

**MODELAREA PRIN METODE AVANSATE DE CALCUL A
INTERACȚIUNII CONSTRUCȚIILOR DE ACOSTARE CU PRISMUL
DESCĂRCĂTOR ÎN FUNCȚIE DE SOLUȚIA CONSTRUCTIVĂ
ADOPTATĂ**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat

Prof. univ. dr. ing. Romeo Ciortan

Comisia de îndrumare și integritate academică

Prof. univ. dr. ing. Ana-Maria Grănescu

Prof. univ. dr. ing. Virgil Breabăn

Șef Lucrări dr. ing Cosmin Filip

Student doctorand

Ing. Alexandru-Cristian Ionescu

Cuprins

MOTIVAȚIA CERCETĂRII	3
I. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	5
1.1. Construcțiile portuare de acostare.....	5
1.2. Principalele tipuri de cheuri	5
1.3. Avantaje și dezavantaje	7
1.4. Standardizare și adaptare la condițiile locale.....	8
II. CONTRIBUȚIA PERSONALĂ	9
2.1. Metodologia cercetării	9
2.2. Rezultate și discuții	10
3. Concluzii generale și direcții viitoare de cercetare	14
4. Originalitatea tezei de doctorat	15

Teza de doctorat cuprinde: ▶229 de pagini, din care 48 pagini Stadiul actual al cunoașterii ▶ 90 de figuri, dintre care 49 în Stadiul actual al cunoașterii ▶ 21 de tabele, dintre care 9 în Stadiul actual al cunoașterii ▶ 48 de referințe bibliografice

MOTIVAȚIA CERCETĂRII

Portul Constanța a cunoscut, în ultimii ani, o evoluție semnificativă, consolidându-și poziția de principal hub logistic al regiunii Mării Negre și al Europei de Est. În anul 2023 s-a înregistrat un trafic record de peste 92,5 milioane tone de mărfuri, în creștere cu 22,5% față de anul 2022. Această expansiune a fost determinată în special de contextul geopolitic regional, marcat de conflictul din Ucraina, care a impus reconfigurarea rutelor comerciale.

Din totalul traficului, 71 milioane de tone au reprezentat trafic maritim, iar 22 milioane de tone trafic fluvial, în creștere cu 18%, respectiv 40%, față de anul anterior. O componentă majoră a constituit-o tranzitul cerealelor, care a depășit 36 milioane de tone, dintre care peste 14 milioane provenite din Ucraina

Pentru susținerea acestui volum de activitate, portul a beneficiat de investiții majore în infrastructură, incluzând extinderea rețelei rutiere interne și modernizarea utilităților. De asemenea, sunt planificate proiecte în valoare de peste 476 milioane de euro pentru anii următori. Una din aceste investiții va fi realizarea de noi cheuri portuare.

Calculul cheurilor se realizează pe baza normativelor și a ghidurilor tehnice de proiectare. Până la apariția și accesibilizarea programelor de calcul pe baza metodei elementelor finite (MEF), dimensionarea se efectua printr-un calcul simplificat, dar suficient pentru asigurarea stabilității structurale. Aceste verificări vizau în special: lunecarea pe fundație, răsturnarea și presiunile transmise către teren.

Avantajele utilizării programelor de calcul bazate pe MEF sunt următoarele:

- Adaptabilitate la forme complexe – MEF permite analizarea structurilor cu geometrii arbitrare, încărcări variabile și condiții de sprijin diverse, fiind potrivită pentru o gamă largă de aplicații.
- Versatilitate ridicată – metoda este aplicabilă în aproape toate domeniile ingineriei: mecanică structurală, transfer termic, mecanica fluidelor, electromagnetism, biomecanică etc.
- Compatibilitate între diferite tipuri de elemente – rețeaua de calcul (mesh-ul) poate conține simultan elemente finite de tipuri și dimensiuni variate, facilitând modelarea fidelă a geometriilor complexe.
- Integrare într-un singur program – MEF poate fi implementată complet într-un pachet software unic, permițând automatizarea etapelor de analiză și eficientizarea procesului de simulare.
- Aproximare de realitatea fizică – modelul matematic obținut reflectă fidel comportamentul structural real, conducând la rezultate precise și relevante pentru proiectare.

Provocări și limitări ale metodei

Aplicarea necorespunzătoare a MEF poate genera erori, cele mai frecvente fiind: alegerea incorectă a limitelor domeniului de calcul, definirea neadecvată a rețelei finite, utilizarea improprie a elementelor de interfață sau adoptarea unor modele de teren prea simplificate.

Având în vedere caracterul neliniar și dependent de timp al comportamentului solului, este esențial ca modelarea proiectelor geotehnice să fie realizată cu un grad ridicat de detaliu. Succesiunea etapelor de construcție trebuie respectată cu strictețe, întrucât ordinea execuției poate influența semnificativ distribuția finală a eforturilor și deformațiilor. Evenimente critice pot apărea nu doar în stadiul final, ci și pe parcursul fazelor intermediare.

Programele moderne bazate pe MEF includ funcționalități pentru modelarea etapizată a construcției și pentru analiza stabilității. În acest context, determinarea factorilor de siguranță este recomandat să se facă prin reducerea progresivă a rezistenței solului, mai degrabă decât prin amplificarea încărcărilor aplicate (cu excepția situațiilor care presupun rezistență nedrenată prestabilită).

În prezent sunt dezvoltate metode conforme cu Eurocod 7, care introduc factori parțiali pentru parametrii materialelor, acțiuni și rezistențe, asigurând o evaluare mai realistă și mai sigură a comportamentului geotehnic.

Deși MEF este un instrument puternic, precizia rezultatelor depinde esențial de înțelegerea fenomenelor fizice implicate și de aplicarea riguroasă a principiilor ingineriei geotehnice. Modelarea incorectă și ignorarea unei analize analitice preliminare pot duce la erori de dimensionare și, implicit, la compromiterea siguranței structurii. În contextul actual, calculul analitic este adesea neglijat în favoarea simulărilor numerice automate, ceea ce poate genera probleme structurale și riscuri pentru siguranța proiectului.

În urma expunerii acestei problematice apare motivația tezei de doctorat:

Scopul principal al acestei teze este realizarea unei analize avansate a comportamentului structural al elementelor portuare, utilizând metoda elementelor finite (MEF) ca instrument de evaluare și optimizare a proiectării, în contextul dezvoltării infrastructurii maritime moderne.

Pentru atingerea acestui obiectiv general, se urmăresc următoarele direcții specifice:

1. Investigarea limitărilor metodelor de calcul structural clasice aplicate construcțiilor portuare și evidențierea riscurilor asociate (ex. subdimensionarea și nerespectarea criteriilor de conformare structurală).
2. Aplicarea metodei elementelor finite în analiza unui model realist de cheu gravitațional, utilizând un program specializat (ex. Plaxis), pentru a simula comportamentul sub diverse tipuri de solicitări.
3. Compararea rezultatelor obținute prin calcul analitic tradițional cu cele provenite din simulări numerice, pentru evaluarea acurateței și relevanței fiecărei metode.
4. Formularea unor recomandări tehnice pentru modelarea avansată și proiectarea sigură a structurilor portuare, bazate pe concluziile analizei.

CUVINTE CHEIE: Cheuri gravitaționale, infrastructură portuară, modelare prin element finit

I. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII

1.1. Construcțiile portuare de acostare

Construcțiile portuare destinate acostării – precum cheiurile, apunamentele și duc-d'albii reprezintă elemente esențiale ale infrastructurii maritime. Rolul lor fundamental este de a facilita desfășurarea operațiunilor portuare prin asigurarea unor condiții optime de ancorare, fixare și exploatare în siguranță a navelor, atât pentru manipularea mărfurilor, cât și pentru transferul de pasageri.

Aceste structuri îndeplinesc funcția vitală de legătură fizică între navă și platforma portuară, constituind punctul în care fluxul logistic maritim se intersectează cu infrastructura terestră. În anumite situații, ele preiau și rolul de sprijin al terenului din spatele platformei, contribuind la stabilizarea amplasamentului și prevenirea alunecărilor sau a tasărilor terenului

Cheul este definit ca o construcție care oferă o linie continuă de acostare pentru nave. Segmentul unde nava este legată se numește front de acostare. Atunci când linia de acostare nu este continuă, structura poartă denumirea de apunament, iar dacă este destinată transportului de pasageri, devine debarcader.

Pentru ancorarea navelor în puncte independente din zona portuară, se folosesc duc-d'albi, construcții izolate ce servesc drept puncte de prindere suplimentare. Acestea sunt amplasate strategic pentru a proteja navele împotriva șocurilor mecanice produse în timpul manevrelor de acostare. În plus, în anumite configurații portuare moderne, se utilizează și cheiuri plutitoare, realizate sub formă de pontoane conectate la mal prin pasarele articulate, oferind o soluție flexibilă și eficientă pentru acostarea navelor de dimensiuni mai mici.

În cazul porturilor maritime unde volumul anual de mărfuri manipulate depășește 500 t/ml de front de acostare, se impune adoptarea unor soluții constructive robuste, precum cheiurile cu profil vertical. Deși acestea presupun consumuri mari de materiale și costuri ridicate, avantajul lor major constă în facilitarea manevrelor de acostare și optimizarea fluxurilor logistice

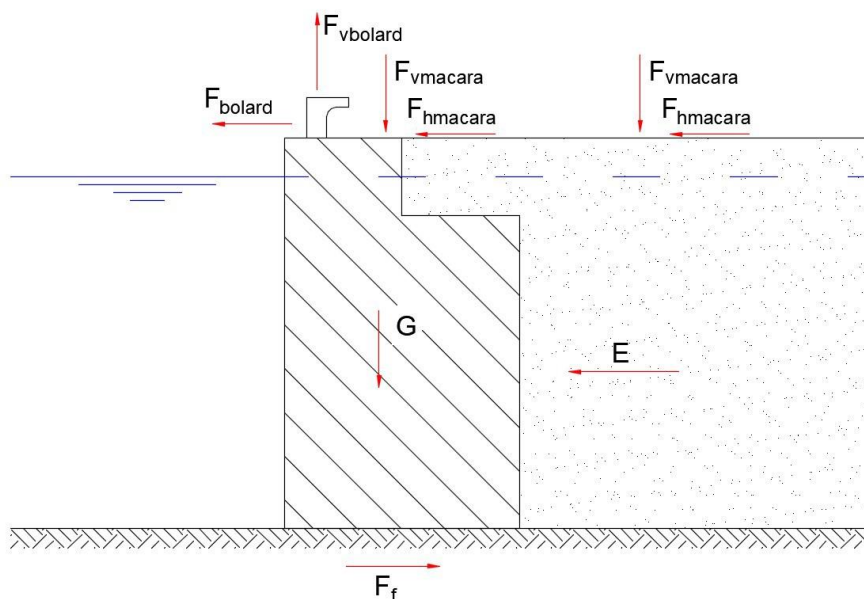
1.2. Principalele tipuri de cheuri

Tipologia construcțiilor de acostare este variată și depinde de factori precum:

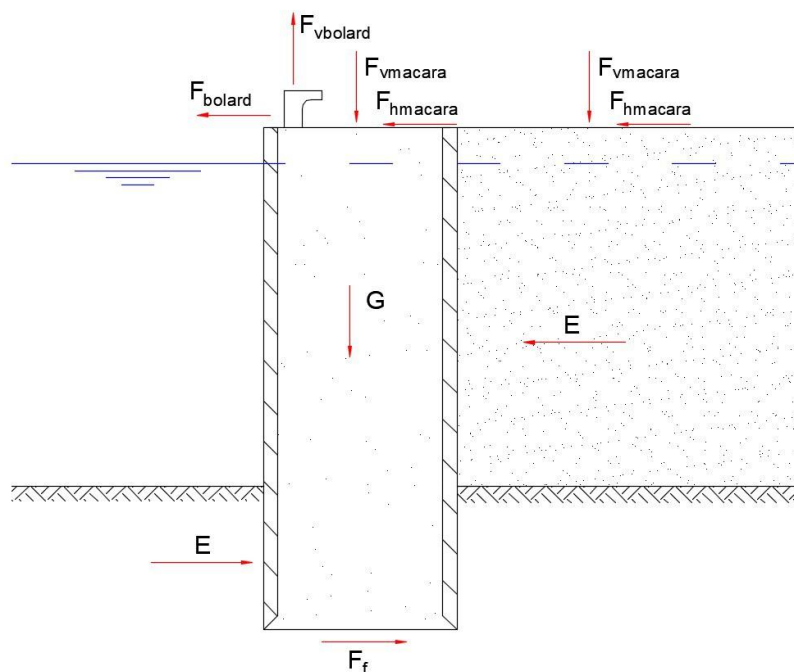
- tipul de mărfuri manipulate (uscate, lichide, containere etc.);
- caracteristicile geotehnice ale terenului de fundare;
- regimul hidrodinamic (curenți, valuri, maree);
- nivelul de solicitare structurală;
- volumul estimat de trafic;
- resursele economice și tehnice disponibile.

Printre cele mai utilizate tipuri de cheuri se numără:

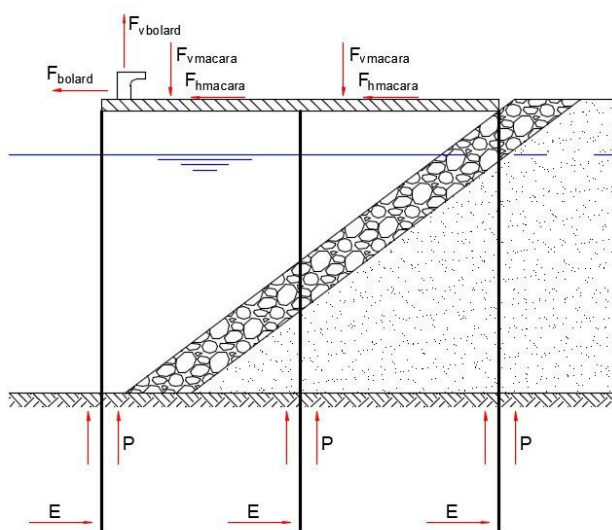
1. **Cheuri gravitaționale** – structuri masive care asigură stabilitatea prin greutatea proprie, sprijinind umplutura din spatele cheului (Figură I.1).
2. **Cheuri din chesoane** – bazate pe același principiu al greutății proprii, dar executate printr-o tehnologie diferită, folosind elemente prefabricate (Figură I.2).
3. **Cheuri de tip estacadă** – unde platforma portuară este sprijinită pe piloți ce transmit încărcările către straturi mai rezistente ale terenului (Figură I.3).
4. **Cheuri din pereți subțiri** – realizate din palplanșe metalice, utilizate frecvent pentru porturi de dimensiuni medii sau ca soluții temporare (Figură I.4).



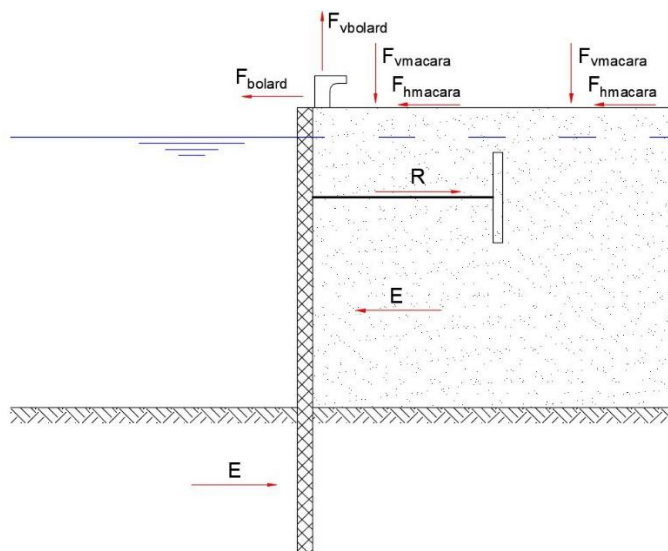
Figură I.1: Cheu gravitațional



Figură I.2: Cheu din chesoane



Figură I.3: Cheu de tip estacadă



Figură I.4: Cheu din pereți subțitri.

1.3. Avantaje și dezavantaje

Fiecare tip de cheu prezintă atât avantaje, cât și limitări. Nu există o soluție universal valabilă, iar alegerea tipului optim depinde de condițiile locale de teren, adâncimile de acostare, tipul de trafic portuar și de resursele economice disponibile.

De exemplu, cheiurile gravitaționale oferă durabilitate și robustețe, dar presupun costuri mari și consumuri ridicate de materiale. Cheiurile de tip estacadă sunt mai economice în zone cu adâncimi mari, însă necesită o bună cunoaștere a terenului de fundare pentru a evita probleme de stabilitate. Cheiurile din palplanșe pot fi montate rapid și sunt flexibile, dar au o durată de viață mai scurtă și rezistență structurală limitată.

1.4. Standardizare și adaptare la condițiile locale

În Uniunea Europeană, proiectarea și execuția structurilor portuare se realizează conform **Eurocodurilor** și normativelor internaționale elaborate de organizații precum **PIANC** sau **CIRIA**. Piața materialelor de construcții este armonizată, asigurând accesul la standarde comune de procesare și distribuție în majoritatea statelor membre.

Cu toate acestea, implementarea unei soluții utilizate într-un port de referință, precum Rotterdam, în alt context – de exemplu, în Portul Constanța – nu este simplă. Deși porturile deservește nave similare ca dimensiuni și adâncimi de acostare, diferențele de experiență în execuție, alături de **particularitățile geotehnice ale amplasamentului**, fac dificilă replicarea unei soluții constructive identice.

Astfel, **adaptarea la condițiile locale** devine un criteriu esențial în proiectarea unui cheu. Alegerea soluției optime presupune o analiză complexă a factorilor tehnici, economici și operaționali, care vor fi detaliați în capitolul următor: *Factorii care stau la baza dimensionării unui cheu*.

În proiectarea pentru stările limită ultime, acțiunilor reprezentative li se aplică factori parțiali. În cazul acțiunilor permanente, acești factori țin cont de caracterul lor fie favorabil (stabilizator), fie nefavorabil (destabilizator).

Atunci când mai multe acțiuni variabile se manifestă simultan alături de acțiunile permanente, celor suplimentare li se aplică factori de combinație (cu valori subunitare), reducând astfel efectele cumulate. În această abordare, una dintre acțiunile variabile este considerată acțiune principală, iar celelalte sunt tratate ca acțiuni însoțitoare, reflectând probabilitatea redusă ca toate efectele maxime să apară simultan. În cazul acțiunilor provenite din aceeași sursă, acestea sunt analizate împreună – fie ca acțiuni principale, fie ca acțiuni însoțitoare – și pot fi considerate favorabile sau nefavorabile, în funcție de situație.

Eurocodul 7, dedicat proiectării geotehnice, ridică o problemă conceptuală în ceea ce privește clasificarea acțiunilor permanente. De exemplu, presiunea hidrostatică ascensională exercitată de apa subterană sub baza unui perete poate fi interpretată în două moduri:

- favorabilă, atunci când reduce presiunea de contact asupra fundației;
- nefavorabilă, atunci când scade rezistența la alunecare sau la răsturnare.

În mod similar, presiunea laterală exercitată de apa subterană asupra peretelui este, în general, considerată nefavorabilă. Pentru a gestiona aceste situații ambigue, codul permite clasificarea ambelor presiuni fie ca favorabile, fie ca nefavorabile, proiectarea bazându-se ulterior pe condiția cea mai defavorabilă.

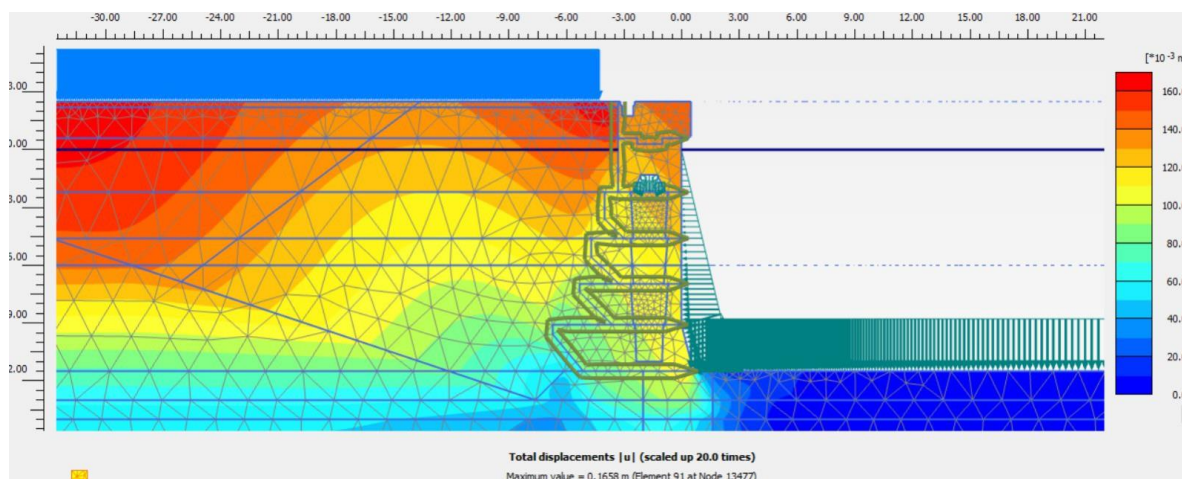
Acțiunile ce trebuie luate în considerare depind de specificul fiecărui proiect, dar, în general, includ:

- acțiunea valurilor;
- presiunile exercitate de pământ;
- acțiuni asupra platformei (inclusiv suprasarcini și încărcări provenite de la macarale);
- acțiuni de acostare (berthing);
- acțiuni de ancorare (mooring);
- acțiunea seismică;

Cercetarea a constatat în modelarea prin metoda elementului finit a acestui cheu și calibrarea și validarea acestuia.

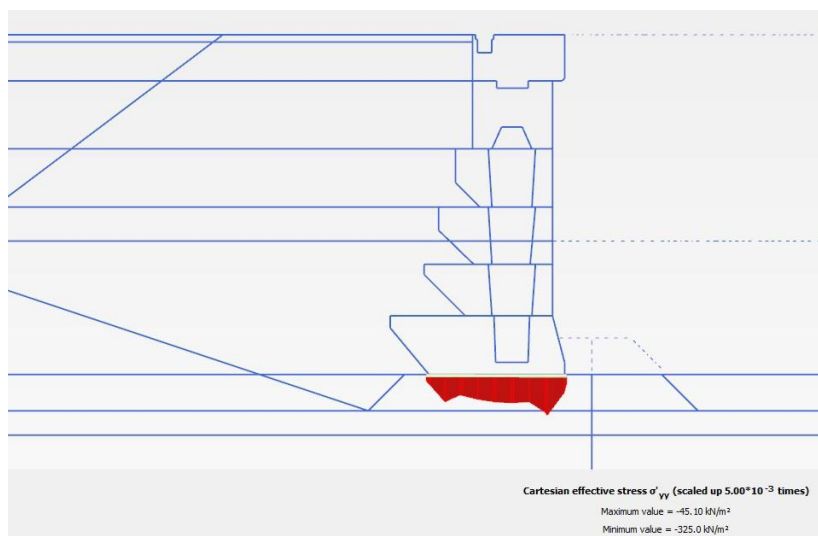
2.2. Rezultate și discuții

Pentru testarea modelului s-a aplicat o forță uniform distribuită pe teren de 40 kPa, corespunzătoare stării normale de exploatare a construcției portuare. În urma acestei încărcări, pentru Starea Limită de Serviciu (SLS), s-a obținut următoarea deformare:



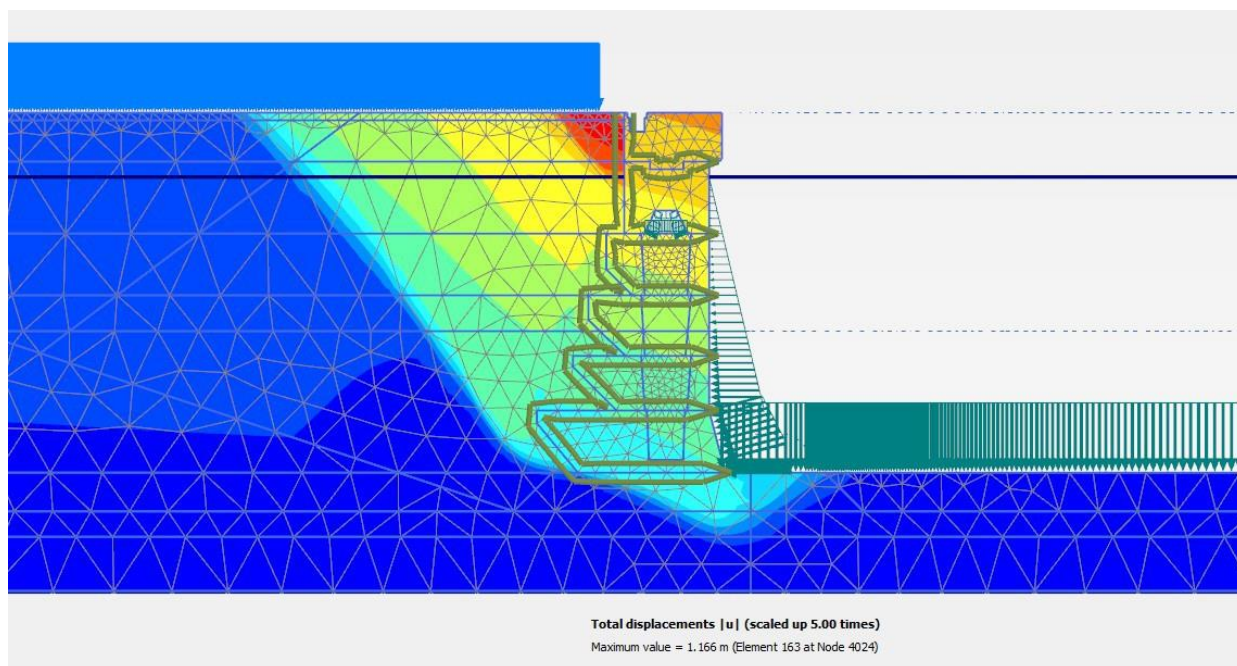
Figură II.2: Deformata cheului

Prin rularea acestei analize se pot determina deplasările și eforturile. Prin atribuirea unei încărcări uniform distribuite pe platformă de 4 t/m², corespunzătoare sarcinii normale de exploatare a cheului, se pot citi rezultatele obținute. Un aspect interesant îl constituie distribuția presiunilor pe patul de fundare. Aceasta nu este perfect liniară, precum în calculul analitic, însă valoarea maximă pe partea dinspre apă este de 325 kPa, iar pe partea dinspre uscat de 220 kPa. Aceste valori sunt foarte apropiate de cele indicate în vechile breviere de calcul. Presiunea obținută este ilustrată în Figura II.3:

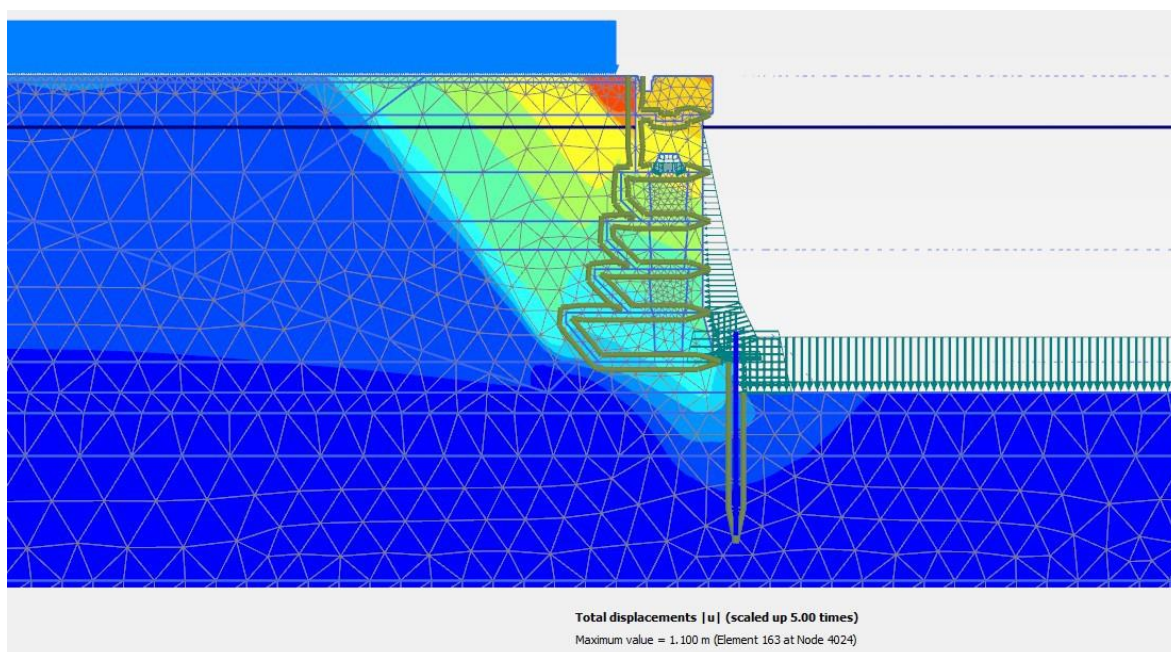


Figură II.3: Presiuni pe patul cheului.

Similar cazului simplificat, au fost introduse etapele de forare a pilotului, dragaj și injectare. Din acest model s-a urmărit inițial obținerea planului de alunecare. Pentru comparație, s-a efectuat mai întâi o analiză globală de stabilitate, care a indicat un factor de siguranță de aproximativ 1,20. Prin urmare, s-a impus menținerea acestui nivel de siguranță. După introducerea injectării și a pilotului, factorul final de siguranță obținut a fost 1,18, valoare care confirmă faptul că structura este sigură. Analiza de stabilitate a urmărit să evidențieze dacă adâncimea pilotului este suficientă pentru menținerea planului de alunecare inițial. Cele două planuri de alunecare obținute prin metoda de reducere ϕ -c sunt prezentate în următoarele figuri:

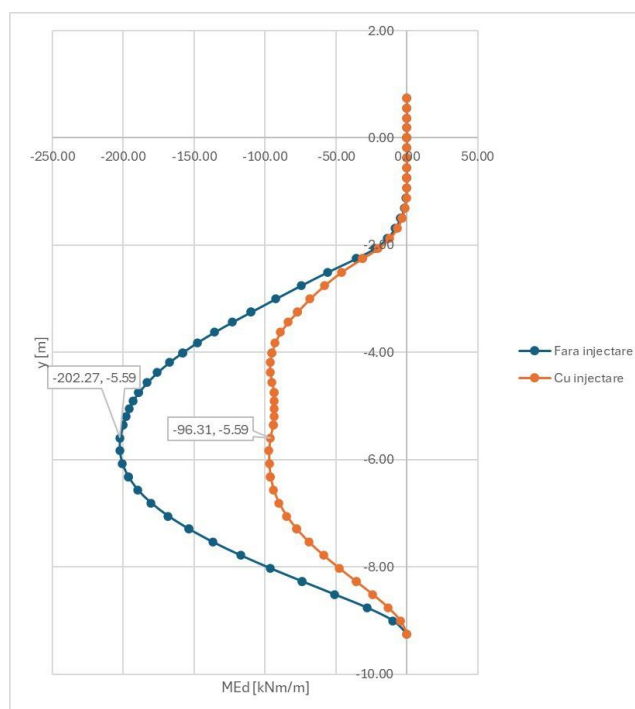


Figură II.4: Planul de lunecare inițial



Figură II.5: Planul de lunecare final.

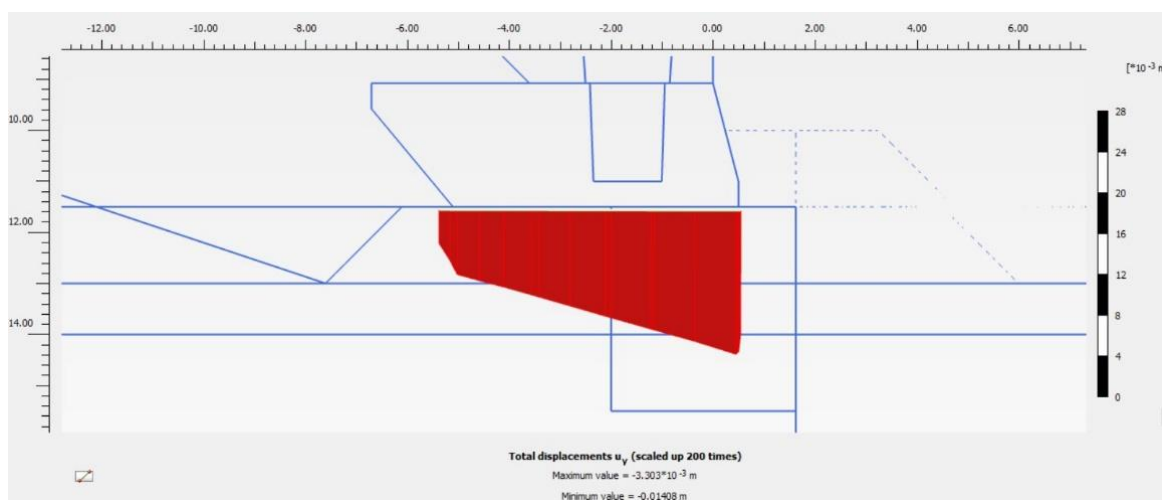
Confirmarea faptului că modelul este calibrat pe baza vechilor breviate de calcul și că lungimea pilotului este suficientă a permis trecerea la etapa de dimensionare a acestuia. Pentru un cheu nou, dimensionarea a fost realizată în conformitate cu principiile prevăzute de Eurocod, utilizând abordarea de calcul 3.



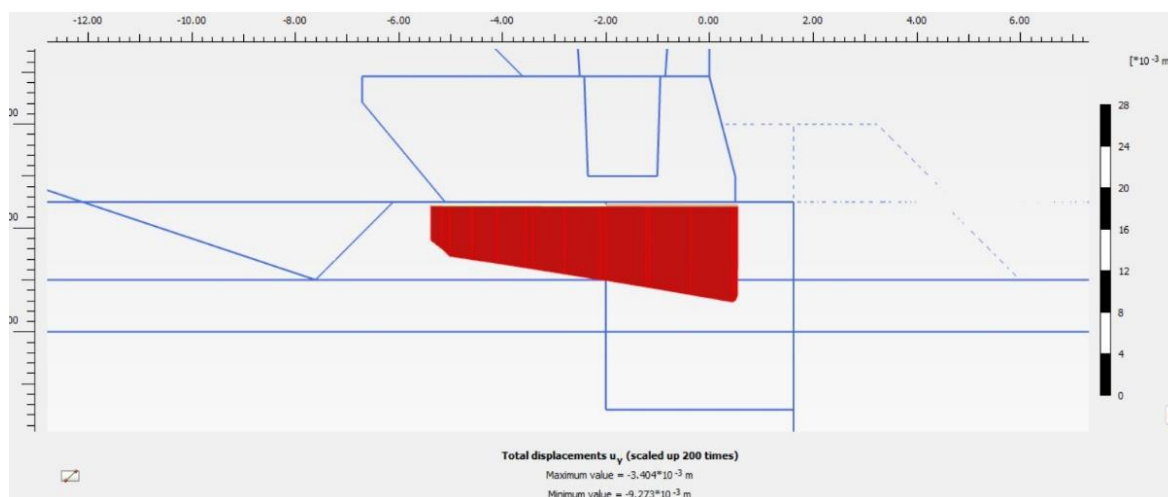
Figură II.6: Momente obținute în pilot

Rezultatele obținute, atât pentru modelul cu injectare, cât și pentru cel fără injectare, confirmă valorile determinate prin metoda simplificată de calcul. Acestea evidențiază în mod clar problematica analizată. Modelarea avansată, împreună cu utilizarea unui model constitutiv adecvat, demonstrează că valorile rezultate sunt mai apropiate de comportarea reală a sistemului, iar momentele determinate reflectă mai fidel realitatea structurală.

Deformația în SLS, cu încărcarea de exploatare de 40 kPa, este ilustrată pentru pilotul fără injectare în Figură II.7 și Figură II.8.



Figură II.7: Tasări fără injectare.



Figură II.8: Tasări cu injectare.

Reducerea finală a deformațiilor este de aproximativ 5 mm. Deși această valoare nu este foarte mare, trebuie menționat că patul de piatră este deja tasat și întărit prin ciclurile repetate de încărcare/descărcare. În ceea ce privește pilotul, rezultatele sunt mai evidente: momentele reduse permit determinarea corectă a armării. Aceste deplasări foarte mici demonstrează că adâncirea cheului este posibilă fără a-i perturba funcționalitatea, iar prin acest procedeu inovativ se asigură o durată de viață extinsă a construcției. Calculul complet al modelului cu element finit este prezentat în Anexa Suport a tezei.

Un rezultat esențial al acestei analize este confirmarea faptului că Metoda Elementului Finit (MEF) reprezintă un instrument robust și fiabil pentru analiza structurilor portuare de acostare. Dacă metodele clasice oferă o bază utilă pentru verificări preliminare, acestea nu surprind întotdeauna distribuția reală a tensiunilor, tasărilor și interacțiunilor teren–structură. Prin contrast, modelarea numerică permite integrarea simultană a mai multor factori (geotehnici, hidraulici și dinamici), conducând la o înțelegere mai fidelă a comportamentului structural.

În cadrul acestui studiu au fost abordate mai multe metode. Într-o primă etapă, s-au utilizat presiunile preluate din vechile brevii de calcul, care au stat la baza dimensionării inițiale a cheului. Pornind de la aceste presiuni, s-a realizat un model simplificat, în care terenul a fost reprezentat ca material elastic cu criteriul de cedare Mohr–Coulomb. Rezultatele au indicat momente în piloți relativ mari, de aproximativ 420,5 kNm/m.

Pentru modelul în care au fost simulate toate etapele de execuție și în care s-a utilizat un model de teren mai avansat, momentul s-a redus la jumătate. Aceasta diferență semnificativă poate conduce la o economisire substanțială a proiectului, în special în ceea ce privește consumul de armătură. Ulterior, armarea pilotului a fost dimensionată conform criteriilor minime de armare prevăzute în normativele și standardele din România.

Studiile efectuate pe modelul de cheu gravitațional analizat au arătat că MEF confirmă tendințele rezultate din calculele analitice, dar scoate în evidență și aspecte suplimentare, precum concentrarea eforturilor în zone critice, efectul etapizării execuției și comportamentul nelinier al terenului. Aceste rezultate demonstrează robustețea metodei și capacitatea acesteia de a valida sau corecta soluțiile obținute prin calcule simplificate.

3. Concluzii generale și direcții viitoare de cercetare

Lucrarea de doctorat a avut ca obiectiv analiza avansată a comportamentului structurilor portuare de acostare, cu accent pe cheiurile gravitaționale din Portul Constanța și pe modul în care acestea răspund cerințelor de siguranță, stabilitate și exploatare. Rezultatele obținute confirmă importanța combinării metodelor clasice de calcul cu instrumentele moderne de modelare numerică pentru a obține soluții tehnice viabile și economic eficiente.

Principalele concluzii sunt:

1. Diversitatea soluțiilor constructive – Cheiurile gravitaționale, cele din palplanșe, de tip estacadă sau flexibile prezintă fiecare avantaje și limitări. Alegerea soluției optime trebuie adaptată la condițiile locale, în special la caracteristicile geotehnice și la încărcările portuare.
2. Limitele calculului analitic – Metodele clasice, deși esențiale pentru validare, nu surprind complexitatea reală a interacțiunii teren–structură și pot genera erori semnificative.
3. Valoarea adăugată a modelării numerice – Metoda Elementului Finit (MEF) permite evaluarea realistă a tasărilor, eforturilor și zonelor critice, evidențiind comportamentul nelinear al terenului și influența etapizării execuției.
4. Confirmarea prin calibrare – Compararea rezultatelor modelării cu datele din breviare și normative a arătat o corespondență bună, fapt ce validează utilizarea MEF ca instrument robust și fiabil în proiectarea portuară.
5. Impactul economic – Diferențele de momente obținute prin modelare față de calculul simplificat pot conduce la reduceri semnificative ale consumului de armătură și materiale, ceea ce se traduce în economii substanțiale pentru proiectele de investiții.

Recomandări practice:

- Integrarea obligatorie a modelării numerice în paralel cu verificările analitice pentru toate proiectele portuare majore.
- Realizarea unor investigații geotehnice detaliate, care să reducă incertitudinile și să asigure fundamentarea corectă a modelelor de calcul.
- Adaptarea soluțiilor constructive la specificul local și la resursele disponibile, evitând preluarea directă a unor modele externe (ex. Rotterdam) fără validare în condițiile Portului Constanța.
- Monitorizarea structurilor existente pentru calibrarea continuă a modelelor de calcul și prevenirea apariției unor situații critice.
- Alinierea proiectării portuare la strategiile europene privind transportul sustenabil și protecția mediului, în contextul creșterii importanței rețelei TEN-T și a coridoarelor logistice internaționale.

În ansamblu, concluzia generală este că modernizarea infrastructurii portuare românești nu poate fi realizată fără o abordare științifică riguroasă, bazată pe utilizarea metodelor avansate de calcul și pe o înțelegere aprofundată a interacțiunilor teren–structură. Lucrarea demonstrează că MEF nu reprezintă doar un instrument suplimentar, ci o necesitate pentru proiectarea durabilă, sigură și economic optimă a porturilor viitorului.

4. Originalitatea tezei de doctorat

Originalitatea prezentei teze constă în abordarea integrată și aplicativă a problematicii structurilor portuare de acostare, cu accent pe cheiurile gravitaționale din Portul Constanța. Spre deosebire de alte lucrări consacrate, această cercetare nu se limitează la prezentarea teoretică a soluțiilor constructive, ci propune o **corelare directă între calculele analitice, modelarea numerică și condițiile reale din teren.**

Contribuții originale majore:

1. **Analiza critică a limitelor metodelor clasice** – Teza demonstrează, prin comparație, că utilizarea exclusivă a breviarelor și a metodelor simplificate poate conduce la soluții nesigure sau ineficiente economic.
2. **Modelare detaliată prin MEF** – A fost realizată o simulare complexă, care a integrat stratigrafia terenului, caracteristicile geotehnice, etapele de execuție și acțiunile portuare, oferind o imagine realistă asupra comportării structurale.
3. **Validare prin calibrare** – Rezultatele modelării au fost comparate și corelate cu valorile clasice din normative și breviare, confirmând robustețea metodei propuse și utilitatea ei în practica inginerescă.
4. **Impact economic și tehnic** – Diferențele obținute între momentele calculate analitic și cele rezultate prin MEF au arătat potențialul de optimizare a consumului de materiale și de reducere a costurilor, fără compromiterea siguranței structurale.
5. **Direcții aplicative pentru Portul Constanța** – Teza nu se limitează la o analiză teoretică generală, ci oferă recomandări concrete pentru proiectarea și modernizarea infrastructurii portuare românești, adaptate la specificul geotehnic și la resursele locale.

Valoarea științifică și practică:

- Din punct de vedere științific, lucrarea contribuie la dezvoltarea cunoașterii în domeniul interacțiunii teren–structură pentru construcțiile portuare și oferă un cadru metodologic aplicabil și altor porturi maritime sau fluviale.
- Din punct de vedere practic, rezultatele pot fi utilizate ca suport pentru proiectanți, autorități portuare și investitori, în vederea fundamentării unor decizii de modernizare a infrastructurii critice.
- Prin articolele și lucrările publicate, teza are deja un impact în mediul academic și profesional, confirmând relevanța și aplicabilitatea rezultatelor obținute.

În concluzie, originalitatea cercetării constă în integrarea metodelor clasice și moderne de calcul într-un demers aplicativ adaptat la condițiile Portului Constanța, în demonstrarea avantajelor utilizării MEF pentru proiectarea structurilor portuare și în formularea de recomandări practice, validate științific și tehnic, care pot ghida investițiile viitoare în infrastructura strategică a României și a regiunii Mării Negre.

Bibliografie selectivă

1. Ciortan R. *Porturi și amenajări portuare*. AGIR, București, România, 2012.
2. Ciorbea V. *Portul Constanța 1896–1996*. Editura Fundației Andrei Șaguna, Constanța, România, 1996.
3. Ciortan R. *Construcții hidrotehnice portuare*. AGIR, București, România, 1st edition, 2009.
4. Ciortan R. *Porturi maritime și fluviale*. Editura Tehnică, București, România, 1984.
5. Young I.R., Verhagen L.A. *The growth of fetch-limited waves in water of finite depth. Part 1: Total energy and peak frequency*. Coastal Engineering, 29:47–48, 1996.
6. Ackhurst M. *Design of Vertical Gravity Sea and Quay Walls*. ICE Publishing, Londra, Regatul Unit, 2020.
7. Verruijt A. *Soil Mechanics*. TU Delft, Delft, Olanda, 2001.
de Gijt J.G. *A History of Quay Walls*. Dienst Gemeentewerken Rotterdam, TU Delft, Olanda, 1st international ed., 2010.
8. Consitrans. *Proiect tehnic și detalii de execuție Dana 10–12 Portul Midia*, 2022.
Ionescu A.C., Ciortan R. *The positive effect of relieving structures for gravity quay walls*.
9. Proceedings of the 17th Danube – European Conference on Geotechnical Engineering (17DECGE), 1(1), 2023.
Lopez Gumucio J.P. *Design of quay walls using the finite element method*, 2013.
10. Verruijt A. *Geotechnical software*, 2006.
11. AllPlan Proiect. *Modernizarea și dezvoltarea portului mineralier Galați*, 2021.
CNAPM. *Raport anual*, 2025.
12. Buring P. *Flexibel quay wall structures for container vessels*, 2013.
Trading Line. *Trading line*, 2023.
13. Wells J. *Technical note design of capping beams*, 2010.
14. de Gijt J. *Quay Walls*. CRC Press, Rotterdam, Olanda, 2014.
15. Erhunmwun I., Ikponmwosa U.B. *Review on finite element method*. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 21(5):999–1002, 2017.
16. Brinkgreve R.B.J., Swolfs W.M. *Possibilities and limitations of the finite element method for geotechnical applications*. Delft University of Technology, 2006.
17. EAU. *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways*. 8th ed., EAU, Berlin, Germania, 2004.
18. The Government of Hong Kong Special Administrative Region. *Port Works Design Manual*, GHKSAR, Hong Kong, 2003.
19. Puertos del Estado. *Geotechnical Recommendations for the Design of Maritime and Harbour Works*. V.A. Impresores S.A., Madrid, Spania, 2008.
20. Manea S. *Mecanica Pământurilor*. Editura Conspress, București, România, 2003.
21. Lehr H. *Fundații. Exemple de calcul*. Editura Tehnică, București, România, 1967.
22. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, SUA, 1st edition, 1996.
23. Mononobe N., Matsuo H. *On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes*. Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo, Japonia, 1929.
24. Seed H.B., Whitman R.V. *Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads*. ASCE, New York, SUA, 1970.

25. CUR. *Handbook Quay Walls*. CUR, Gouda, Olanda, 2013.
26. Deltares. *D-Sheet Piling version 9.2, Design of Diaphragm and Sheet Pile Walls*. Deltares, Delft, Olanda, 2011.
27. Covacef P. *Portul Constanța – Portul lui Anghel Saligny*. Administrația Porturilor Maritime SA Constanța, România, 1st edition, 2004.
28. MLPAT. *NP112-2014 – Proiectarea fundațiilor de suprafață*. Ministerul Lucrărilor Publice, București, România, 2014.
29. MLPAT. *Determinarea valorilor caracteristice și de calcul ale parametrilor geotehnici*. Ministerul Lucrărilor Publice, București, România, 2010.
30. MLPAT. *Proiectarea porturilor fluviale*. Ministerul Lucrărilor Publice, București, România, 2007.
31. Bourke P. *Calculating the area and centroid of a polygon*. Paul Bourke.net, 2004.
32. Popovici A., Prișcu R. *Inginerie seismică a construcțiilor de acostare*. Editura Didactică și Pedagogică, București, România, 1980.