

Prin tasare se obține o densitate maximă fie prin creștere (de la pământuri afânate) fie prin descreștere (de la blocuri compacte), ceea ce arată că starea compactată este o valoare limită pentru o anumită structură.

4.5. Modulul static de deformație liniară funcție de tasarea terenului

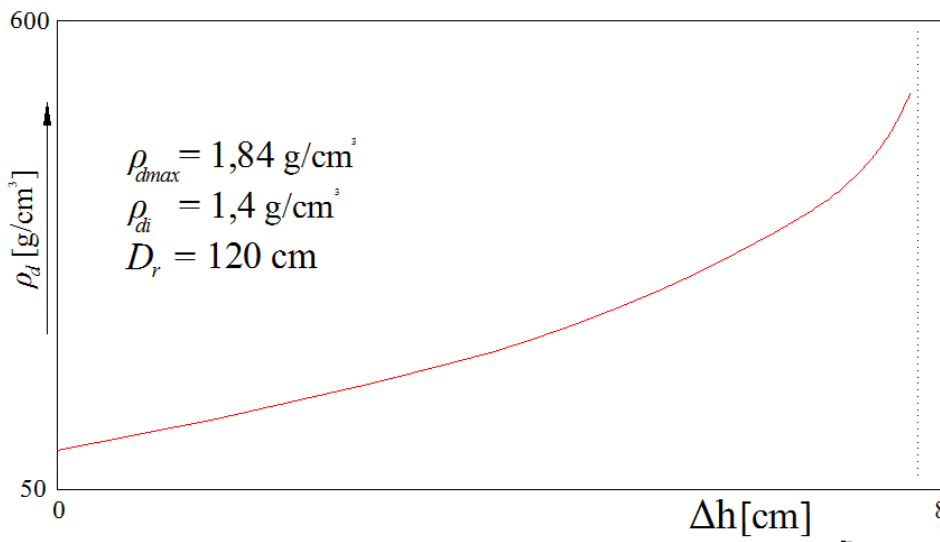


Figura 4.4. Dependența modului static de deformație funcție de tasare, pentru un model de pământ slab coeziv [46]

4.6. Coeficientul de rigiditate funcție de tasarea terenului

În diagrama din Figura 4.5. este prezentată dependența coeficientului de rigiditate a terenului funcție de tasarea Δh , trasată pe baza relației (4.29) dezvoltată pentru pământuri slab coezive, în cazul pământului particular din categoria pământurilor slab coezive, definit anterior.

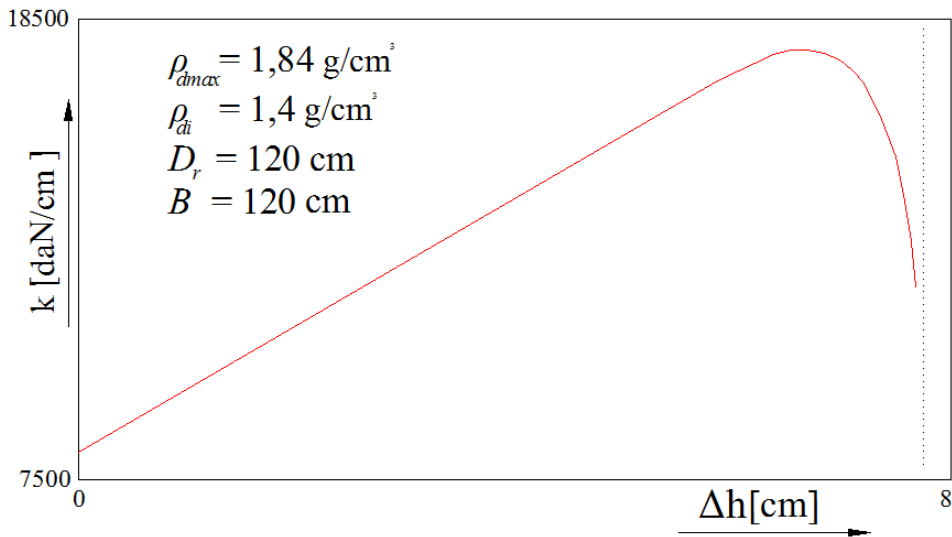


Figura 4.5. Dependenta coeficientului de rigiditate functie de tasare (pentru un pământ slab coeziv) [46]

4.7. Forța de rezistență a terenului functie de tasarea acestuia

În diagrama din Figura 4.6. este dată variația forței elastice de rezistență la compactarea terenului, în functie de tasarea Δh , trasată pe baza relației (4.30) dezvoltată pentru pământuri slab coezive, în cazul pământului particular din categoria pământurilor slab coezive.

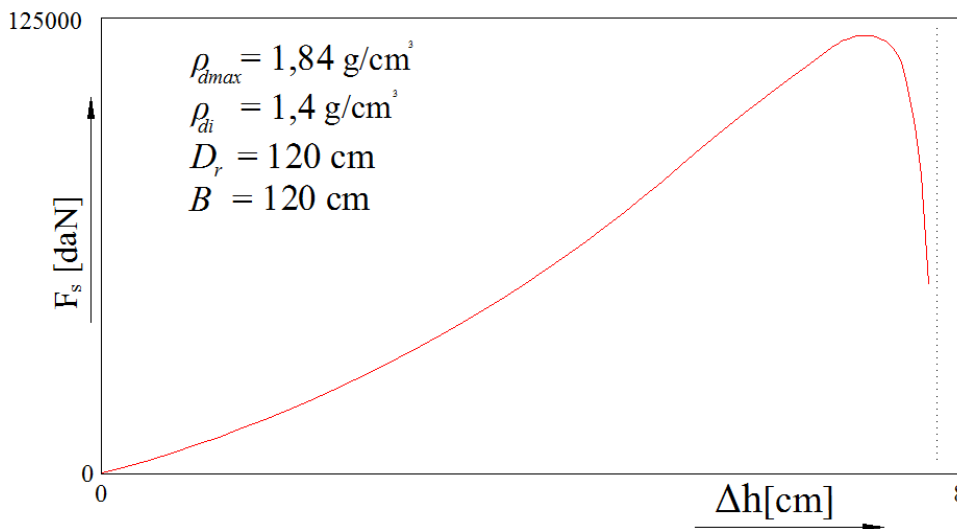


Figura 4.6. Dependenta forței elastice de rezistență la compactare functie de tasare. (model de pământ slab coeziv)

Diagrama relevă, de asemenea, comportarea neliniară a pământului, în cadrul procesului de compactare în ansamblu. [46]

Curba $F_s - \Delta h$ din figura 4.6 poate fi interpretată ca reprezentând rezerva de capacitate portantă a terenului corespunzător tasării efectuate la un moment dat în procesul de compactare. [46]

4.8. Efortul unitar (tensiuni) axial de compactare functie de tasarea terenului

Efortul unitar (tensiuni) axial σ_c evoluat în teren de acțiunea dinamică a utilajului de compactat, însumă atât efectul direct al acțiunii utilajului asupra terenului, la fel și reacțiunea terenului supus compactării asupra utilajului. Astfel, se poate afirma cu certitudine că acest parametru reflectă interacțiunea dintre compactor și teren în procesul tehnologic și că

monitorizarea lui este un indiciu important în cunoașterea stadiului procesului de compactare. [46]

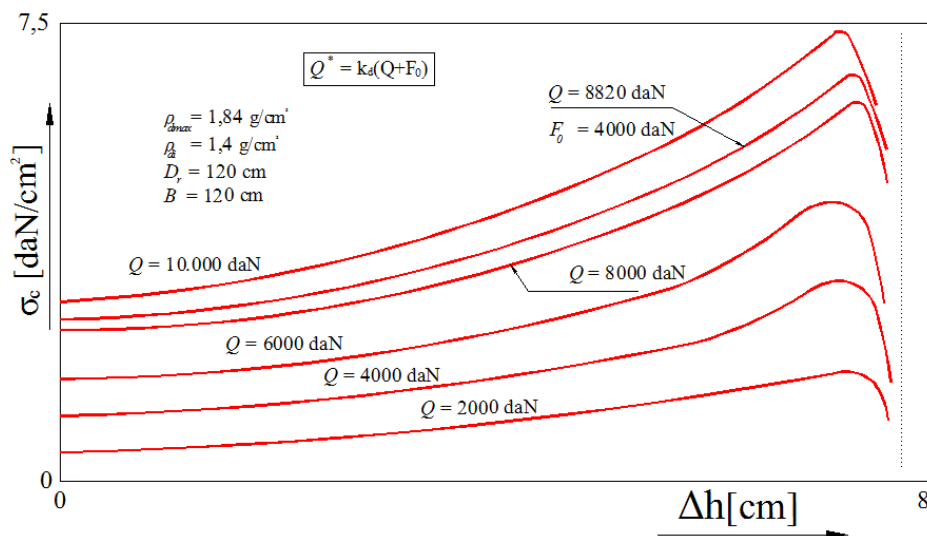


Figura 4.7. Dependenta efortului unitar axial de compactare cu tasarea, pentru un model de pamant slab coeziv [46]

4.9. Parametri esențiali implicați în procesul de interacțiune vibrator-teren

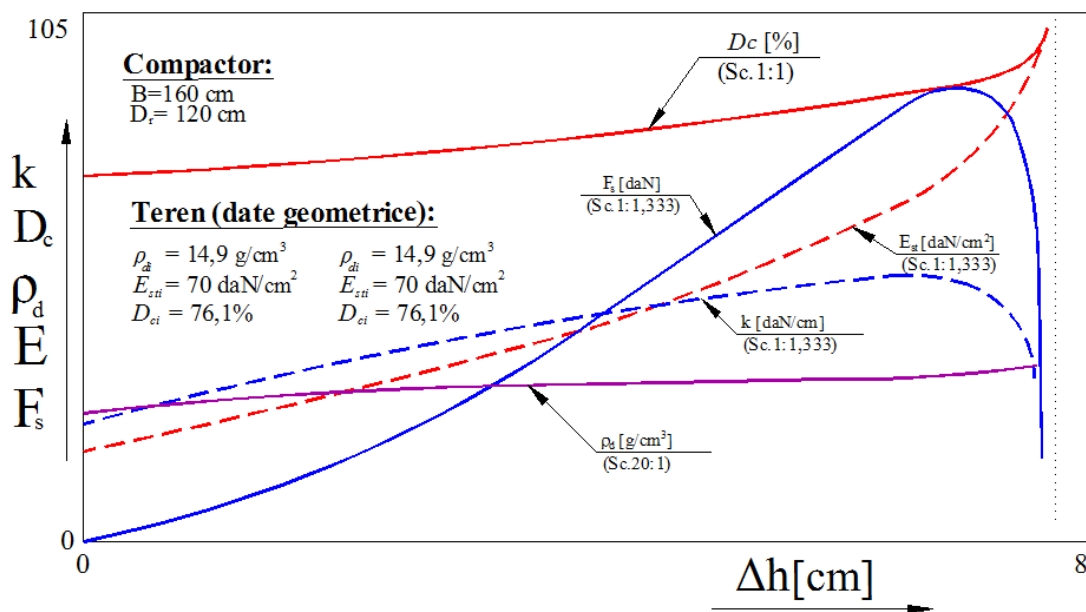


Figura 4.8. Dependenta globala a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor-teren functie de tasare, pentru un model de pamant slab coeziv [46]

Astfel se poate urmări evoluția performanței și eficienței tehnologice a procesului de compactare a terenului reflectate prin evoluția gradului de compactare, a densității în stare uscată și a modului static de deformație liniară a pământului. [46]

Coeficientul de rigiditate al terenului reprezintă, în cadrul modelului de comportament al terenului, elementul prin care se materializează reacția de răspuns a terenului asupra utilajului de compactare, iar utilizarea sa în ecuația de mișcare a utilajului permite stabilirea regimului optim de lucru al acestuia în vederea acordării sale corelativ cu sarcina tehnologică de compactare ce trebuie realizată de echipamentul tehnologic de compactat.

CAPITOLUL V

Încercări experimentale pentru validarea tehnologiei de compactare dinamică.

5.1. Generalități

Pentru utilizarea pământurilor la realizarea structurilor rutiere sunt necesare materiale de adaos cât și tehnologii adecvate care să ducă la asigurarea parametrilor de rezistență și stabilitate la nivelul cerințelor normative.

În acest context, prezenta lucrare evidențiază efectul enzimelor în amestec cu pământul natural, agregatele minerale și materialele de adaos. Pentru anumite categorii de pământuri cu conținut semnificativ de argilă în amestec cu nisip și agregate minerale cu un tratament adecvat de stabilizatori enzimatici au fost obținute rezultate experimentale remarcabile. Astfel, caracteristicile structurilor stabilizate cu enzime pot fi definite pe baza rezistenței mecanice σ_z a modulului de elasticitate longitudinal E_z pe direcție verticală, a modulului de elasticitate volumică E_v și a coeficientului de rigiditate k pe direcție verticală.

Prezența enzimelor în amestecul de material se face remarcată, în condiții de dozare, malaxare și omogenizare corespunzătoare, prin modificarea coeficientului lui Poisson, notat cu ν . În acest caz, prin valori crescătoare ale lui ν către limita maximă $\nu_{max} = 0,5$ se constată creșterea modulului de elasticitate volumică, creșterea rezistenței cât și creșterea rigidității structurii realizate.

5.2. Cercetări experimentale parametrice privind pământurile stabilizate cu enzime.

5.2.1. Rigiditatea structurii de pământ stabilizat procesat.

În procesul de malaxare a amestecului pământ-agregate minerale trebuie asigurată doza optimă de alimentare, în stare atomizată cu enzime sau polienzime care să ocupe spațiile poroase prin diminuarea conținutului de apă din rețeaua poroasă naturală.

Tehnologiile actuale cu control automat și monitorizare informatică sunt capabile să asigure o mare varietate de soluții tehnice. [13]

Din aceste motive, materialul procesat sub forma de pământ stabilizat cu enzime, trebuie să aibă rețeaua poroasă cu conținut semnificativ de enzime pentru mărirea coeficientului Poisson și creșterea rezistenței la procesul de gelivitate (îngheț - dezgheț).

În domeniul deformațiilor elastice pentru structura rutiera pusă în operă, pe direcție verticală, ca urmare a compactării prin vibrație, rigiditatea poate fi estimată astfel:

$$k = C_z S \quad (5.1)$$

în care k este coeficientul de rigiditate, în domeniul elastic;

C_z - coeficient de contracție elastică uniformă corespunzător ariei S a suprafeței dreptunghiulare de contact; [47, 51]

Pentru coeficientul de contracție elastic uniformă se aplică relația

$$C_z = \alpha \frac{E_z}{\sqrt{S}} \frac{1}{1-\nu^2} \quad (5.2)$$

unde α este coeficientul de formă al suprafeței reale ce se materializează printr-o placă de contact, cu valori cuprinse în domeniul $0,8 \div 1,5$.

E_z - modulul de elasticitate longitudinală (monoaxială) a pământului

ν - Coeficientul lui Poisson

În cazul încercărilor "in situ" pentru o anumită categorie de pământ, se poate utiliza "placă de probă" cu o suprafață dreptunghiulară de arie S' care permite calculul coeficientului de rigiditate k' pentru "terenul de probă" cu relația:

$$k' = \alpha \frac{E_Z \sqrt{S'}}{1-\nu^2} \quad (5.3)$$

Coeficientul de rigiditate k pentru suprafața reală S de formă dreptunghiulară (pata de contact) dintre ruloul vibrator și teren (stratul de pământ stabilizat) poate fi calculat cu relația:

$$k = \frac{\alpha E_Z \sqrt{S}}{1-\nu^2} \quad (5.4)$$

Din relațiile (5.3) și (5.4) poate fi estimată valoarea lui k în raport cu valoarea lui k' determinate experimental, astfel

$$k = k' \sqrt{\frac{S}{S'}} \quad (5.5)$$

Pentru placa de probă cu $S = 4500 \text{ cm}^2$ a fost determinat experimental în regim dinamic de vibrații de rezonanță coeficientul de rigiditate k' pentru diverse categorii de teren (Tabelul 5.1.) [56].

Tabelul 5.1. Valori experimentale ale rigidității k' cu placa dinamică de probă

Nr. crt.	Natura stratului de pământ stabilizat	Coeficientul de rigiditate k' , MN/m
1	Pământ nisipos afânat Pietriș (3 ÷ 7) mm cu nisip	44,0
2	Nisip fin argilos afânat Pietriș (7 ÷ 15) mm cu nisip argilos	67,5
3	Nisip cu granulație medie și ușor argilos, afânat	90,0
4	Nisip cu granulație medie până la mare	95,6
5	Pietriș (7 ÷ 15) mm cu pământ precompactat Argilă cu pietriș compactată	120,0

5.2.2. Modulul de elasticitate longitudinală.

Pentru o probă cilindrică extrasă din stratul de pământ stabilizat/compactat, supusă la comprimarea monoaxială, potrivit cerințelor SR 8942/6-75 modulul elastic axial E_z se determină astfel:

$$E_z = \frac{4}{\pi} \frac{F_z}{d^2 - d_0^2} \frac{h_0}{\Delta h} \quad (5.6)$$

unde F_z este forța axială aplicată centric;

d_0 - diametrul inițial al probei necomprimate;

h_0 - înălțimea inițială a probei necomprimate;

d - diametrul final al secțiunii transversale mediane după comprimare;

h - înălțimea finală rămasă, a probei, după comprimare;

Δh - variația înălțimii (tasarea) probei sub forța de compresiune astfel încât

$$\Delta h = h - h_0 < 0$$

Astfel, pe baza a 1500 de probe prelevate din stratul de pământ stabilizat cu enzime și compactat cu un rulou vibrator, sau determinat valorile modulului E_z .

În funcție de cantitatea masică de enzime, raportată la 100 kg de pământ frezat, amestecat, compactat, adică la doza procentuală ε , %, sau obținut valorile modulului de elasticitate longitudinală E_z prezentată în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. Modulul E_z în funcție de ε

$\varepsilon, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$E_z, \text{MN/m}^2$	5,81	6,50	7,80	8,78	9,15	10,21

5.2.3. Coeficientul lui Poisson.

În cazul compresiunii monoaxiale pe direcția Z cu forța F_z procesul de deformare axială caracterizat prin deformația specifică $\varepsilon_z = \frac{h-h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}$ este însoțit în mod legic de deformația transversală din planul median, exprimată prin $\varepsilon_y = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$, astfel încât $\varepsilon_y = \nu \varepsilon_z$ [13, 33, 57].

Ca urmare, coeficientul lui Poisson ν poate fi determinat cu relația

$$\nu = \frac{h_0}{d_0} \frac{\Delta d}{|\Delta h|} \quad (5.7)$$

Rezultatele experimentale au evidențiat valori ale lui ν cuprinse între 0,42 și 0,485 pentru cele 1500 de probe prelevate "in situ".

În tabelul 5.3. se prezintă valorile coeficientului lui Poisson funcție de doza procentuală ε a stabilizatorului enzimatic. [47, 51]

Tabelul 5.3. Valorile coeficientului lui Poisson în funcție de $\varepsilon, \%$

$\varepsilon, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ν	0,421	0,442	0,453	0,465	0,475	0,485

5.2.4. Modulul de elasticitate volumică.

Pentru terenuri cu suprafețe mari și spații largi supuse vibrațiilor sau proceselor ondulatorii cu propagare unidirecțională, modulul volumic E_v poate fi determinat astfel:

$$E_v = E_z \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5.8)$$

Se constată că prin modificarea porozității și alimentarea golurilor cu substanțe fluidice stabile, coeficientul lui Poisson crește până la valoarea limită ($\nu_{\max} = 0,5$, astfel încât $\nu < \nu_{\max}$).

- Modulul de elasticitate volumică E_v în funcție de modulul E_z și ν , determinat pe cale experimentală este dat în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. Modulul E_v în funcție de modulul E_z și ν

ν	0,421	0,442	0,453	0,465	0,475	0,485
$E_z, \text{MN/m}^2$	5,81	6,50	7,80	8,78	9,46	10,21
$E_v, \text{MN/m}^2$	14,96	21,83	31,25	45,86	67,26	117,80

Probele realizate pe straturi de pământ stabilizat cu enzime în doza $\varepsilon = 0,5\%$ au fost utilizate pentru urmărirea în timp. Modulul elastic volumic (deformare) dinamică măsurat "in situ" la 35 m de sursa de compactare prin vibrație, la anumite intervale de timp este dat în Tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Modulul de elasticitate volumic E_v în timp [54, 55]

Timpul, ore	0	16	24	48	72
$E_v, \text{MN/m}^2$	67,5	70,5	96,3	101,8	109

Evoluția reologică în raport cu timpul evidențiază o creștere asimptotică stabilă, așa cum rezultă din datele experimentale cuprinse în tabelul 5.2. Astfel, legea reologică stabilită de [50] este de forma.

$$E_v(t) = \frac{0,877 + 15t}{0,13t + 0,013}$$

cu $E_v(0) = 67,46 \text{ MN/m}^2$ la momentul $t = 0$.

Variabila temporală t se exprimă în ore.

Pentru rezultatele obținute pe cale experimentală, în figura 5.1, se prezintă curba de variație a modului $E_v(t)$ în raport cu timpul.

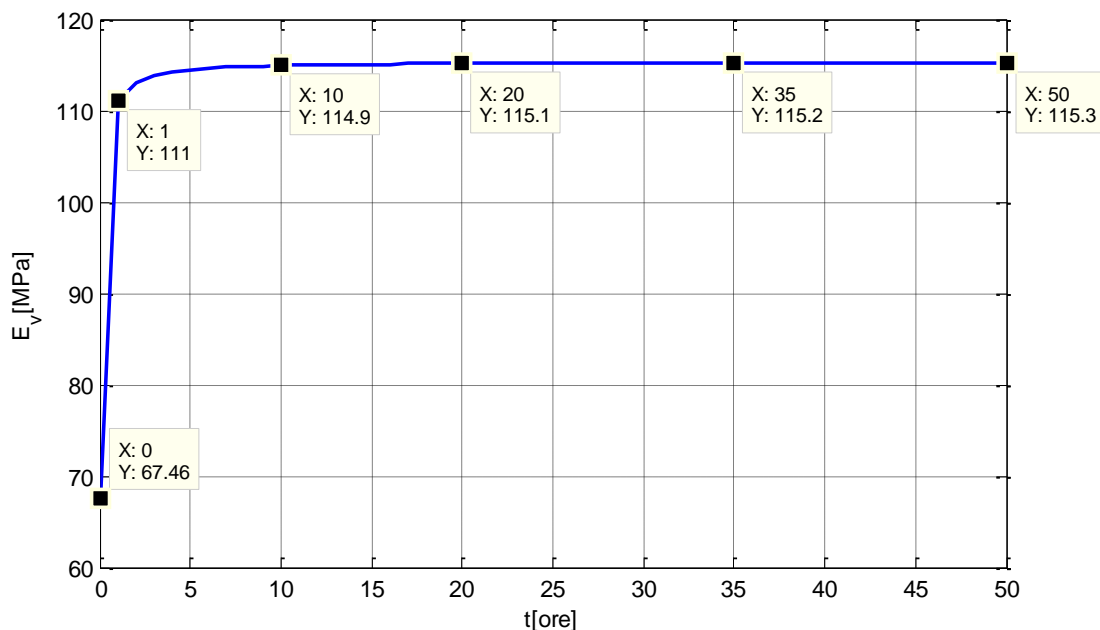


Figura 5.1. Variația modului de elasticitate volumică în raport cu timpul

5.2.5. Indicele Californian CBR

Indicele Californian de capacitate portantă se exprimă sub forma $CBR = \frac{F_p}{F_s}$ pentru adâncimea de penetrare Δp , unde F_p este forța de penetrare efectivă, iar F_s este forța standard corespunzătoare valorilor $\Delta p = 2,5$ mm și $\Delta p = 5$ mm. Pentru pământuri stabilizate cu enzime sau obținut valorile din Tabelul 5.6. [52, 53]

Tabelul 5.6. Indicele CBR, % pentru pământ stabilizat

Lot de probă	Valoarea medie a forței de penetrare efectivă	CBR _{2,5} , $\Delta p = 2,5$ mm $F_s = 13,2$ KN	CBR ₅ , $\Delta p = 5$ mm $F_s = 20,0$ KN
I	8,3	63	-
	11,0	-	53
II	7,5	56	-
	9,2	-	46
III	7,8	58	-
	9,3	-	46
IV	9,45	71,5	-
	13,11	-	66
V	Indicele CBR, % pentru pământ netratat		
	3,11	23,55	-
	3,86	-	19,32

5.3. Determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat

Epruvetele de pământ stabilizat netratate termic, prelevate din straturile recoltate din amplasament, au fost menținute în condiții normale de laborator la temperatura de +200 °C până la vârsta de 7 zile, fiind ulterior supuse încercării la compresiune monoaxială. Epruvetele de

pământ stabilizat tratate termic sau prelevat din probe compactate la umiditatea optimă, fiind păstrate 48-72 ore în condiții normale de laborator la temperatura de +200 °C înainte de a fi expuse la ciclurile de îngheț - dezgheț. Durata minimă a ciclurilor de îngheț și dezgheț la care au fost supuse probele analizate a fost stabilită la 24 ore, respectiv durata maximă de 96 ore la temperatura de -100 °C în frigider de laborator Liebhart. După fiecare perioadă de îngheț și dezgheț, sau efectuat măsurători privind variația parametrilor specifici probelor (volum, masa, densitate) cu scopul estimării modului în care ciclurile alternative de îngheț – dezgheț influențează asupra comportamentului pământului stabilizat, în special a parametrilor de rezistență. Înregistrările măsurătorilor corespunzătoare pentru masă și densitatea probelor supuse la 3 cicluri îngheț – dezgheț sunt prezentate în tabelul 5.7, nefiind observate modificări ale înălțimii probelor. [47, 48, 49, 130]

Tabelul 5.7. Valorile masei probelor supuse la 3 cicluri de îngheț – dezgheț

Determinare	Masa probei (g)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
inițial	1830,46	1618,35	1757,11	1661,96	1717,03	1778,22
îngheț	1811,57	1597,18	1740,26	1645,03	1689,15	1756,43
dezgheț	1797,39	1584,02	1726,87	1630,09	1684,58	1756,66
îngheț	1801,58	1587,84	1730,34	1636,89	1682,03	1752,15
dezgheț	1782,21	1568,96	1713,01	1628,2	1675,12	1740,07
îngheț	1786,36	1597,88	1746,68	1649,79	1686,93	1749,33
dezgheț	1761,23	1586,95	1735,12	1638,23	1672,85	1738,54

Metoda utilizată a constat în aplicarea în mod continuu, asupra epruvetei de pământ, a unei încărcări axiale, uniform crescătoare, pentru a stabili rezistența la compresiune monoaxială și deformația axială specifică corespunzătoare atingerii rezistenței la compresiune monoaxială. Viteza de deformare impusă a fost de 0,02 mm/min. [130]

În SR 8942/6-75 este menționat faptul că determinarea rezistenței la compresiune monoaxială se efectuează pe epruvete cilindrice cu păstrarea raportului egal cu aproximativ 2 între înălțime (h) și diametru (d). Luând în considerare faptul că epruvetele cilindrice prelevate nu au avut dimensiunile prevăzute, s-au aplicat factori de corecție standard a rezistenței, conform prevederilor din BS 1881, Part 120 (tabelul 5.8.). [130]

Tabelul 5.8. Factori de corecție a rezistenței (BS 1881, Part 120)

Raport înălțime/diametru (h/d)	Factori de corecție a rezistenței
2.00	1.00
1.75	0.97
1.50	0.92
1.25	0.87
1.00	0.80

Valorile rezistenței specifice la compresiune monoaxială obținute pentru probele de pământ netratate termic (tabelul 5.9.) și supuse ciclurilor de îngheț – dezgheț (tabelul 5.10.) au fost corectate cu factorii corespunzători raportului h/d. [130]

Tabelul 5.9. Rezistențe specifice la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat netratat termic

Cod proba	Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie necorectată		Raport h/d	Factor de corecție (BS 1881, Part 120)	Rezistența specifică la compresiune monoaxială corectată	
	(σ , N/mm ²)	(σ , kPa)			(σ , N/mm ²)	(σ , kPa)
Pământ stabilizat netratat termic						
P1	0,330	330	1,36	0,89	0,294	294
P2	0,277	277	1,41	0,90	0,247	247
P3	0,407	407	1,34	0,89	0,360	360
P4	0,412	412	1,20	0,86	0,346	346
PN	0,176	176	0,97	1,76	0,170	170

Tabelul 5.10. Rezistențe specifice la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat supus ciclurilor de îngheț – dezgheț

Cod proba	Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie necorectată		Raport h/d	Factor de corecție (BS 1881, Part 120)	Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie corectată	
	(σ , N/mm ²)	(σ , kPa)			(σ , N/mm ²)	(σ , kPa)
Pământ stabilizat supus ciclurilor de îngheț – dezgheț						
P1-FT	0,617	617	0,87	1,26	0,531	531
P2-FT	0,555	555	0,90	1,40	0,488	488
P3-FT	0,785	785	0,88	1,30	0,688	688
P4-FT	1,530	1530	0,88	1,30	1,327	1327
PN-FT	0,149	149	0,87	1,25	0,129	129

În continuare sunt prezentate unele probe examinate în figura 5.2.



Figura 5.2. Reprezentate probelor examinate[48, 49, 50]

Luând în considerare valorile caracteristicilor de rezistență obținute pentru probele martor și pentru probele supuse la cicluri de îngheț – dezgheț, se remarcă o creștere a rezistenței la compresiune prin îngheț – dezgheț (cu excepția probelor de pământ natural, unde se observă o scădere a rezistenței), calculată cu relațiile: [130]

$$\Delta R = \frac{R_{FT} - R_m}{R_{FT}} \cdot 100$$

unde: R_m - rezistența la compresiune a epruvetelor de pământ stabilizat netratat termic;

ΔR_{FT} - rezistența la compresiune a epruvetelor de pământ stabilizat supuse la îngheț – dezgheț.

Prin raportarea la epruvetele de pământ stabilizat expuse ciclurilor de îngheț – dezgheț, se observă o tendință pronunțată de creștere semnificativă și uniformă de 43-55% a caracteristicilor de rezistență pentru probele recoltate din lotul 1 și lotul 2, respectiv de 72-75% pentru cele corespunzătoare lotului A/B. Excepție face proba de pământ naturală, care manifesta o sensibilitate la îngheț – dezgheț prin scăderea rezistenței cu 32%. Se poate concluziona că pământurile stabilizate cu produse enzimatice supuse ciclurilor succesive de îngheț – dezgheț prezintă o stabilitate ridicată. [130]

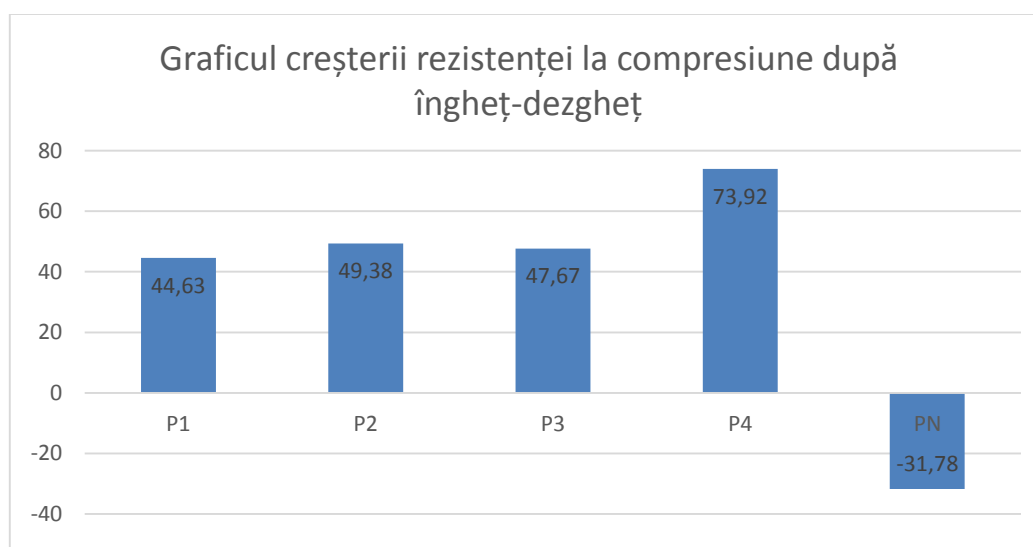


Figura 5.3. Reprezentarea grafică a creșterii rezistenței la compresiune după îngheț-dezgheț

„Determinarea permeabilității în laborator”, SR 1913/6-76 „Teren de fundare.

Tabelul 5.11. Determinarea permeabilității în laborator”.

Nr. crt.	Cod probă	Gradient hidraulic (i)	Coeficient de permeabilitate
			k_t (cm/s)
1.	LOT1-S2	16,52	8,11E-09
		14,78	7,69E-09
		11,30	7,07E-09
		7,62E-09	

Identificarea metodei utilizate: PTE-GFC-07 „Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor” (încercarea Proctor modificata), SR 1913/13-83 „Teren de fundare. Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor”

Tabelul 5.12. Caracteristicile unei probe analizate

Caracteristici	Unități de măsură	Numărul încercării					
		1	2	3	4	5	6
Masa cilindrului material, m_1	g	7800,4	7978,5	8128,2	8245,6	8197,2	8120,8
Masa cilindrului gol, m_2	g	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9
Masa material, m_m	g	4118,46	4296,6	4446,3	4563,7	4515,3	4438,9
Volumul materialului compactat, V	cm ³	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03
Densitatea $\rho = \frac{m_m}{V}$	g/cm ³	1,94	2,02	2,10	2,15	2,13	2,09
Umiditatea medie, w	%	7,23	9,08	10,52	12,01	13,75	15,06
Densitatea in stare uscata $\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100} \cdot \rho_s}$	g/cm ³	1,81	1,86	1,90	1,92	1,87	1,82

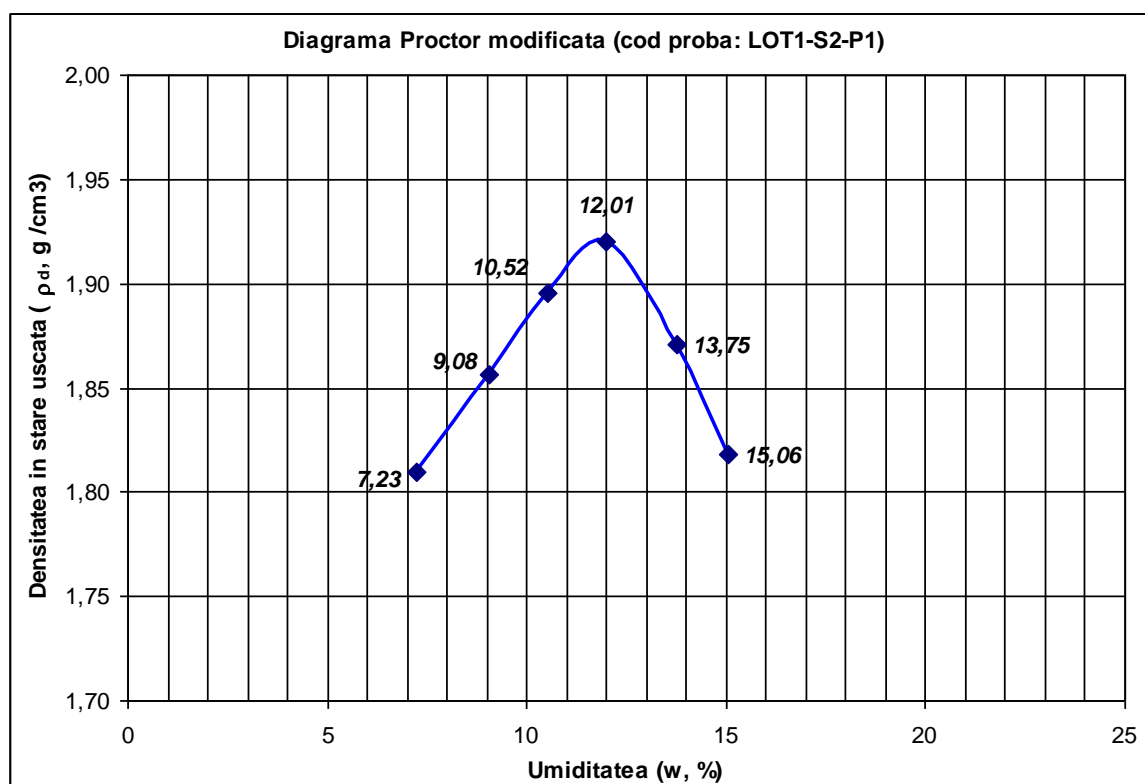


Figura 5.4. Încercarea unei probe cu Proctor modificat

5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale

Experimentările efectuate atât “in situ”, cât și în laborator, au avut drept scop să evidențieze modificarea parametrilor de deformabilitate, elasticitate și rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime, pe baza unui procedeu permanent, comparativ cu aceleași pământuri netratate cu stabilizatori enzimatici, adică în stare naturală.

- Modulul de elasticitate longitudinală E_z determinat la solicitarea de comprimare axială, conform relației 5,6, pentru pământuri stabilizate, a fost evaluat pentru 1500 de probe prelevate din stratul de teren stabilizat pentru șase doze masice ϵ de stabilizator, așa cum

- rezultă din Tabelul 5.2. Se constată că pe măsură ce cantitatea procentuală de stabilizator ε crește, în aceeași măsură se mărește și modulul E_z .
- Coeficientul lui Poisson, determinat experimental pe baza relației 5,7, pentru pământuri stabilizate, în cantitățile procentuale ε ale stabilizatorului, se constată că este crescător potrivit Tabelului 5.3.
 - Modulul volumic E_v depinde atât de coeficientul lui Poisson, cât și de modulul E_z . Astfel, pe măsură ce modulul lui Poisson și dozajul de stabilizator cresc, se constată o mărire pronunțată a modulului volumic, potrivit datelor din tabelul 5.4.
 - Indicele Californian CBR, cu rezultatele experimentale din tabelul 5.6, evidențiază valori corelate cu modulul volumic E_v , menționându-se faptul că valorile pentru pământul stabilizat sunt de 3 – 4 ori mai mari decât în cazul pământului netratat cu soluții enzimice.

5.5. Concluzii.

Problematika stabilizării pământurilor cu enzime se constituie ca oportunitate eficientă pentru realizarea structurilor rutiere prin prelucrarea “in situ” a pământurilor locale, îmbunătățite cu agregate minerale și tratate cu lianți organici.

În acest context, se înscrie și prezenta lucrare ce etalează atât aspectul teoretic de modificare a modulului de elasticitate prin creșterea coeficientului lui Poisson, în funcție de doză de stabilizator, cât și rezultatele experimentale obținute “in situ” pe poligonul de încercări și în laborator.

Se menționează faptul că au fost realizate etape experimentale “in situ” cu echipamente de frezare, amestecare și atomizare a stabilizatorului, depunerea straturilor de pământ prelucrat, cât și compactarea dinamică prin vibrație.

Experimentările au constatat în prelevarea de probe ale pământului natural și ale straturilor de pământ stabilizat. De asemenea, încărcările dinamice din teren au permis determinarea modulelor elastice și a rigidităților. Capacitatea de rezistență a structurii rutiere s-a măsurat “in situ” prin determinarea indicelui Californian CBR:

Pe baza rezultatelor analitice și experimentale pot fi sintetizate următoarele concluzii:

- stabilizatorii enzimatici în amestec atomizat și omogen cu pământul natural determină modificarea semnificativă a rezistenței, modulului elastic volumic, a coeficientului Poisson și a indicelui californian CBR;
- prezența stabilizatorului cu enzime în structura poroasă a pământurilor duce la creșterea semnificativă a modulului și a indicelui californian.

În consecință, tratamentul ecologic cu enzime poate asigura realizarea unor straturi rutiere din pământ stabilizat cu performanțe deosebite.

CAPITOLUL VI

Concluzii, contribuții personale și direcții generale de cercetare

6.1. Concluzii

Problematika stabilizării pământurilor cu enzime se constituie ca oportunitate eficientă pentru realizarea structurilor rutiere prin prelucrarea “in situ” a pământurilor locale, îmbunătățite cu agregate minerale și tratate cu lianți organici.

În acest context, se înscrie și prezenta lucrare ce etalează atât aspectul teoretic de modificare a modulului de elasticitate prin creșterea coeficientului lui Poisson, în funcție de doza de stabilizator, cât și rezultatele experimentale obținute “in situ” pe poligonul de încercări și în laborator.

Se menționează faptul că au fost realizate etape experimentale “in situ” cu echipamente de frezare, amestecare și atomizare a stabilizatorului, depunerea straturilor de pământ prelucrat, cât și compactarea dinamică prin vibrație.

Experimentările au constatat în prelevarea de probe ale pământului natural și ale straturilor de pământ stabilizat. De asemenea, încărcările dinamice din teren au permis determinarea modulelor elastice și a rigidităților. Capacitatea de rezistență a structurii rutiere s-a măsurat “in situ” prin determinarea indicelui Californian CBR:

Pe baza rezultatelor analitice și experimentale pot fi sintetizate următoarele concluzii:

- stabilizatorii enzimatici în amestec atomizat și omogen cu pământul natural determină modificarea semnificativă a rezistenței, modulului elastic volumic, a coeficientului Poisson și a indicelui californian CBR;

- prezența stabilizatorului cu enzime în structura poroasă a pământurilor duce la creșterea semnificativă a modulului și ale indicelui californian.

Contribuția fundamentală a tezei de doctorat constă în dezvoltarea de către autor a unui concept unitar și coerent de analiză destinat studiului interacțiunii rulou-teren în funcție de caracteristicile elastice, disipative și plastice ale mediilor analizate cât și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat.

a) În teză se evidențiază necesitatea dezvoltării și implementării unor modele reologice noi pentru pământuri stabilizate și a unor modele dinamice adecvate pentru obținerea unor informații cât mai apropiate de realitate. Așadar, s-a efectuat o analiză comparativă a comportării în regim static, dar în special în regim dinamic a echipamentului de compactat la interacțiune cu terenul având la bază modele fizice, numerice, reologice și virtuale. Sau elaborat modele cu mai multe grade de libertate a unui compactor cu un rulou vibrator și la fel sau analizat modele reologice pentru diferite tipuri de terenuri (slab coezive sau coezive).

b) Testele instrumentale „in situ” completate cu o serie de încercări experimentale de laborator, au asigurat o bază de date (fiind la baza unui plan sistemic de analiză multi-corelativă), care a fost eficientă în procesul de simulare numerică și virtuală a sistemului rulou vibrator - teren. Astfel, această bază de date este foarte benefică proceselor de armonizare comportamentală și cu atribuire parametrică a modelelor matematice/numerice furnizate cu realitatea identificabilă și măsurabilă a fenomenelor date.

c) Rezultatele numerice și scenariile virtuale au avut o contribuție la fundamentarea setului de cerințe esențiale privind evaluarea răspunsului terenului și stării de solicitare indusă de echipamentul tehnologic.

d) Stabilirea și fundamentarea conceptului de validare a setului de modele de interfață propuse, în raport cu evaluarea nivelului de performanță impus gradului final de compactare, au dus la validarea modelelor. Caracterul parametrizat al concepției acestora asigură modelarea diferitelor tipuri de terenuri, număr de treceri, grosimi de straturi și individualizarea fiecărui utilaj de compactare utilizat.

e) Simularea complexă a efectului cumulat provocat de trecerile succesive și evaluarea în adâncime a gradului de compactare pe întreaga zonă de interes cu estimarea dinamicii reale și cu baleierea acesteia pe întreaga zonă care este monitorizată.

f) Stabilirea corelațiilor de performanță parametrică.

Volumul mare de lucrări, printre care și procesul de compactare și de control al rezultatelor atinse, ce caracterizează realizarea construcțiilor din materiale locale, reclamă implicarea tehnologiilor de execuție cât mai performante, ce determină într-un timp eficient calitățile cerute pentru materiale de către funcțiile amenajărilor respective.

Influența conținutului de apă în procesul de compactare, desfășurat în mod particular prin intermediul cilindrilor vibrator netezi, este în general demonstrată și recunoscută în literatura de specialitate. Diversele rezultate ale testelor de compactare, prezentate în principal prin relația densitate în stare uscată - conținut de apă, dovedesc efectul major produs de acest parametru asupra gradului de compactare atins în compactarea pământurilor granulare fine. Cu toate acestea, în literatură nu sunt disponibile destule informații specifice pentru a putea dezvolta expresii generale care ar putea fi utile în estimarea prealabilă a rezultatelor practice ale lucrărilor de compactare. Pentru a atinge un nivel de compactare corespunzător unui tip specific de pământ, aceste ecuații indică numărul necesar de treceri a utilajului de compactare în funcție de tipul acestuia și de conținutul de apă al materialului compactat. Din nefericire, chiar dacă expresiile respective se bazează pe teste efectuate cu diverse tipuri de utilaje, se pare că lipsa de informații clare face ca aplicarea lor să fie nesigură.

Răspunsul determinat analitic pentru sistemul material compactat – cilindru vibrator arată că variația conținutului de apă are un efect important asupra deplasării pe verticală a cilindrului, și în consecință asupra energiei absorbite de material.

Analiza numerică prin intermediul elementelor finite a comportării sistemului cilindru vibrator – material compactat a condus la rezultate care tind să urmărească în general răspunsul stabilit pe cale analitică.

Rezultatul principal reținut în urma analizei a fost deplasarea terenului pe verticală în zona de contact a acestuia cu cilindrul, această mărime fiind aleasă ca termen de comparație cu rezultatele obținute prin studiul analitic. S-a constatat că pentru cazul când frecvența naturală de oscilație a cilindrului nu se apropie de nivelul frecvenței de operare a dispozitivului vibrator, rezultatele obținute prin analiza numerică prezintă dispunerea preconizată și deci modelarea și procedeul de analiză, deși perfectibile, sunt totuși corespunzătoare. Pe de altă parte, având în vedere că în situația în care frecvența naturală menționată egalează frecvența de operare, curba deplasărilor determinate numeric nu mai prezintă alura corespunzătoare, înseamnă că modelarea încărcării dinamice, respectiv procedeul de analiză aplicat, sunt deficitare.

6.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale ce reies din întreaga activitate de cercetare și prezentate în teza dată de doctorat remarcă faptul că obiectivul general al activității doctorale de elaborarea unui set de modele aplicative, monitorizare, control parametric funcțional, interfața utilaj și material, cât și analize de performanță pot fi sintetizate astfel:

- a) Sinteza și clasificarea la nivel de performanță a realizărilor relevante atât pe plan național, cât și pe plan internațional în domeniul compactării cu vibrații a terenurilor;
- b) Stabilirea unor modele reologice cu scopul implementării în sisteme instrumentale și informatice specializate pentru simularea interacțiunii rului vibrator – teren la procesul de compactare;
- c) Analiza comportării în regim dinamic ale modelelor reologice pentru evidențierea parametrilor specifici în legătură cu capacitatea acestora de a descrie realist procesul de compactare;
- d) Conceperea, dezvoltarea și fundamentarea modelelor propuse, luând în considerare caracteristicile plastice, elastice și disipative ale terenului studiat și comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional examinați.; Astfel, se menționează necesitatea modelării terenurilor stabilizate cu materiale de adaos cum ar fi: bitum, cenuși, ciment, enzime.
- e) Corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative, în scopul optimizării, mărimilor parametrice de performanță, evidențiate prin eficiența compactării dată de forța transmisă terenului.
- f) Crearea unui program de cercetare a rezultatelor experimentale instrumentale „in situ” suplimentate cu o serie de încercări experimentale în laborator, pentru evidențierea influenței

unor parametri funcționali, constructivi și tehnologici ai compactorului asupra gradului de compactare;

g) Conceperea unor legități funcționale dintre parametrii care descriu evoluția pământurilor (necoeziv, slab coeziv și balast) în procesul de compactare;

h) Stabilirea parametrilor de performanță în procesul de compactare a structurilor rutiere.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele obținute, ipotezele și studiile din teză au menirea să sugereze următoarele direcții de cercetare pe viitor, cum ar fi:

- Dezvoltarea unor modele performante pe baza modelelor neliniare complexe de variație față de parametrii constitutivi implicați la procesul de compactare;

- Asigurarea măsurării cu exactitate a parametrilor monitorizați în timpul compactării cu folosirea aparatelor/sistemelor de măsură de ultimă generație ce permit înregistrarea în timp real a datelor și variația acestora;

- Realizarea unui dispozitiv/sistem/aparat ce ar putea monitoriza în timp real, ce ar stoca și prelucra variația parametrilor semnificativi în procesul de compactare posibilitatea de a automatiza procesului de reglaj/control „in situ” și caracteristicilor de lucru a utilajului în dependență de răspunsul terenului;

- Conceperea unui dispozitiv electric și informatic care să stabilească efectul cumulat al performanțelor în procesul de compactare cu decizie tehnică și economică.

Ca urmare, se menționează că domeniul comportării dinamice fiind complex, prin varietatea materialelor, a echipamentelor dinamice și a metodelor instrumentale tot mai performante, rămâne deschis la cercetare continuă pentru atingerea eficienței și calității execuției de structuri rutiere.

Asigurarea unui sistem adecvat pentru determinarea gradului de compactare în timp real la pământurile coezive, slab coezive stabilizate cu compuși organici naturali de tipul enzimelor.

În viitor se estimează o evoluție diversificată a stabilizării terenurilor pentru structurile rutiere utilizând materiale de adaos de natură chimică sau organică (ecologică).

LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE ȘI PREZENTATE

- [1] Bratu, P., **Braguța E.**, - Performanțe de rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime, în procesul de compactare prin vibrații, CONSILOX - 12, "Știința materialelor oxidice în slujba dezvoltării durabile" 16-20 septembrie 2016, Sinaia, ISSN 2285-6145;
- [2] Dobrescu C. F., **Braguța E.**, - Evaluarea parametrilor de rezistență și deformabilitate ai terenului pe baza încercărilor de laborator, Academia de Științe Tehnice din România și Universitatea Ovidius din Constanța, ZASTR 2017 6-7 octombrie, ISSN 2066-6586;
- [3] Dobrescu C. F., **Braguța E.**, - Optimization of Vibro-Compaction Technological Process Considering Rheological Properties, Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS-2017, Proceedings of the 14th AVMS Conference, Timișoara, Romania, ISBN 978-3-319-69822-9, ISSN 0930-8989;
- [4] Dobrescu C. F., **Braguța E.**, - Evaluation of strength and deformation parameters of soil based on laboratory tests, Multi-Conference on Systems & Structures (SysStruc 17) din Universitatea Eftimie Murgu din Reșița 9-11 noiembrie 2017;
- [5] Pîntoi R., Bordos R., **Braguța E.**, - Vibration Effects in the Process of Dynamic Compaction of Fresh Concrete and Stabilized Earth, Journal of Vibration Engineering & Technologies – Volume 5, decembrie 2017, ISSN 2321-3558;
- [6] **Braguța E.**, - Interacțiunea compactor teren în procesul de vibrare, conferința tehnico - științifică internațională „Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului” 17-19 noiembrie 2016, Chișinău, ISBN 978-9975-71-854-9;
- [7] Condrat A., Ababii A., **Braguța E.**, - Tehnologii noi și utilaje pentru stabilizarea pământurilor cu folosirea stabilizatorilor pe baza de compuși organici naturali polienzimici, Conferința Științifică Internațională de Cercetare și Administrare Rutieră, “CAR 2015” București, 9-11 iulie 2015;
- [8] Dobrescu C. F., **Braguța E.**, Experimental determinations of strength and deformation soil parameters in laboratory conditions, 1st International Conference on Experimental Mechanics in Engineering (EMECH); 8-9 June 2016, Brașov, Romania;
- [9] Dobrescu C. F., **Braguța E.**, "Dynamic modeling of vibro-compaction process on cohesionless granular soils" Acoustics and Vibration of Mechanical Structures" May 25-26, 2017 - Timișoara, Romania.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Das, B.M. (1983). "Fundamentals of Soil Dynamics", Elsevier Science Publishing Co., New York
- [2] D'Appolonia, D.J., D'Appolonia, E. (1967). "Determination of the maximum density of cohesionless soils", Proceedings, 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Israel, Vol.1.
- [3] D'Appolonia, E. (1970). "Dynamic Loadings", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 96 (SM1).
- [4] Ortigosa, P., Whitman, R.V. (1968). "Densification of Sand by Vertical Vibrations with Almost Constant Stress", Publication no 206, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [5] Krizek and Fernandez (1971) Soil Percent of mix Moisture content Modified Proctor
- [6] Litwinişzyn, J., Stochastic methods in mechanics of granular bodies, Symp. Franco, Polonais, Varsovia, 1971;
- [7] Modiga, M., Introducere in mecanica mediilor continue si in mecanica microstructurala, Editura Tehnica, Bucuresti, Romania, 2001;
- [8] Nowacwi, W.K, Problemes de la rheologie, Symposium Franco-Polonais, Varsovia, Edit. Inst. de rech. Fond. de la tehn. Acad. Pol. Des Sciences Varsovia, 1973;
- [9] Drucker, D.,C., Prager, W., Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Quart. Applied Math. Vol. 10, No. 2, pp. 157-165, 1952;
- [10] Sawczuk & Stutz, On formulation of stress-strain relations for at failure, ZAMP, no.19, pp. 677-778, 1968;
- [11] Bratu, P., Stabilirea regimului dinamic de funcţionare a cilindrilor compactori vibratorii cu două trepte de amortizare, Studii şi cercetări INCERC, nr. 5, 1974;
- [12] Lambe, T. W., Whitman, R. V., Soil mechanics, John Wiley & Sons, 553 pagini, 1969;
- [13] Rollings, M. P., Rollings, R. R., Geotechnical materials in construction, McGraw-Hill, 1996;
- [14] Proctor, R. R., Fundamentals principles of soil compaction". Engineering news-record. Vol. 111, No. 9, 245-248, 1933;
- [15] Mihailescu, Şt., Bratu, P., Goran, V., Vlădeanu, A., Aramă, Ş., Maşini de Construcţii 2. Editura tehnică, Bucureşti, România, 1985;
- [16] Holtz, R. D., State of the Art Report 8: Guide to Earthwork Construction, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1990;
- [17] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., An introduction to geotechnical engineering, Prentice Hall, 2010;
- [18] Zou, W., Wang, Z, Yao, Z., Effect of dynamic compaction on placement of highroad embankment, Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol. 19, No. 4, pp.316-323, 2005;
- [19] Mihăilescu, Şt., Zafiu, Gh., Gaidoş, A., Bratu, P., Vlădeanu, A., Mihăilescu, S., Tehnologii şi utilaje pentru executarea, întreţinerea şi reabilitarea suprastructurilor de drumuri. Executarea suprastructurilor de drumuri, Editura Impuls, Vol. I, Bucureşti, 2005;
- [20] Daniel, D., Benson, C.H., Water content-density criteria for compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 116, No.12, pp.1811-1830, 1990;
- [21] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., Evaluation of the Influence of Geogrid Reinforcement on soil Rotation and Stiffness in Compacted Based Course Soil, Transportation Research Record. No. 2116, 76 – 84, 2009;

- [22] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., Mechanistic method for determining the resilient modulus of base course materials based on elastic wave measurements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 136, No. 8, pp.1086 -1094, 2009;
- [23] Richart, F. E., Hall, J. R., Woods, R. D., *Vibrations of soils and foundations*, Newmark, N. M., W. J. Hall, 414 pagini, 1970;
- [24] Santamarina, J. C., *Soils and waves particulate materials behavior, characterization and process monitoring*, Wiley, 2001;
- [25] Wolf, J.P. (1994). "Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ;
- [26] Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1971, 1972). "The Behavior of Shear Modulus and Damping Ratio for Soils";
- [27] Mihăilescu, Șt., Zafiu, Gh., Gaidoș, A., Bratu, P., Vlădeanu, A., Mihăilescu, S., *Tehnologii și utilaje pentru executarea, întreținerea și reabilitarea suprastructurilor de drumuri. Executarea suprastructurilor de drumuri*, Editura Impuls, Vol. I, București, 2005;
- [28] Axinti, G., Axinti, A., S., *Acționări hidraulice și pneumatice. Dinamica echipamentelor și sistemelor*, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2008;
- [29] Axinti, G., *Proceduri experimentale. Analiza experimentală asistată de calculator*, Vol. 1, Editura Impuls, București, 2010;
- [30] Bărdescu, I., *Studiul vibrațiilor la plăcile vibratoare pentru compactarea pământurilor*, Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1971;
- [31] Bratu, P., *Influența sistemului elastic de amortizare asupra parametrilor dinamici la cilindrul compactorului vibrator*, Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1980;
- [32] Kolumban, V., *Contribuții la optimizarea performanțelor mașinilor de compactare prin vibrație*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2000;
- [33] Nicoară, Ș.V., *Contribuții la compactarea mediilor poroase în construcțiile de retenție*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, Facultatea de Hidrotehnică, 2003;
- [34] Mihăilescu, Șt., Bratu, P., Goran, V., Vlădeanu, A., Aramă, Ș., *Mașini de Construcții 2*. Editura tehnică, București, România, 1985;
- [35] Peurifoy, R. L., Ledbetter, W. B., *Construction planning, equipment and methods*, 4th Ed., McGraw-Hill, New York, 1985;
- [36] Ganciu, T. *Identificarea sistemelor*, Editura Nord-Est, Iași, Romania, 1995;
- [37] Bratu, P., *Vibrațiile sistemelor elastice*, Ed. Tehnică, București, 2000;
- [38] Legendi, A., Bausic, F., Pavel, C., Panaitescu, L., *Elemente de mecanica teoretică și analitică*, Editura Matrix Rom, București, 2012
- [39] Bratu, P., *Mecanică teoretică*, Ed. Impuls, București, 2006;
- [40] Bratu, P., *Analyze of insulator rubber elements subjected to an actual dynamic regime*, The 9th International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002;
- [41] Bratu, P., *Analiză dinamică și optimizarea răspunsului pentru mașinile de compactat prin vibrație*. Raport de cercetare științifică. MCInd, 1975;
- [42] Bratu, P., *Criterii de alegere a caracteristicilor optime pentru compactoarele vibratoare autopropulsate*. În: *Revista Construcții* nr.3, 1978;
- [43] Mihăilescu Șt., Bratu P., Goran V., Vlădeanu Al.- *Mașini de construcții. Calculul, construcția și încercarea mașinilor pentru lucrări de pământ*. Vol.II, Editura Tehnică, București, 1985, Coordonatori: Șt. Mihăilescu, P. Bratu
- [44] Bejan, S., *Analiza performanței procesului de compactare dinamică prin vibrații pentru structuri rutiere*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2015;
- [45] Panfiloiu, Gh., *Sistem suport de decizie pentru analiza dinamică a modelelor reologice la compactarea prin vibrații*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2013;

- [46] Căpățână G.-F., Analiza comportării dinamice a ruloarelor compactoare vibratoare pentru lucrări de drumuri, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2013;
- [47] Bratu, P., Braguța E., - Performanțe de rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime, în procesul de compactare prin vibrații, CONSILOX - 12, "Știința materialelor oxidice în slujba dezvoltării durabile" 16-20 septembrie 2016, Sinaia, ISSN 2285-6145;
- [48] Dobrescu C. F., Braguța E., - Evaluarea parametrilor de rezistență și deformabilitate ai terenului pe baza încercărilor de laborator, Academia de Științe Tehnice din România și Universitatea Ovidius din Constanța, ZASTR 2017 6-7 octombrie, ISSN 2066-6586;
- [49] Dobrescu C. F., Braguța E., - Optimization of Vibro-Compaction Technological Process Considering Rheological Properties, Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS-2017, Proceedings of the 14th AVMS Conference, Timișoara, Romania, ISBN 978-3-319-69822-9, ISSN 0930-8989;
- [50] Dobrescu C. F., Braguța E., - Evaluation of strength and deformation parameters of soil based on laboratory tests, Multi-Conference on Systems & Structures (SysStruc 17) din Universitatea Eftimie Murgu din Reșița 9-11 noiembrie 2017;
- [51] Pințoi R., Bordoș R., Braguța E., - Vibration Effects in the Process of Dynamic Compaction of Fresh Concrete and Stabilized Earth, Journal of Vibration Engineering & Technologies – Volume 5, decembrie 2017, ISSN 2321-3558;
- [52] Braguța E., - Interacțiunea compactor teren în procesul de vibrare, conferința tehnico-științifică internațională „Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului” 17-19 noiembrie 2016, Chișinău, ISBN 978-9975-71-854-9;
- [53] Condrat A., Ababii A., Braguța E., - Tehnologii noi și utilaje pentru stabilizarea pământurilor cu folosirea stabilizatorilor pe baza de compuși organici naturali polienzimici, Conferința Științifică Internațională de Cercetare și Administrare Rutieră, “CAR 2015” București, 9-11 iulie 2015;
- [54] Braguța E., - Evaluarea parametrilor de răspuns ai compactorului vibrator în procesul de compactare a pământurilor, SRMTA Conferința IMSAV - Brașov 23-24 noiembrie 2016;
- [55] Braguța E., - Energia disipată în procesul de compactare a pământului stabilizat cu enzime în regim de vibrații staționare forțat, SRMTA Conferința IMSAV - Brașov 23-24 noiembrie 2016;
- [56] Rahman, F., Hossain, M. M., Hunt, M. M., Romanoschi, S., A., Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments, Geotechnical Testing Journal. Vol. 31, No. 5, 442-451, 2008;
- [57] Nicolescu, L., Technology of stabilizing grounds, Publishing House Ceres, Bucharest, 1980.
- [58] Adam, D., *Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Roller*, GeoEnvironment revue, Bouazza, Balkema Rotterdam, 1997;
- [59] Adam, D., Kopf, F., *Sophisticated Roller Compaction Technologies and Roller-Integrated Compaction Control*, Compaction of Soils-Granulates and Powders, Ed. Kolymbas & Fellin, Rotterdam, 2000;
- [60] Adam, D., Kopf, F., *Theoretical analysis of dynamically loaded soils*, European Workshop: Compaction of soils and granular materials, ETC11 of ISSMGE, Paris, Franta, 2000;
- [61] Adam, D., Kopf, F., *Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)*, Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece, pp. 97–106, 2004;
- [62] *Ammann Compaction Equipment*, Brochure, Ammann Verdichtung AG, Langenthal, Swiss;
- [63] Anderegg, R., *ACE AMMANN Compaction Expert – Automatic Control of the Compaction*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, pp. 229-236, 2000;

- [64] Axinti, A.S., Nastac, S., Axinti, G., *Virtual prototype for simulation and analysis of traction systems in interaction with roads*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XIV Mechanical Engineering, ISSN 1224 – 5615, pp. 63-70, 2008;
- [65] Axinti, G., Axinti, A., S., *Acționări hidraulice și pneumatice. Dinamica echipamentelor și sistemelor*, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2008;
- [66] Axinti, G., Axinti, A., S., *Acționări hidraulice și pneumatice. Baze de calcul, proiectare, exploatare, fiabilitate și scheme de acționare*, Vol. III, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2009;
- [67] Axinti, G., *Proceduri experimentale. Analiza experimentală asistată de calculator*, Vol. 1, Editura Impuls, București, 2010;
- [68] Bomag E, and *Variocontrol*, Technical Paper, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany;
- [69] Bowels, J. E., *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, McGraw Hill, 1979;
- [70] Bratu, P., *Influența sistemului elastic de amortizare asupra parametrilor dinamici la cilindrul compactorului vibrator*, Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1980;
- [71] Bratu, P., *Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje*, Editura Tehnică, București, 1990;
- [72] Bratu, P., *Vibrațiile sistemelor elastice*, Ed. Tehnică, București, 2000;
- [73] Bratu, P., *Viscous nonlinearizing for interval energy dissipation*, IJAV, Vol.4, Issue 4, pp.82-87, 2000;
- [74] Bratu, P., *Structural requirements imposed to vibration systems*, IJAV, Vol.5, Issue 2, pp.15-18, 2001;
- [75] Bratu, P., *Analyze of insulator rubber elements subjected to an actual dynamic regime*, The 9th International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002;
- [76] Bratu, P., *The behavior of nonlinear viscoelastic systems subjected to harmonic dynamic excitation*, The 9th International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002;
- [77] Bratu, P., *Antivibrating systems having amplified deflection under loading*, Vibration Control and Transmissibility, pag. 271, The International Conference of RSA on Sound and Vibration, Bucharest, 14 - 17 Oct., 2004;
- [78] Bratu, P., *Dynamic response of nonlinear systems under stationary harmonic excitation, Non-linear acoustics and vibration*, 11-th International Congress on Sound and Vibration, 2767-2770, St. Petersburg, 5 - 8 July, 2004;
- [79] Bratu, P., *L'analyse énergétique d'un système visqueux-élastique linéaire excité par une force d'inertie unidirectionnelle*, International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Liberec, Czech Republic, pp.131–136, Aug.31 – Sept.2, 2004;
- [80] Bratu, P., *Méthodes expérimentales pour la détermination des caractéristiques élastiques et dissipatives des systèmes antivibratiles en caoutchouc*, International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, pp.137–139, Liberec, Czech Rep., Aug. 31–Sept. 2, 2004;
- [81] Bratu, P., *Mecanică teoretică*, Ed. Impuls, București, 2006;
- [82] Bratu, P., *Elastic and damping parameters for vibration insulation system*, INTER-NOISE 2010, the 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Lisbon, Portugal, 13-16 June, 2010;
- [83] Bratu, P., *Dynamic analysis in case of compaction vibrating rollers intended for road works*, The 17th International Congress on Sound & Vibration, ICSV, Cairo, 18-22 July, 2010;
- [84] Bratu, P., Debeleac, C., *The analysis of vibratory roller motion*, Proceedings of the VII International Triennial Conference Heavy Machinery – HM 2011, Session Earth-moving and transportation machinery, Vrnjačka Banja, Serbia, 29 June -2 July, pp.23-26, ISBN 978-86-82631-58-3, 2011;
- [85] Brandl, H., Adam, D., *Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials*, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, September 6-12, vol.1, pp.31-36, Hamburg, Germany, 1997;
- [86] Brandl, H., Adam, D., *Flachendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen—Grundlagenforschung und praktische Anwendung (Continuous Compaction Control with Vibratory Rollers—Basic Research and Practical Application)*, Schriftenreihe der Strassforschung Heft 506, Forschungsvorhaben Nr. 3.147, Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 2000;

- [87] Briaud, J.-L., *Introduction to Soil Moduli*, Geotechnical News, BiTech Publishers Ltd, Richmond, B.C., Canada, 2001;
- [88] Constantinescu, V., *Tehnologii performante și echipamente pentru realizarea structurilor rutiere*, Editura Impuls, București, 2001;
- [89] Debeleac, C., Nastac, S., *On vibration exposure monitoring at industrial intensive pollutant areas*, Journal of Science and Arts, Year 10, No. 2 (13), pp. 319-326, 2010;
- [90] Debeleac, C., Nastac, S., *On Non-linear Characteristics Evaluation of Vibratory Tool and Terrain Interaction for Embankment Works*, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Bucuresti, 8 June 2012, ISSN 1842-8045, 2012;
- [91] Drucker, D.C., Prager, W., *Soil mechanics and plastic analysis or limit design*, Quart. Applied Math. Vol. 10, No. 2, pp. 157-165, 1952;
- [92] Edil, T.B., Luh, G.-F., *Dynamic Modulus and Damping Relationships for Sands*, Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, CA, pp. 394-409, 1978;
- [93] Feng, Z., Fan, H., *Study on numerical simulation of rheological test of soft soil in Shanghai*, Journal of Tongji University, 31(4):379-382, 2003;
- [94] Forssblad, L., *Vibratory Soil and Rock Fill Compaction*, Robert Olsson Tryckeri AB, Stockholm, Sweden, 1981;
- [95] Floss, R. and Kloubert, H.-J., *Newest Developments in Compaction Technology*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, May 19th, pp. 247-261, France, 2000;
- [96] Gillich, G.R., Praisach, Z., Onchis, D.M., *About the effectiveness of damage detection methods based on vibration measurements*, EMESEG'10 Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Engineering mechanics, structures, engineering geology, pp. 204-209, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010;
- [97] Hardin, B.O., *The nature of Stress – Strain Behavior for Soils*, Proc. Of the ASCE Geotechnical Engineering Division, Special Conference Earthquake Engineering and Soil Dynamics, June 19-21, Pasadena, CA, 1978;
- [98] Harhuta, N., *Machines for Soil Compaction*, Mechanical Engineering, pp. 474-485, 1973;
- [99] Heersink, D. K., Furrer, R., *Sequential spatial analysis of large datasets with applications to modern earthwork compaction roller measurement values*. Submitted to Spatial Statistics, 2013;
- [100] Leopa, A., Debeleac, C., Năstac, S., *Simulation of Vibration Effects on Ground Produced by Technological Equipments*, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2012, Conference Proceedings, Vol. 5, Vol. 5, pp. 743-750, ISSN 1314-2704, 2012;
- [101] Leopa, A., Năstac, S., Debeleac, C., Căpățână, G.F., Potirniche, A., *Identification of parameters characterizing the nonlinear behavior of viscous-elastic systems on dynamic loadings*, The 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering", April 19-21, Tallinn, Estonia, 2012;
- [102] Litwiniszyn, J., *Stochastic methods in mechanics of granular bodies*, Symp. Franco, Polonais, Varsovia, 1971;
- [103] Lubking, P., *Soil Mechanics*, Lecture notes in Master Program on Underground Space Technology, IHE Delft, 1999;
- [104] Mooney, M.A., Rinehart, R.V. *Field Monitoring of Roller Vibration During Compaction of Subgrade Soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 3, pp. 257–265, 2007;
- [105] Mooney, M.A., Rinehart, R.V., *In-Situ Soil Response to Vibratory Loading and Its Relationship to Roller-Measured Soil Stiffness*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 8, pp. 1022–1031, 2009;
- [106] Mooney, M. A., Rinehart, R. V., White, D. J., Vennapusa, P. K., Facas, N. W., and Musimbi, O. M., *Intelligent soil compaction systems*, NCHRP project 21-09 final report, 2010;
- [107] Năstac, S., Leopa, A., *Comparative analysis of visco-elastic models with variable parameters*, Analele Universitatii "Eftimie Murgu" Resița, ANUL XVII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pp. 227-232, 2010;
- [108] Năstac, S., *On the increase of the isolation efficacy for the passive elastic devices by the structural configuration optimisation*, in 9th WSEAS International Conference on Acoustics&Music: Theory&Applications, Bucharest, Romania, June 24-26, pp.83-88, 1997;

- [109] Nicoară, Ș.V., Constantin A.T., *Dynamic characteristics of sands*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1, 2001;
- [110] Nicoară, Ș.V., Constantin A.T., *Granular soils compaction by vibratory rollers*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1, 2001;
- [111] Nicoară, Ș.V., Constantin, A.T., *The influence of moisture content in the compaction of sand*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) – fasc.1, 2001;
- [112] Thurner, H.F., Sandström, A., *Continuous Compaction Control*, CCC, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, pp. 237-246, 2000;
- [113] Vaicum, A., *Studiul reologic al corpurilor solide*, Editura Academiei Române, București, 1978;
- [114] Wolf, J.P., *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994;
- [115] Zou, W., Wang, Z., Yao, Z., *Effect of dynamic compaction on placement of highroad embankment*, Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol. 19, No. 4, pp.316-323, 2005;
- [116] Massarsch K.R., Fellenius B.H., *Vibratory compaction of coarse-grained soils*. Can. Geotech. J. 39(3), 25 (2001);
- [117] Mooney M.A., Gorman P.B., Gonzalez J.N., *Vibration based health monitoring during earthwork construction*. Struct. Health Monit. 2(4), 137–152 (2005);
- [118] Ter-Martiryan Z.G., Ter-Martiryan A.Z., Sobolev E.S., *Vibration of embedded foundation at multi-layered base taking into account non-linear and rheological properties of soils*. Proc. Eng. 153, 747–753 (2016);
- [119] Zafiu P., *Technologies and equipments for works mechanization (in Romanian)* (Technical University of Civil Engineering, Bucharest, Romania, 2005);
- [120] Dobrescu C.F., *Highlighting the change of the dynamic response to discrete variation of soil stiffness in the process of dynamic compaction with roller compactors based on linear rheological modelling*. Appl. Mech. Mater. 801, 242–248 (2015);
- [121] C.F., in *The rheological behaviour of stabilized bioactive soils during the vibration compaction process for road structures*, Book of abstracts of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Italy, 2015; Technical University of Civil Engineering, Bucharest, Romania (2005);
- [122] Bratu, P., Ovidiu V., Bejan S., - *Analiza comportării dinamice a sistemului rulou vibrator – strat de material în procesul de compactare dinamică a căilor rutiere*, a VI-a Conferință tehnico-științifică internațională "Problemele actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului", volumul III, 15-16 noiembrie 2012, ISBN 978-9975-71-315-3;
- [123] Căpătână, G.F., Debeleac, C., Năstac, S., *On Dynamics of Vibratory Compactors based on Complex Interaction with Terrain*, Annual Symposium Of The Institute Of Solid Mechanics - SISOM 2011 And Symposium of Acoustics, Academy Of Technical Sciences, Commission of Acoustics of Romanian Academy, Bucharest, Romania, May 26-27, 2011;
- [124] Oproescu, Gh., Debeleac, C., Leopa, A., Nastac, S., *On the rheological behaviour of the soil in the artificial compacting process*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XIV Mechanical Engineering, ISSN 1224 – 5615, pp. 63-70, 2008;
- [125] 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, ISSN 1224-5615, 2010, pp.51-54;
- [126] 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, 2010, ISBN 978-973-27-1945-1, pp. 83-108;
- [127] Carmen Debeleac and Silviu Nastac, *Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process*, PAMM, (14)1, Special Issue: 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Erlangen 2014; Editors: P. Steinmann and G. Leugering, Volume 14, Issue 1, pages 749–750, December 2014, Article first published online: 22 DEC 2014.
- [128] Bratu, P., Alexandru, C., *Compare analysis of dynamic response of an elastic-dissipative system with Voight-Kelvin or Maxwell Rheological behaviour*, 20th ICSV, Bangkok, 7-11 nov., 2013;
- [129] Săvulescu, A., *Controlul vibrațiilor de răspuns la echipamentele tehnologice în regim dinamic de funcționare*, Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galati, 2016;

- [130] Dobrescu C.F., Analiza parametrică reologică a procesului de compactare dinamică a pământurilor în regim controlat de vibrații forțate, „Dezvoltarea durabilă favorabilă incluziunii” Sibiu, 6-7 Noiembrie 2014;

Site-uri internet, cataloage de produse, documentații tehnice

- [1] *** , www.bomag.com accesat la data de 14.03.2018
[2] *** , www.ammann.com accesat la data de 08.02.2018
[3] *** , http://www.cat.com accesat la data de 15.02.2018
[4] *** , www.hamm.com accesat la data de 15.02.2018
[5] *** , ABG Brochure
[6] *** , Bomag Brochure
[7] *** , Catterpillar Brochure
[8] *** , Ammann Brochure
[9] *** , Hamm Brochure
[10] *** , Vogel Brochure

Standarde, normative

- [11] *** , Caietul 1 al Normativului privind îmbunătățirea terenurilor de fundare slabe, prin procedee mecanice, Indicativ C 29/1991. Buletinul construcțiilor nr. 8/1991.
[12] SR 1913-13-83. Teren de fundare. Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor.
[13] *** , Ghid pentru execuția compactării în plan orizontal și înclinat a terasamentelor, Indicativ GE-026-97.
[14] *** , Infrastructura căilor de comunicație terestre.
[15] STAS 1913/6-76 Teren de fundare. Determinarea permeabilitatii in laborator
[16] STAS 8942/1-89. Teren de fundare. Determinarea compresibilității pământurilor prin încercarea în edometru.
[17] STAS 8942/3-90. Teren de fundare. Determinarea modulului de deformație liniară prin încercări pe teren cu placa.
[18] STAS 8942/6-75 Teren de fundare. Incercarea Pamanturilor La Compresiune Monoaxiala.
[19] STAS 9850-89. Lucrări de îmbunătățiri funciare. Verificarea compactării terasamentelor.
[20] STAS 1913/1-82. Teren de fundare. Determinarea umidității.
[21] STAS 1913/2-76. Teren de fundare. Determinarea densității scheletului pamântului.
[22] STAS 1913/15-75. Teren de fundare. Determinarea greutateii volumice, pe teren.
[23] CP D.02.22–2016 “Regulament privind lucrările de stabilizare a pământurilor cu stabilizatori pe bază de compuși organici naturali polienzimici”, Ediție oficială. Chișinău, 2016.