



UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI
ȘCOALA DOCTORALĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA
CARACTERISTICILOR MECANICE ALE LIGNITULUI PRIN
UTILIZAREA APLICAȚIILOR INFORMATICE AVANSATE**

Coordonator:

Prof.univ.dr.ing. POPESCU Florin Dumitru

Doctorand:

Ing. CIOCLU Alexandru Robert

2023

Investigarea proprietăților unui masiv prin utilizarea conceptelor specifice mecanicii rocilor este deosebit de importantă în activitatea minieră, de construcții civile, construcții hidrotehnice, industriale sau construcții rutiere. Utilizând teoria mediilor continue, cunoașterea și previziunea comportamentului rocilor este dificilă deoarece acestea sunt medii naturale discontinue, anizotrope și eterogene. Cunoașterea proprietăților unui masiv de roci constituie punctul de pornire în prevederea deformațiilor acestuia atât din punct de vedere cantitativ cât și calitativ.

Din punct de vedere al industriei extractive, fie că ne referim la lucrările miniere de suprafață, fie că ne referim la cele din subteran, cunoașterea proprietăților rocilor permite atât determinarea stabilității acestora cât și stabilirea condițiilor de proiectare și executare.

În ultimii ani se observă pe plan mondial o tendință de utilizare a metodelor numerice de calcul în studiul proprietăților și solicitărilor rocilor fie că este vorba de masive de roci sau de epruvete. Aceste metode sunt complementare determinărilor de laborator atunci când ne referim la simularea comportamentului epruvetelor sau pot constitui modalități directe de determinare a stabilității masivului pe baza proprietăților rocilor care au fost determinate în laborator.

Totodată, simulările numerice bazându-se pe modele virtuale constituie și un suport didactic modern pentru înțelegerea comportamentului rocilor supuse diverselor solicitări mecanice. Din acest motiv am considerat oportună abordarea în cadrul acestei Teze de doctorat a modelării și simulării solicitărilor de compresiune, tracțiune indirectă și directă precum și a celei de forfecare pentru lignit.

Am optat pentru acest tip de rocă deoarece lignitul reprezintă și va continua să rămână un purtător de energie, în pofida politicilor de decarbonizare și restrângere a utilizării combustibililor fosili pentru producerea de energie. Totodată am ținut cont de faptul că zăcămintele de lignit cunoscute se caracterizează printr-o largă variabilitate a proprietăților fizico-mecanice care sunt determinante în alegerea și proiectarea utilajelor folosite pentru extragerea lor.

Teza de doctorat se intitulează *Cercetări privind modelarea și simularea caracteristicilor mecanice ale lignitului prin utilizarea aplicațiilor informatice avansate* și prezintă principalele rezultate științifice, teoretice și experimentale pe care le-am obținut prin parcurgerea stagiului de doctorat.

O dată cu apariția unor noi abordări de cercetare, cunoașterea în domeniul ingineriei rocilor a evoluat semnificativ în ultimele decenii. Cu toate acestea există o multitudine de provocări și o serie de întrebări care nu și-au găsit încă răspunsul. Astfel, este necesară o investigație profundă care presupune abordări teoretice moderne care să constituie

fundamentul unor metode numerice avansate. Din acest punct de vedere, Teza de doctorat este în concordanță cu necesitatea continuă de dezvoltare a cunoașterii și a constituit un efort susținut de a aduce contribuții semnificative în domeniul mecanicii rocilor.

În acest sens în lucrare sunt abordate probleme complexe de mecanica rocilor privind modelarea, simularea și analiza proprietăților mecanice ale lignitului prin intermediul programelor software specializate, care au la bază metoda elementelor finite FEM și metoda elementelor finite discrete FDEM.

Metoda Elementelor Finite Discrete (FDEM sau DEM-FEM) reprezintă o abordare numerică avansată, utilizată pentru a simula comportamentul sistemelor compuse din materiale discrete și materiale continue. Această metodă combină două tehnici de analiză: Metoda Elementelor Finite (FEM) și Metoda Elementelor Discrete (MDE) permițând astfel modelarea detaliată a interacțiunilor între particulele discrete și mediile continue.

FDEM reprezintă un instrument puternic pentru cercetătorii și inginerii care doresc să studieze și să înțeleagă comportamentul materialelor discrete și interacțiunile acestora cu mediile continue. Această metodă este valoroasă în rezolvarea unor probleme complexe și interdisciplinare dintr-o varietate de domenii.

Metoda elementelor finite discrete este folosită într-o gamă variată de aplicații, inclusiv geotehnică (studii de teren, alunecări de teren), ingineria civilă (analiza fundațiilor, comportamentul pământului), industria minieră (comportamentul rocilor și mineralelor), medicină (simularea fracturilor osoase) și multe altele.

În cadrul metodei FDEM, materialele discrete sunt reprezentate sub forma unor particule individuale sau elemente discrete. Aceste particule pot reprezenta obiecte solide, particule granulare sau alte componente. Elementele continue reprezintă materialele continue cum ar fi solidul sau fluidul și sunt modelate utilizând Metoda Elementelor Finite (FEM). FEM este folosită pentru a descrie comportamentul materialelor într-un mediu continuu. FDEM permite simularea detaliată a interacțiunilor dintre particulele discrete și elementele continue. Aceste interacțiuni pot include coliziuni, contacte, fricțiuni și alte fenomene complexe.

Simulările FDEM sunt computațional intensive deoarece necesită urmărirea mișcărilor individuale ale particulelor discrete. Eficiența și acuratețea simulărilor trebuie echilibrate, iar timpul de calcul poate fi semnificativ în funcție de complexitatea sistemului.

Pentru a efectua simulări FDEM, cercetătorii și inginerii utilizează software specializate care oferă instrumente pentru configurarea, simularea și analiza rezultatelor. Unele programe includ capacitatea de a combina FDEM cu FEM pentru a modela interacțiuni complexe.

Analiza geomecanică a rocilor cu ajutorul Metodei Elementelor Finite Discrete (FDEM) implică utilizarea acestei tehnici numerice pentru a modela comportamentul rocilor în diferite scenarii și condiții. FDEM permite simularea detaliată a interacțiunilor între particulele discrete și elementele continue. Aceasta este o abordare numerică care vizează înțelegerea răspunsului rocilor la forțele externe, inclusiv încărcările naturale (cum ar fi greutatea rocilor acoperitoare) și cele induse de activitățile umane (cum ar fi excavații, construcții etc.)

Folosind Metoda Elementelor Finite Discrete pentru analiza geomecanică a rocilor se poate obține o înțelegere mai profundă a comportamentului acestora sub diferite condiții și încărcări, ceea ce poate fi deosebit de util în diferite domenii precum construcții, minerit, ingineria geotehnică sau protecția mediului.

În acest context, pentru modelarea și simulare caracteristicilor de rezistență ale lignitului a fost utilizat software-ul specializat IRAZU 2D de la firma canadiană GEOMECHANICA care are implementată Metoda Elementelor Finite Discrete. În vederea determinării comportamentului geomecanic al lignitului utilizând FDEM, primul pas a constat în crearea modelului. Acest model a trebuit să includă geometria rocii, proprietățile materialului, condițiile limită și alți factori relevanți.

Pentru efectuarea simulărilor FDEM a fost necesară definirea proprietăților mecanice ale rocilor cum ar fi rezistența de rupere la tracțiune, modulul de elasticitate, coeficientul lui Poisson, densitatea volumetrică și coeficientul de frecare internă. Aceste proprietăți influențează modul în care rocile se comportă în simulare.

Au fost introduse condițiile inițiale ale sistemului, cum ar fi pozițiile și vitezele inițiale ale elementelor discrete. De asemenea, au fost setate condițiile de frontieră pentru a specifica modul în care sistemul interacționează cu mediul extern (de exemplu, dispozitive fixe sau încărcări aplicate). Prin rularea simulărilor cu ajutorul FDEM s-au putut observa fisurările, alunecările și alte fenomene geomecanice, precum și modul în care rocile interacționează sub încărcări în condițiile specificate.

Teza de doctorat este structurată în șase capitole care sunt subdivizate în subcapitole în conformitate cu logica internă de ierarhizare a problemelor tratate.

Capitolul 1 intitulat *NOȚIUNI TEORETICE REFERITOARE LA EXPLOATAREA ZĂCĂMINTELOR DE MINERALE PRIN LUCRĂRI LA ZI* prezintă în sinteză aspectele teoretice ale exploatărilor miniere la zi. Exploatarea zăcămintelor de minerale prin lucrări la zi este o activitate complexă care implică extragerea resurselor minerale din subteran prin lucrări realizate la suprafața Pământului. Această metodă de exploatare se aplică atunci când zăcămintele se află la adâncimi relativ mici și nu necesită excavații subterane. Exploatarea

zăcămintelor de minerale prin lucrări la zi este o activitate care necesită atenție la detalii precum și planificarea și gestionarea responsabilă a resurselor. Este important să se țină cont de aspectele teoretice și practice pentru a asigura o exploatare eficientă și sustenabilă a acestor resurse.

În cadrul **Capitolului 2** intitulat *NOȚIUNI TEORETICE REFERITOARE LA PROPRIETĂȚILE ȘI MECANICA ROCILOR* se evidențiază faptul că proprietățile și mecanica rocilor sunt subiecte importante în domeniul ingineriei miniere deoarece ele influențează comportamentul rocilor în diferite condiții de exploatare având implicații semnificative în activitatea de proiectare a lucrărilor miniere. Aceste noțiuni teoretice oferă o bază pentru înțelegerea proprietăților și comportamentului rocilor în diferite contexte geologice și de inginerie. Se arată că înțelegerea proprietăților și mecanicii rocilor este esențială în evaluarea riscurilor geotehnice, dar și la proiectarea structurilor eficiente, explorarea și exploatarea resursele naturale precum mineralele și combustibilii fosili.

Capitolul 3 care are titlul *METODA ELEMENTELOR FINITE DISCRETE* prezintă în amănunt principiile teoretice care stau la baza acestei metode numerice de simulare. Se evidențiază faptul că aceasta reprezintă o tehnică numerică utilizată pentru a simula comportamentul particulelor discrete în mediul lor înconjurător. Această metodă este adesea folosită în domenii precum mecanica granulară, geotehnică, știința materialelor, geomecanică, inginerie minieră, etc. Astfel Metoda Elementelor Finite Discrete a devenit un mecanism esențial în cercetare și dezvoltare, fiind utilizată într-o gamă largă de domenii, contribuind la înțelegerea și proiectarea sistemelor care implică particule discrete. Tot în cadrul acestui capitol sunt prezentate o serie de elemente legate de utilizarea aplicației Irazu, aplicație care este destinată să simuleze o serie de solicitări din domeniul geomecanicii pe baza principiilor teoriei elementelor finite discrete.

Simularea încercărilor de rezistență la compresiune monoaxială este abordată în cadrul **Capitolului 4** care se intitulă *SIMULAREA ÎNCERCĂRILOR DE REZISTENȚĂ LA COMPRESIUNE FĂRĂ CONSTRÂNGERE LATERALĂ UCS A LIGNITULUI UTILIZÂND METODA ELEMENTELOR FINITE DISCRETE*. Pentru realizarea acestei simulări a fost creat în aplicația SOLIDWORKS modelul care a fost supus simulării. Acest model este constituit din epruvetă și două plăci de compresiune. S-a optat pentru construirea modelului în SOLIDWORKS deoarece Irazu are un mediu de desenare mai puțin prietenos cu utilizatorul. Modelul astfel realizat a fost importat în aplicația Irazu unde au fost identificate părțile componente, părți cărora li s-au stabilit proprietățile materialelor. O etapă ulterioară simulării a fost cea legată de stabilirea condițiilor de frontieră. Astfel, placa superioară este fixă iar placa inferioară se deplasează ascendent cu o viteză constantă. Am respectat astfel modelul

presei din cadrul Laboratorului de Mecanica Rocilor al Universității din Petroșani. Înainte de efectuarea calculelor de simulare au fost stabiliți numărul pașilor de integrare, dimensiunea unui pas de integrare precum și numărul de pași după care are loc actualizarea informației grafice. După efectuarea calculelor corespunzătoare acestei simulări rezultatele obținute au fost prezentate atât prin intermediul aplicației Irazu cât și prin intermediul aplicației ParaView. Deoarece această aplicație pune la dispoziția utilizatorului un filtru programabil, am implementat o secvență de program (script) realizat în limbajul Python care permite calculul direct al unei serii de parametrii în funcție de pasul de timp al integrării. Implementarea și “Rularea” secvenței de program conduce la salvarea rezultatelor obținute într-un fișier compatibil Excel.

În **Capitolul 5** intitulat *SIMULAREA ÎNCERCĂRILOR DE REZISTENȚĂ LA TRACȚIUNE A LIGNITULUI UTILIZÂND METODA ELEMENTELOR FINITE DISCRETE* am realizat simularea la tracțiune indirectă (Test brazilian) și simularea la tracțiune directă. Pentru simularea la tracțiune directă am luat în considerare două situații distincte: simularea teoretică la tracțiune directă în care extremitățile epruvetei virtuale se deplasează în sensuri opuse supunând epruveta la o tracțiune teoretică și situația în care epruveta este prinsă în lateral cu două dispozitive de prindere care se vor deplasa în sensuri opuse realizând astfel simularea la întindere directă de tip laborator. Ca și în cazul simulării la compresiune uniaxială am construit modelele supuse simulării în aplicația SOLIDWORKS am atribuit caracteristicile materialelor specifice epruvetei, respectiv plăcilor pentru testul brazilian și cleștilor pentru testul la întindere directă de tip laborator. Ulterior am stabilit condițiile de frontieră și parametrii de calcul. Rezultatele obținute în urma efectuării calculelor au fost prezentate atât prin intermediul aplicației Irazu cât și cu ajutorul aplicației ParaView.

În **Capitolul 6** al Tezei intitulat *SIMULAREA ÎNCERCĂRILOR DE REZISTENȚĂ LA FORFECARE A LIGNITULUI UTILIZÂND METODA ELEMENTELOR FINITE DISCRETE* este tratată problema simulării la forfecare a lignitului. La începutul capitolului sunt prezentate o serie de elemente teoretice referitoare la metoda de determinare a rezistenței la forfecare după un plan de rupere obligat. Deoarece modelul virtual care a fost supus simulării în aplicația Irazu respectă modelul fizic utilizat în cadrul Laboratorului de Mecanica Rocilor al Universității din Petroșani pentru început am efectuat în aplicația SOLIDWORKS un studiu al cinematicii solicitării la forfecare. Am determinat astfel relația dintre viteza de ridicare a bacului inferior și cea de translație a bacului superior pentru diverse unghiuri de înclinare dintre acestea. Ca și în cazul simulărilor precedente modelul virtual supus simulării a fost realizat în aplicația SOLIDWORKS, acesta fiind constituit din epruveta virtuală și cele două bacuri. Au fost stabilite caracteristicile materialelor din care este constituit modelul virtual,

condițiile de frontieră și parametrii de calcul. După efectuarea calculelor rezultatele obținute au fost prezentate și analizate atât prin intermediul aplicației Irazu cât și cu ajutorul aplicației ParaView.

Simulările efectuate au constituit procese complexe și intense din punct de vedere computațional. S-au furnizat astfel informații utile despre comportamentul acestui tip de rocă prin simularea încercărilor amintite anterior. Simularea comportamentului lignitului la solicitarea de compresiune monoaxială, tracțiune indirectă și directă precum și la forfecare a presupus pentru început crearea modelelor virtuale care au fost constituite din epruvete cilindrice sau sub formă de pișcot și plăci de compresiune sau clești de prindere.

După importul acestor modele în aplicația Irazu au fost identificate componentele fiecărui model și au fost stabilite pentru fiecare componentă caracteristicile materialelor constitutive. O atenție deosebită a fost acordată proprietăților epruvetelor pentru care proprietățile mecanice ale lignitului cum ar fi modulul de elasticitate, coeficientul lui Poisson și rezistența de rupere au reprezentat valori medii experimentale determinate în laborator. Aceste valori au fost obținute din date experimentale pentru a asigura o simulare realistă.

Cu ajutorul simulărilor s-a putut urmări comportamentul epruvetelor de lignit sub sarcină, de la primele stadii de deformare și până la rupere, detectându-se momentul în care între particulele apar primele fisuri, urmărindu-se astfel evoluția acestora până la rupere.

După finalizarea simulării au fost analizate rezultatele pentru a obține informații despre rezistența la compresiune monoaxială, la tracțiune, respectiv la forfecare a lignitului. Acest lucru a inclus determinarea efortului maxim atins în timpul simulării și evaluarea comportamentului la rupere a lignitului.

Rezultatele simulării au fost comparate cu datele experimentale determinate în laborator obținându-se astfel o concordanță foarte bună între simulare și realitate.