
UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI MINE, PETROL ȘI GAZE

Ing. SORINEL POPESCU

TEZĂ DE DOCTORAT REZUMAT

Conducător științific
Prof.univ.dr.ing. *RADU Sorin Mihai*

PETROȘANI
2023

UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI MINE, PETROL ȘI GAZE

Ing. SORINEL POPESCU

TEZĂ DE DOCTORAT

ANALIZA STABILITĂȚII GOLURILOR ȘI RISCURILE MINIERE DIN
EXPLOATĂRILE DE SARE ÎN SOLUȚIE DIN ROMÂNIA, ÎN VEDEREA
UTILIZĂRII ACESTORA CA DEPOZITE SUBTERANE

Conducător științific
Prof.univ.dr.ing. *RADU Sorin Mihai*

PETROȘANI
2023

INTRODUCERE ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

CAPITOLUL 1. ASPECTE GENERALE PRIVIND DEPOZITAREA ÎN FORMAȚIUNI GEOLOGICE ÎN
 CONTEXTUL DEZVOLTĂRII TEHNOLOGIILOR CCS DE REDUCERE A EMISIILOR DE CO₂ ERROR!
 BOOKMARK NOT DEFINED.

1.1. PREZENTARE GENERALĂ A DEPOZITĂRII GLOBALEError! Bookmark not defined.
 1.1.1. Câmpuri de petrol și gaze**Error! Bookmark not defined.**
 1.1.2. Formațiuni saline**Error! Bookmark not defined.**
 1.1.3. Depozitarea CO₂ în caverne și mine**Error! Bookmark not defined.**
 1.1.4. Straturile de cărbune neexploatabile**Error! Bookmark not defined.**
 1.1.5. Mine de cărbuni abandonate**Error! Bookmark not defined.**
 1.1.6. Caverne de sare.....**Error! Bookmark not defined.**

1.2. IMPLEMENTAREA TEHNOLOGIEI CCS ÎN ROMÂNIAError! Bookmark not defined.

CAPITOLUL 2. CARACTERIZAREA GEOMECANICĂ A SĂRII DIN ROMÂNIA . ERROR! BOOKMARK NOT
 DEFINED.

2.1. ZĂCĂMINTELE DE SARE DIN ROMÂNIA, EXPLOATATE PRIN DIZOLVARE ..Error! Bookmark not
 defined.

2.1.1. Zăcămintul Ocele Mari**Error! Bookmark not defined.**
 2.1.2. Zăcămintul Cacica.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.1.3. Zăcămintul Ocna Mureș.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.1.4. Zăcămintul Târgu Ocna.....**Error! Bookmark not defined.**

2.2. PROPRIETĂȚI FIZICEError! Bookmark not defined.

2.2.1. Greutatea specifică.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.2.2. Greutatea specifică aparentă – volumică**Error! Bookmark not defined.**
 2.2.3. Porozitatea**Error! Bookmark not defined.**
 2.2.4. Cifra porilor**Error! Bookmark not defined.**
 2.2.5. Umiditatea**Error! Bookmark not defined.**

2.3. PROPRIETĂȚI MECANICEError! Bookmark not defined.

2.3.1. Rezistența de rupere la compresiune monoaxială**Error! Bookmark not defined.**
 2.3.2. Rezistența de rupere la tracțiune**Error! Bookmark not defined.**
 2.3.3. Rezistența de rupere la forfecare.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.3.4. Coeziunea și unghiul de frecare interioară.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.3.5. Caracteristici de rezistență determinate prin solicitări triaxiale**Error! Bookmark not defined.**

2.4. CARACTERISTICI DE DEFORMARE A SĂRIIError! Bookmark not defined.

2.4.1. Modulul de elasticitate static, E,**Error! Bookmark not defined.**
 2.4.2. Coeficientul și constanta lui Poisson, μ , m **Error! Bookmark not defined.**
 2.4.3. Caracteristici elastice determinate dinamic.....**Error! Bookmark not defined.**
 2.4.4. Caracterizarea fenomenului de compresibilitate - dilatanța a sării geme.....**Error! Bookmark not defined.**

2.5. CARACTERISTICI REOLOGICE ALE SĂRII.....Error! Bookmark not defined.

CAPITOLUL 3. METODE DE EXPLOATARE A SĂRII PRIN SONDE DE DIZOLVARE . ERROR! BOOKMARK
 NOT DEFINED.

3.1. EXPLOATAREA CU INECȚIE LA TAVAN ȘI RIDICĂRI IN TREPTE	Error! Bookmark not defined.
3.2. EXPLOATAREA CU INECȚIE LA TAVAN SI RIDICARI CONTINUE.....	Error! Bookmark not defined.
3.3. EXPLOATAREA CU INECȚIE INTERMEDIARA DE APA	Error! Bookmark not defined.
3.4. SONDE INDIVIDUALE CU O COLOANA MOBILA	Error! Bookmark not defined.
3.5. SONDE IN BATERIE.....	Error! Bookmark not defined.
3.6. CONSTRUCȚIA SONDELOR	Error! Bookmark not defined.
3.6.1. Aspecte tehnice privind construcȚia și exploatarea sondelor	Error! Bookmark not defined.
3.7. ETAPELE DE CONSTRUIRE	Error! Bookmark not defined.
3.7.1. Forarea coloanei de ancoraj	Error! Bookmark not defined.
3.7.2. Tubarea coloanei de ancoraj	Error! Bookmark not defined.
3.7.3. Cimentarea coloanei de ancoraj	Error! Bookmark not defined.
3.7.4. Verificarea etanșeității coloanei de ancoraj	Error! Bookmark not defined.
3.7.5. Forarea găurii pentru exploatare	Error! Bookmark not defined.
3.8. PRACTICA INGINEREASCĂ ÎN EXPLOATAREA SĂRII PRIN DIZOLVARE DIN ROMÂNIA .	Error! Bookmark not defined.

CAPITOLUL 4. ETANȘEITATEA CAVERNELOR DE SARE..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

4.1. CARACTERISTICI TEHNICE ALE CAVERNELOR DE SARE.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.1. Presiunea produsului.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.2. Gradientul de presiune	Error! Bookmark not defined.
4.1.3. Fluajul cavernei	Error! Bookmark not defined.
4.1.4. Încălzirea saramurii	Error! Bookmark not defined.
4.1.5. Permeabilitatea sării.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.6. Temperatura putului.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.7. Presiunea de testare.....	Error! Bookmark not defined.
4.2. TESTE DE INTEGRITATE IN CAVERNELE DE SARE.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.1. Testul de integritate cu azot (NLT).....	Error! Bookmark not defined.
4.2.2. Testul de integritate cu motorină (FLT).....	Error! Bookmark not defined.
4.2.3. Fenomene tranzitorii declanșate de test	Error! Bookmark not defined.
4.2.4. Efecte externe	Error! Bookmark not defined.
4.2.5. Compresibilitatea cavernei	Error! Bookmark not defined.
4.2.6. Urmărirea neetanșeității cavernelor	Error! Bookmark not defined.

CAPITOLUL 5. NOȚIUNI TEORETICE PRIVIND STABILITATEA MASIVULUI DE SARE ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

5.1. COMPORTAMENTUL MECANIC AL SĂRII.....	Error! Bookmark not defined.
5.1.1. Formarea structurilor de sare	Error! Bookmark not defined.
5.1.2. Plasticitatea, microfisurarea și ruperea sării	Error! Bookmark not defined.
5.1.3. Curba caracteristică tensiune – deformare	Error! Bookmark not defined.
5.1.4. Mecanismele și legile fluajului sării geme.....	Error! Bookmark not defined.
5.1.5. Fracturarea	Error! Bookmark not defined.
5.2. SCHEME DE EVALUARE A STABILITĂȚII ROCILOR	Error! Bookmark not defined.
5.2.1. Clasificarea rocilor după Terzaghi.....	Error! Bookmark not defined.
5.2.2. Indicele de desemnare a calității rocii (Rock quality design index-RQD).....	Error! Bookmark not defined.

5.2.3. Evaluarea structurii rocilor (RSR)	Error! Bookmark not defined.
5.2.4. Clasificare Geomecanică sau sistemul Rock Mass Rating (RMR)	Error! Bookmark not defined.
5.2.5. Indicele calității rocilor, Q	Error! Bookmark not defined.
5.2.6. Indicele de rezistență geologică (GSI)	Error! Bookmark not defined.
5.3. MODELE MATEMATICE DE EVALUARE A STĂRII DE TENSIUNE	Error! Bookmark not defined.
5.3.1. Criteriul de rupere Hoek- Brown	Error! Bookmark not defined.
5.3.2. Criteriul Mohr- Coulomb	Error! Bookmark not defined.
5.4. APLICAREA CRITERIULUI HOEK-BROWN PENTRU SAREA DE LA TG.OCNA	Error! Bookmark not defined.
5.5. INTELIGENȚA ARIFICIALĂ IN MECANICA ROCILOR	Error! Bookmark not defined.
5.5.1. Rețeaua neuronală artificială (ANN)	Error! Bookmark not defined.
5.5.2. Fușia Fuzzi	Error! Bookmark not defined.
5.5.3. Algoritmi genetici (GA)	Error! Bookmark not defined.
5.5.4. Predicțiile proprietăților mecanice ale rocii folosind AI	Error! Bookmark not defined.
5.5.5. Predicții de stabilitate folosind AI	Error! Bookmark not defined.
5.5.6. Predictionarea GSI prin ANN-Artificial Neural Network	Error! Bookmark not defined.
5.6. CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE	Error! Bookmark not defined.
CAPITOLUL 6. ANALIZA DE STABILITATE A CAVERNELOR PE MODELE 3D. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
6.1. INTRODUCERE	Error! Bookmark not defined.
6.2. MODELUL FLAC 3D PENTRU ANALIZA DE STABILITATE A CAVERNELOR ..	Error! Bookmark not defined.
6.2.1. Pasul 1: Definierea obiectivelor pentru analiza modelului	Error! Bookmark not defined.
6.2.2. Pasul 2: Crearea unei imagini conceptuale a sistemului fizic	Error! Bookmark not defined.
6.2.3. Pasul 3: Construirea și rularea modelelor simple idealizate	Error! Bookmark not defined.
6.2.4. Pasul 4: Asamblarea datelor specifice problemei	Error! Bookmark not defined.
6.2.5. Pasul 5: Pregătirea modelelor detaliate	Error! Bookmark not defined.
6.2.6. Pasul 6: Efectuarea calculelor modelului	Error! Bookmark not defined.
6.2.7. Pasul 7: Interpretarea rezultatelor	Error! Bookmark not defined.
6.3. MODELUL 3D LA SCARĂ PENTRU MĂSURAREA DEFORMAȚIILOR CAVERNEI PRESURIZATE	Error! Bookmark not defined.
6.3.1. CONSTRUCȚIA MODELULUI	Error! Bookmark not defined.
6.3.2. MĂSURAREA DEFORMAȚIILOR	Error! Bookmark not defined.
CAPITOLUL 7. RISCURILE ȘI MANAGEMENTUL RISCURILOR LA DEPOZITAREA CO₂ ÎN CAVERNELE DE SARE	
7.1. ETAPE CADRU PENTRU EVALUAREA RISCURILOR	Error! Bookmark not defined.
7.1.1. Selectarea și caracterizarea site-ului	Error! Bookmark not defined.
7.1.2. Identificarea riscului	Error! Bookmark not defined.
7.1.3. Evaluarea vulnerabilității	Error! Bookmark not defined.
7.1.4. Identificarea pericolelor : Principalele căi potențiale de scurgere de CO ₂	Error! Bookmark not defined.
7.2. MENEAGEMENTUL RISCURILOR. MONITORIZARE ȘI VERIFICARE	Error! Bookmark not defined.
7.2.1. Interpretarea semnalelor ecografice	Error! Bookmark not defined.
7.2.2. Testarea integrității cavernei	Error! Bookmark not defined.

7.2.3. Vizualizarea și analiza de forajError! Bookmark not defined.

7.2.4. Vizualizarea și editarea mai multor caverneError! Bookmark not defined.

7.3. MĂSURĂTORI CAVERNOMETRICE IN SONDELE DE LA TÂRGU OCNA-GURA SLĂNIC Error! Bookmark not defined.

7.4. RISCURI POSIBILE LA DEPOZITAREA CO₂ ÎN MINELE DE SARE (Dinescu, 2021).Error! Bookmark not defined.

CAPITOLUL 8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

BIBLIOGRAPHY..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

În lucrarea de față, mi-am propus identificarea diferitelor aspecte privind riscurile miniere din exploatarea de sare din România, prin analiza stabilității golurilor ce se formează în urma exploatarea sării prin dizolvare, în vederea utilizării acestora ca depozite subterane.

La baza alegerii acestei teme de cercetare, au stat mai multe criterii după cum urmează :

- **Motivația personală.** Fiind absolvent al Facultății de Mine din Petroșani, promoția 1985, am pornit la drum ca stagiar la mina Livezeni, într-un moment de maximă intensitate în industria minieră, apoi, ca proiectant la Institutul de Cercetări și Proiectări Miniere ICSITPML Craiova. Visul și cariera de inginer miner se puteau încheia în anul 2000, odată cu închiderea unui număr critic de exploatarea miniere din toate bazinele din țară. În pofida acestui fapt, activitatea de cercetare din cadrul Universității din Petroșani, a susținut idealurile multor ingineri, printre care mă număr și eu, prin deschiderea unor nișe de cercetare pentru noi activități în minierul românesc, cum ar fi utilizarea cavernelor de sare ca depozite subterane. Am considerat că tema de față este de actualitate și răspunde nu numai unor deziderate generale, dar și angajamentelor României ca țară membră UE față de obiectivele de reducere a emisiilor de CO₂. Cavernele rezultate în urma exploatarea sării în soluție, pot deveni din simple goluri umplute cu saramură, consumatoare de resurse financiare pentru menținerea lor în conservare, în veritabile depozite subterane aducătoare de venituri.
- **Contextul european.** Uniunea Europeană a elaborat un pachet de măsuri legislative sub numele „Pregătiți pentru 55 în 2030”, pentru reducerea emisiilor până în 2030 de la 40% la 55%, făcând din atingerea neutralității climatice până în 2050 o obligație legală. Captarea și stocarea carbonului au fost recunoscute și în România, ca o modalitate de a reduce emisiile, mai ales din industria energetică în condițiile păstrării cărbunului ca sursă majoră de producere a energiei. Potențialul de stocare a CO₂ în România a fost identificat ca fiind relativ ridicat. Capacitatea totală de stocare estimată pentru România este de 18,6 Gt în acvifere saline de adâncime și 4,0 Gt în zăcămintele de hidrocarburi epuizate (sursa: proiect EU GeoCapacity, Raport WP2 – Capacitate de stocare). Creșterea capacității de stocare, în opinia noastră, se poate face prin utilizarea golurilor subterane rezultate în urma exploatarea sării prin dizolvare.

- **Resursele materiale și financiare disponibile.** Prin schema UE de comercializare a certificatelor de emisii (*ETS*), companiile trebuie să achiziționeze prin licitație aceste certificate de emisii, corespunzător cantităților de CO₂ emise. Schema de comercializare a certificatelor de emisii este prima și cea mai mare piață de dioxid de carbon la nivel global și rămâne cea mai mare astfel de piață. Această piață, reglementează aproximativ 40 % din totalul emisiilor de gaze cu efect de seră din Uniune și se aplică pentru aproximativ 10 000 de centrale electrice și fabrici de producție. Planul Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare 2022-2027 (PNCDI IV), aprobat de curând de Guvernul României, prevede cca. 60 miliarde de lei pentru transfer tehnologic și stimularea parteneriatelor între institute naționale de cercetare, sau între organizațiile de cercetare și mediul privat românesc.
- **Metode de cercetare folosite.** Au fost folosite metoda documentării prin care s-au căutat soluțiile aplicate în țările cu tradiție în domeniu și metoda experimentală. Metoda experimentală este o metodă de bază în cercetarea științifică, și a fost aplicată pentru a obține o minicavernă prin dizolvare într-un bloc de sare de dimensiuni reduse (400x400x1200mm), în vederea presurizării acesteia și măsurarea deformațiilor. Rezultatele experimentale au fost comparate cu rezultatele simulării pe un model 3D, cu ajutorul FLAC 3D.

Lucrarea a fost structurată pe trei părți:

PARTEA I-a

Prima parte, se referă la CARACTERIZAREA GEO-FIZICĂ ȘI MECANICA a masivelor de sare din Romania, prin prezentarea geologiei, a proprietăților fizice, mecanice și reologice, METODELE DE EXPLOATARE, în deosebi a zăcămintelor de sare cu exploarea prin soluție, cu recomandarea zăcământului de sare de la Tg.Ocna, județul Bacău. Având în vedere noua destinație de depozite, a cavernelor de sare rezultate prin dizolvare, am prezentat caracteristicile tehnice ale acestora, necesare pentru obținerea, măsurarea și umărirea ETANȘEITĂȚII CAVERNELOR, condiție obligatorie pentru orice depozit de gaze sau lichide. Prima parte, este structurată pe 4 capitole după cum urmează :

Capitolul 1. ASPECTE GENERALE PRIVIND DEPOZITAREA ÎN FORMAȚIUNI GEOLOGICE ÎN CONTEXTUL DEZVOLTĂRII TEHNOLOGIILOR CCS DE REDUCERE A EMISIILOR DE CO₂. Dezvoltarea tehnologiilor de capturare și stocare a carbonului pentru reducerea emisiilor de CO₂, a devenit o preocupare globală, iar în acest context am arătat stadiul de dezvoltarea și implementare în țara noastră al tehnologiilor CCS.

Capitolul 2. CARACTERIZAREA GEOMECHANICĂ A SĂRII DIN ROMÂNIA. Cunoașterea detaliată a condițiilor de geologice (adâncime și aport de apă, proprietăți fizice mecanice și elastice) de zăcământ, conduc la posibilitatea predicției comportamentului mecanic al sării în timp, cât mai real și deci cât mai probabil, ceea ce va permite luarea unor decizii adecvate și în final la reducerea riscurilor.

Capitolul 3. METODE DE EXPLOATARE A SĂRII PRIN SONDE DE DIZOLVARE. În acest capitol sunt prezentate metodele de exploatare a sării prin prisma practicilor

ingineresti din România. Sunt prezentate aspectele tehnice privind construcția și exploatarea sondelor de dizolvare a sării, cât și verificarea etanșeității coloanelor de ancoraj.

Capitolul 4. ETANȘEITATEA CAVERNELOR DE SARE. Sunt prezentate caracteristicile tehnice cât și testele standard necesare în evaluarea etanșeității cavernelor. Capitolul este bazat pe literatura de specialitate din țările unde depozitarea diferitelor gaze sau hidrocarburi are istoric. Testele de integritate mecanică (MIT) pentru cavernele de stocare a sării sunt utilizate pentru a determina starea puțurilor de acces la cavernă și integritatea sistemului de stocare a fluidelor sau a gazelor.

PARTEA a-II-a

Partea a-II-a, în care am prezentat BAZA TEORETICĂ PRIVIND STABILITATEA MASIVULUI de sare și studiu de caz pentru zăcămintul de sare TG.OCNA- Perimetrul Gura Slănic. De asemenea sunt prezentate noțiuni privind inteligența artificială, stadiul de cunoaștere și folosirea AI în mecanica rocilor.

Capitolul 5. NOȚIUNI TEORETICE PRIVIND STABILITATEA MASIVULUI DE SARE.

Pentru predicția stabilității în timp a cavernei, se impune ca pe lângă o cunoaștere cât mai reală a caracteristicilor geomecanice și o determinare valorică a stării naturale de tensiune a masivului de sare și ulterior executării lucrării miniere, determinarea stării secundare de tensiune, determinări ce se fac pe bază de ipoteze. Sunt preluate din literatura de specialitate aspecte cu privire la fluajul sării. Sunt prezentate scheme de evaluare a stabilității rocilor, utilizarea lor poate fi destul de benefică în elaborarea unui proiect, mai ales în faze preliminare când sunt disponibile mai puține informații despre proprietățile fizico-mecanice ale rocilor, și caracteristicile hidrologice ale acestora. Pentru calculul ingineresc ca instrument de proiectare și de verificare al structurilor, sunt prezentate două (cele mai uzuale) dintre modelele matematice de evaluare a stării de tensiune : Mohr-Coulomb și mai nou Hoek-Brown. Cercetările au arătat că problemele legate de mecanica rocilor/geoinginerie, sunt foarte legate de insuficiența datelor specifice site-ului. Prin urmare, s-a încercat să se rezolve această problemă prin metode de predicție bazate pe inteligență artificială (AI). Sunt prezentate câteva aspecte teoretice și exemple de aplicare.

PARTEA a-III-a

Partea a-III-a, reprezintă scopul acestei lucrări, ca prin aplicarea metodelor ANALIZEI STABILITĂȚII CAVERNELOR PE MODELE 3D și interpretarea rezultatelor să aduc contribuții la înțelegerea și modul de calcul ingineresc privind determinarea caracteristicilor tehnice de etanșitate ale cavernelor de sare, în noua lor destinație de depozite subterane. Prezentarea RISCURILOR POSIBILE LA DEPOZITAREA CO₂ în aceste caverne, cu cazuri preluate din literatura de specialitate din țările cu experiență în domeniu, nu face decât să completeze modelul de lucru și modul de abordare a unei astfel de teme în proiectarea inginerescă.

Capitolul 6. ANALIZA DE STABILITATE A CAVERNELOR PE MODELE 3D. Cu toate că în mod tradițional, metodele numerice (metode analitice, metode numerice de bază,

metoda elementului finit (FEM), metoda elementelor distincte (DEM), metode hibride, metode numerice, etc.) au fost utilizate pentru a evalua stabilitatea construcțiilor subterane, efectuarea analizei în laborator sau pe teren este necesară pentru confirmarea rezultatelor celorlalte metode, în pofida faptului că metoda este foarte greoaie, consumatoare de timp și costisitoare. În acest capitol se prezintă construcția modelului la scară a unei caverne cu caracteristici cunoscute (amplasament, adâncime, formă și dimensiuni). Pe lângă cele prezentate mai sus, construcției unui model 3D la scară a dat posibilitatea măsurării deformațiilor pe pereții exteriori ai cavernei presurizate prin tensiometrie cu timbre tensiometrice. Valorile măsurărilor au fost comparate cu cele rezultate din analiza de stabilitate a cavernei utilizat de FLAC 3D pentru problema fluajului radial al unui cilindru infinit de lung, cu pereți groși.

Capitolul 7. RISCURILE ȘI MANAGEMENTUL RISCURILOR LA DEPOZITAREA CO₂ ÎN CAVERNELE DE SARE. Evaluarea riscurilor asociate stocării geologice a CO₂ s-a făcut pe baza **standardelor ISO 2009: 31000**, arătând scenariile tipice de eșec în activitatea de stocare a CO₂ sunt scurgerile de-a lungul puțului, distrugerea capului de sondă și scurgeri prin defecte și fracturi existente sau induse. Monitorizarea prezentată în acest capitol, este realizată prin Pachetul software CavInfo Software Suite creat de *SOCON Sonar Control Kavernenvermessung GmbH* și este special conceput pentru analiza și afișarea cavelor individuale și a câmpurilor de caverne.

Capitolul 8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.

Scopul acestei lucrări, prezentat în partea a-III-a, a fost ca prin aplicarea metodelor ANALIZEI STABILITĂȚII CAVERNELOR PE MODELE 3D și interpretarea rezultatelor să aduc contribuții la înțelegerea și modul de calcul ingineresc privind determinarea caracteristicilor tehnice de etanșitate ale cavelor de sare, în noua lor destinație de depozite subterane.

Prezentarea RISCURILOR POSIBILE LA DEPOZITAREA CO₂ în aceste caverne, cu cazuri preluate din literatura de specialitate din țările cu experiență în domeniu, nu face decât să completeze modelul de lucru și modul de abordare a unei astfel de teme în proiectarea inginerescă.

În ceea ce privește monitorizarea fenomenelor de deformare a terenurilor în cazul salinelor, acestea fiind fenomene discontinue de deformare, sunt dificil de monitorizat și previzionat, deoarece ele apar brusc și la intervale de timp greu de definit. De aceea, singurele posibilități de previziune sunt asigurate de modelarea cu metode numerice, și măsurători cavernometrice periodice pentru monitorizarea deformațiilor din pereții cavelor de sare aflate în conservare sau ca depozite subterane.

Literatura de specialitate prezintă mii de caverne de depozitare care au fost operate în întreaga lume de zeci de ani, consemnând doar un număr mic de scurgeri. Majoritatea scurgerilor au provenit din defectarea coloanei de oțel din cauza supraîntinderii, forfecării, coroziunii, sau oboselii, urmată uneori de pătrunderea gazului prin mantaua de ciment. Pentru prevenirea și reducerea riscurilor provocate de scurgeri, periodic se fac TESTE DE INTEGRITATE, prezentate din prisma valorilor optime pentru mărimile măsurate.

Cu privire la integritatea unei caverne, putem concluziona că o atenție deosebită trebuie acordată integrității puțului și pentru aceasta trebuie avute în vedere următoarele:

- (a) proprietățile fizice, mecanice și elastice ale rocilor gazdă;
- (b) calitatea lucrării de cimentare ;
- (c) arhitectura puțului (adică numărul și lungimea tuburilor cimentate) ;
- (d) natura produselor stocate și
- (e) modificările de presiune și presiune ale produselor stocate.

Caracteristicile rocilor joacă un rol important în proiectarea și exploatarea atât a minelor de suprafață, cât și a celor subterane și necesită o evaluare rapidă și precisă a acestor caracteristici atât pe teren, cât și în laborator, însă, efectuarea acestor analize este foarte greoaie, consumatoare de timp și costisitoare. În plus, este necesar și un nivel ridicat de expertiză. Ca urmare, cercetătorii au propus câteva modele empirice/matematice pentru a estima unele proprietăți mecanice ale rocii indirect sau prin intermediul unor parametri simpli care pot fi măsurați în situ sau în laborator. Acest lucru se datorează faptului că multe metode de IA sunt metode fără ipoteze care nu necesită cunoștințe anterioare sau experți sau reguli specifice, spre deosebire de metodele statistice care pot fi utilizate numai de experți. Metoda AI a câștigat recent teren în diferite domenii ale științelor și ingineriei datorită capacității sale de a rezolva probleme complexe, cum ar fi cele întâlnite în mecanica rocilor.

Metodele AI oferă rezultate mai precise, dar aplicabilitatea lor practică este încă incertă, deoarece este nevoie de repetarea unui astfel de model înainte de a putea fi aplicat. Acest lucru necesită un anumit nivel de expertiză, care poate fi dificil de obținut în rândul utilizatorilor. În subcapitolul INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ ÎN MECANICA ROCILOR, sunt trecute în revistă unele dintre cercetările care au fost efectuate în ultimul deceniu cu privire la aplicarea IA în domeniul mecanicii rocilor, cu scopul de a stabili care dintre abordările AI este cea mai potrivită și cea mai frecvent utilizată în domeniul mecanicii rocilor.

În concluzie, numeroase studii au folosit AI pentru a rezolva diferite probleme de mecanică a rocilor, așa cum s-a discutat în această lucrare, dar există încă unele probleme în aplicațiile lor, de la date insuficiente până la nedisponibilitatea unei forme simple a modelelor pentru utilizatorii.

Prin urmare, cercetările viitoare ar trebui să fie adaptate la utilizarea metodelor avansate de modelare numerică, cum ar fi FEM și DEM, pentru a simula situațiile de teren și pentru a genera suficiente date pentru intrarea în AI.

Modelarea proceselor de georinginerie implică considerente speciale și o filozofie de design diferită de cea urmată în proiectare.

Pentru analiza de stabilitate a cavernei am utilizat modelul FLAC 3D pentru problema *fluajului radial al unui cilindru infinit de lung, cu pereți groși*. Comportamentul la fluaj al materialului este definit de o lege a puterii cu o singură componentă: $\sigma_{cr} = A \cdot \sigma_c^B$

STUDIUL DE CAZ a fost realizat pe o cavernă din perimetru Gura Slănic Tg.Ocna aflată în conservare.

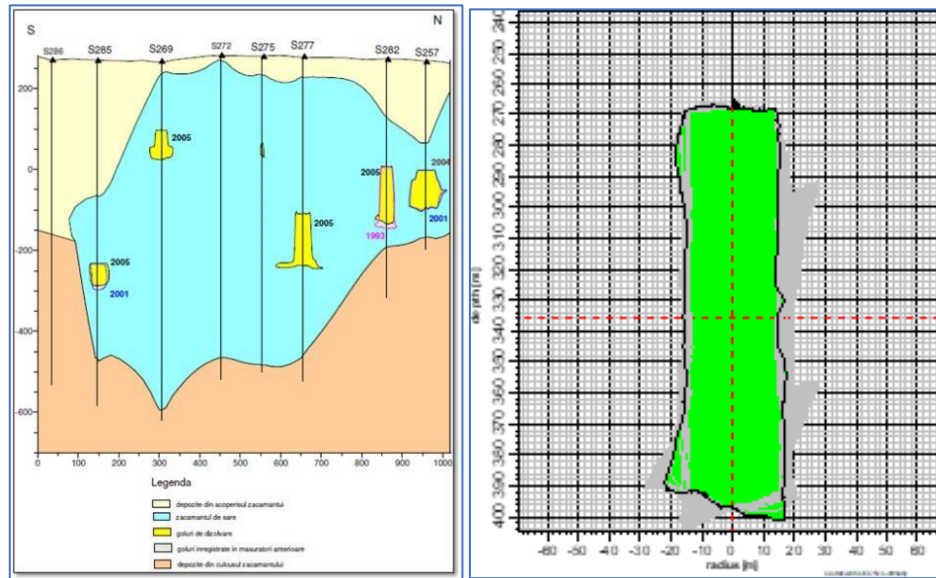


Figura 1. Secțiuni verticale prin caverne de sare din perimetrul Gura Slamic Tg.Ocna

Funcționare cavernei ca depozit pentru stocarea și utilizarea dioxidului de carbon, ar determina schimbări structurale și implicit modificarea stării de echilibru. Această nouă stare, este determinată de cererea pentru produsul stocat (depresurizare la livrare și presurizare la reumplere), ceea ce impune un regim de presiune în cavernă variabil în intervalul (1÷0,1) din presiunea maximă de lucru. Repartizarea tensiunilor în masivul de sare din proximitatea cavernei, în cele două situații limită de presurizare la presiunea de 2,928 Mpa (29 bari), respectiv depresurizare la 0,29 Mpa (3 bari), sunt prezentate în (**Error! Reference source not found.**) și respectiv (**Error! Reference source not found.**).

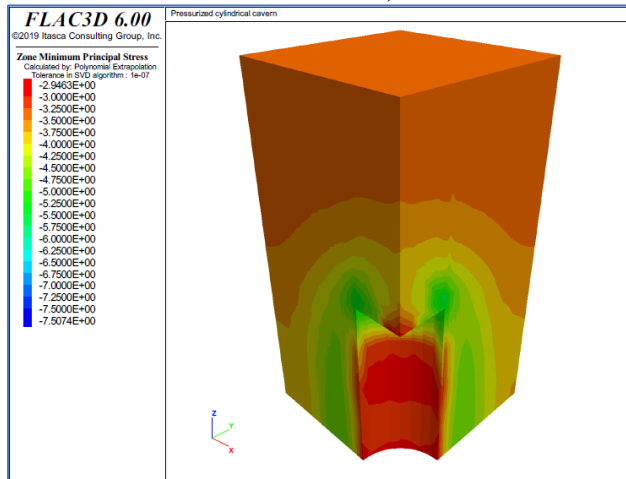


Figura 1. Repartizarea tensiunilor pentru o presurizare a cavernei de $P=2,9\text{Mpa}$

Pentru situația furnizării de produse din cavernă, trebuie să avem în vedere că depresurizarea acestora nu trebuie să fie sub o valoare critică. Această valoare este 2,0258 Mpa și rezultă din repartizarea tensiunii principale minime, în situația ipotetică de

depresurizare ”zero” (Error! Reference source not found.).

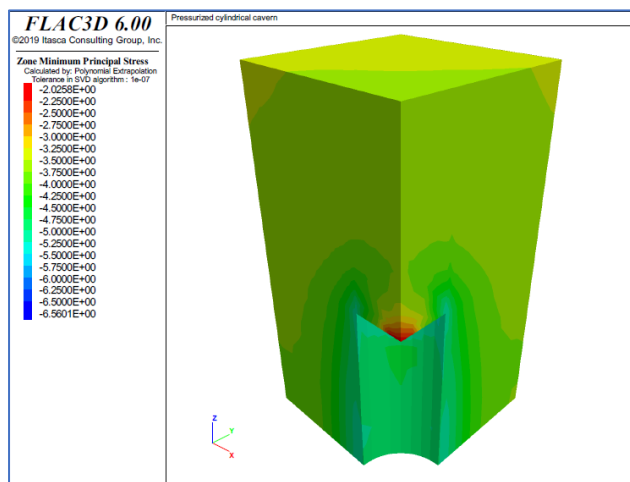


Figura 2. Repartizarea tensiunilor pentru o presurizare a cavernei de $P=0$ MPa

Presiunea maximă de funcționare trebuie selectată pentru a evita fracturarea peretelui cavernei, care, în principiu, are loc atunci când presiunea în cavernă este mai mare decât solicitarea principală minimă din masa de rocă.

Se recomandă efectuarea de calcule numerice și verificarea faptului că modul de funcționare selectat nu conduce la

redistribuirea nefavorabilă a tensiunilor secundare în masa de rocă.

Cercetările viitoare ar trebui să fie adaptate la utilizarea metodelor avansate de modelare numerică, cum ar fi FEM și DEM, pentru a simula situațiile de teren.



Figura 3. Prisma de sare (400x400x1200mm), Salina Targu Ocna, Bacau

MODELUL EXPERIMENTAL

Cu toate acestea, efectuarea analizei în laborator sau pe teren este necesară pentru confirmarea rezultatelor celorlalte metode, în pofida faptului că metoda este foarte greoaie, consumatoare de timp și costisitoare.

Pe lângă cele prezentate mai sus, construcției unui model 3D la scară a dat posibilitatea măsurării deformațiilor pe pereții exteriori ai unei caverne presurizate.

Construcția modelului 3D și măsurătorile s-au desfășurat în Laboratorul de Mecanica Rocilor din cadrul Facultății de Mine, Universitatea Petroșani, în perioada Noiembrie 2021-Iulie 2022 și au început prin achiziționarea a două prisme de sare (400x400x1200mm), cântărind cca.500 kg fiecare, prelevate din mina Totuș, Salina Tg.Ocna, Bacau.



Figura 5. Construcția și dimensiunile mini-cavernei

În vederea obținerii prin dizolvare a unei caverne în interiorul prisme de sare, s-a forat o gaură cu lungimea de 500 mm și diametrul de 1,5 inchi, pentru introducerea și fixarea dispozitivului de dizolvare format din două țevi concentrice, constituind astfel, coloana de extracție, respectiv coloana de exploatare.

Coloana de extracție (fixă-cimentată) $L=400\text{mm}$, $\theta=1,0$ in,

Coloana de exploatare (mobilă) $L=500\text{mm}$, $\theta=3/8$ in.

Agentul de dizolvare = apă potabilă (rețeaua orașului) ;

Temperatura agentului de dizolvare 22°C ;

S-au măsurat înălțimea cavernei $H=365$ mm, volumul cavernei $V=3,215$ litri (prin scoaterea apei din caverna) și s-a calculat diametrul mediu al cavernei $D=106$ mm.

S-a cercetat interiorul cavernei cu ajutorul unui endoscop cuplat la un calculator, realizându-se în acest fel fotografii și chiar un film pentru detalierea reliefului pereților

Efectuând analiza deformațiilor specifice s-a determinat valoarea medie a deformației pe cele trei direcții, **Tabelul 1**.

Tabelul 1. Valorile tensiuni medi pe cele trei direcții

Col	Mean	StandardDev	Variance	Min
TER.1-dir.X	33.14	11.58	134.06	49.05
TER.2- dir. 45grd	32.93	13.18	173.81	67.31
TER.3-dir.Y	26.91	10.52	110.71	40.47

Folosind datele de calcul anterioare se poate reprezenta direcția tensiunilor principale **Figura 64**.



Figura 64. Determinarea direcțiilor principale de rupere

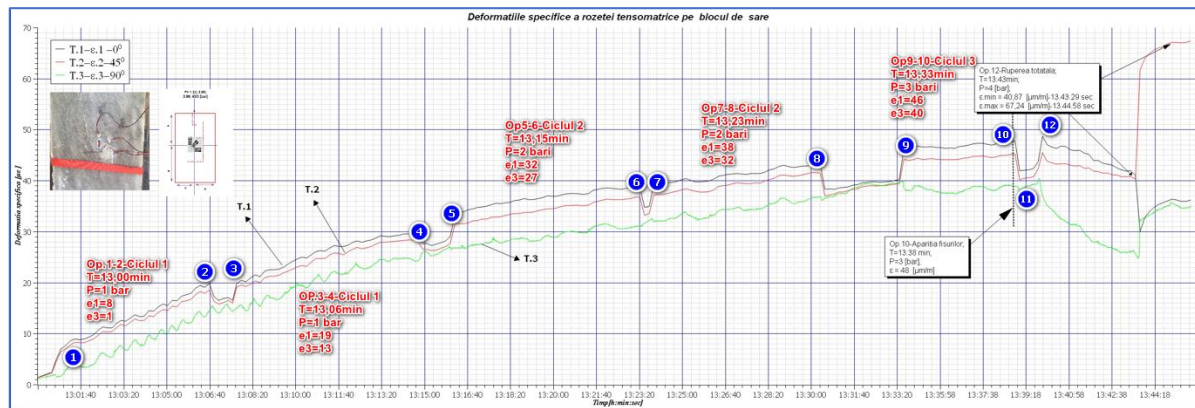


Figura 75. Înregistrarea și interpretarea rezultatelor din măsurători

Valorile rezultate din analiza MEF au fost comparate cu cele rezultate din măsurătorile prin metoda tensiometriei cu timbre rezistive aplicate pe modelul experimental construit la scara 1:500, acestea din urmă, validându-le pe primele. Astfel, aplicarea metodologiei de Modelare-Analiză-Calcul (MAC), printr-o dublă metodă de calcul și verificare, este validă și dă rezultate concludente, fapt pentru care o recomandăm ca fiind o metodologie completă și sigură în munca de proiectare.

Principalele contribuții personale sunt următoarele:

- Am realizat un vast studiu bibliografic privind caracteristicile geo-fizice și mecanice a masivelor de sare din România, prin prezentarea geologiei, a proprietăților fizice, mecanice și reologice, precum și metodele de exploatare, în deosebi a zăcămintelor de sare cu exploatarea prin soluție, cu recomandarea zăcămintului de sare de la Tg.Ocna, județul Bacău.
- Am analizat metodele de exploatare a sării prin prisma practicilor ingineresti din România. Am prezentat aspectele tehnice privind construcția și exploatarea sondelor de dizolvare a sării, cât și verificarea etanșeității coloanelor de ancoraj.
- Am realizat o sinteză a caracteristicilor tehnice cât și testele standard necesare în evaluarea etanșeității cavernelor. Studiul este bazat pe literatura de specialitate din țările unde depozitarea diferitelor gaze sau hidrocarburi este utilizat. Am identificat testele de integritate mecanică pentru cavernele de stocare a sării care sunt utilizate pentru a determina starea puțurilor de acces la cavernă și integritatea sistemului de stocare a fluidelor sau a gazelor.
- Am prezentat baza teoretică privind stabilitatea masivului de sare cu particularizare pentru zăcămintul de sare TG. OCNA - Perimetrul Gura Slănic. Cercetările au arătat că problemele de mecanica rocilor/geoinginerie sunt foarte legate de insuficiența datelor specifice site-ului. Prin urmare am rezolvat această problemă prin metode de predicție bazate pe inteligență artificială (AI). În lucrare am prezentat, pe lângă câteva aspecte teoretice și exemple de aplicare.
- Pentru analiza de stabilitate a cavernei am utilizat modelul FLAC 3D pentru problema *fluaajului radial al unui cilindru infinit de lung, cu pereți groși*.
- Am simulat, pe baza datelor măsurate, repartizarea tensiunilor în masivul de sare din proximitatea cavernei, în cele două situații limită de presurizare la presiunea de 2,928 MPa (29 bari), respectiv depresurizare la 0,29 MPa (3 bari). În concluzie, stabilirea presiunii maxime admisibile la valoarea standard 80÷85% din presiunea litostatică (greutatea coloanei de roci) este validă și deci adoptabilă pentru Salina Tg.Ocna.

- Am realizat un model 3D la scară pentru măsurarea deformațiilor pe pereții exteriori ai unei caverne presurizate. Construcția modelului 3D și măsurătorile s-au desfășurat în Laboratorul de Mecanica Rocilor din cadrul Facultății de Mine, Universitatea din Petroșani, în perioada Noiembrie 2021-Iulie 2022 și au început prin achiziționarea a două prisme de sare (400x400x1200mm), cântărind cca.500 kg fiecare, prelevate din mina Totuș, Salina Tg.Ocna, Bacau.
- Am efectuat măsurarea deformațiilor pe cele trei direcții cu autorul unor scheme originale de amplasare a timbrelor tensometrice și cu soluții de amplasare a acestora pe proba de sare, probă care este umeda.
- În vederea măsurătorilor pentru determinarea deformațiilor în pereții cavernei la diferite presiuni, am conceput un circuit flexibil și ușor de manevrat: butelie cu gaz (CO₂ sau Helium-am optat pentru aceste gaze ne-explozive, din motive de siguranță) sub presiune de 200 bari, reductor de presiune max.30 bari, furtun de presiune pentru legătura cu caverna, supapă cu robinet de evacuare pentru depresurizarea cavernei. Am stabilit presurizarea cavernei în trepte de presiune de 1-5 bari, și 3 reprize de 5 minute fiecare. Mai precis, prima treapta de presiune de 1 bar, caverna a fost presurizată timp de 5 minute, după care s-a închis sursa (butelia) și s-a depresurizat caverna. S-au efectuat 3 cicluri a câte 5 minute, după care s-a trecut la o treaptă superioară de presiune. Înregistrarea măsurătorilor s-a făcut cu ajutorul unui modul și soft specializat corelate de către mine.
- Depozitarea geologică a CO₂ este o metodă inovatoare dar, din cauza complexității procesului de captare și stocare, pot apărea riscuri pentru sănătate, siguranță și mediu, și de d forma cavelnelor aceea, înțelegerea acestor riscuri devine de o importanță fundamentală. De aceea am efectuat o analiză complexă a riscurilor la depozitarea CO₂ în cavernele de sare, precum și a managementului acestora.
- Pentru a avea o imagine mai clară asupra evoluției cavelnelor sondelor analizate am efectuat măsurători cavernometrice în sondele de la Tg. Ocna – Gura Slănic, rezultând forma acestora și conturul maxim de cavernă.
- În ceea ce privește monitorizarea fenomenelor de deformare a terenurilor în cazul salinelor, acestea fiind fenomene discontinue de deformare, sunt dificil de monitorizat și previzionat, deoarece ele apar brusc și la intervale de timp greu de definit. De aceea, singurele posibilități de previziune sunt asigurate de modelarea cu metode numerice, și măsurători cavernometrice periodice pentru monitorizarea deformațiilor din pereții cavelnelor de sare aflate în conservare sau ca depozite subterane.

Depozitarea CO₂ în cavernele de sare este un domeniu care nu a fost cercetat în detaliu, fapt pentru care sunt necesare cercetări suplimentare în:

- instrumente de modelare pentru prezicerea răspunsului pe termen lung al masei de rocă la fluarea sării și impactul acesteia asupra integrității cavernei;
- este necesară estimarea capacității de stocare regionale și a costurilor.

Cavernele de sare pot fi folosite pentru depozitare temporară de CO₂ sau, pentru a utiliza CO₂ în alte scopuri comerciale. Aceste structuri sunt considerate a fi mai puțin potrivite pentru stocarea pe termen lung a CO₂, deoarece ar putea fi utilizate pentru alte aplicații (CCUS-capturarea carbonului pentru utilizarea și stocarea acestuia).

În lume, caverne de acest tip, sunt folosite pentru depozitarea diferitelor produse de hidrogen, gaz natural, dioxid de carbon, până la țitei sau deșeuri nucleare, ceea ce impune cavelnelor să fie etanșe.

În țara noastră asistăm la o situație în care exploatările miniere au fost și sunt progresiv închise, chiar abandonate, fără să se acorde o atenție suficientă spre eventualele consecințe tehnice și asupra mediului înconjurător pe termen mediu și lung. Pe de altă parte, cunosc persoane și instituții din mediul privat și de stat, care susțin și conduc activități de cercetare menite să dezvolte tehnologii pentru un mediu curat. În ceea ce mă privește, îmi propun ca activitatea viitoare de cercetare să se îndrepte înspre cele trei axe principale: de a înțelege mai bine, a analiza și a modela fenomenele elementare și diferitele mecanisme care pot interveni și interacționa în precizarea și prevenirea consecințelor tehnice, de securitate și socio-economice.

Ca proiecte viitoare, voi avea în vedere următoarele studii:

- Continuarea cercetărilor asupra lucrărilor subterane realizate în masive de sare. Modelarea evoluției geometrice a unei cavități subterane (mecanisme de dizolvare și transport, mecanismul de rupere, interacțiune rocă – saramură ;
- Analiza (prognoza) influenței exploatării subterane asupra suprafeței terenului de la zi (respectiv, determinarea principalilor parametri de deformare) și a stării de tensiune-deformare a masivului de roci acoperitoare - în condițiile a zăcămintelor de sare exploatare prin dizolvare;
- Optimizarea geometriei cavernelor și a pilierilor de exploatare în cazul extragerii zăcămintelor sare gemă ;
- Analiza (prognoza) stabilității pilierilor de protecție ai golurilor subterane, aflate în zona influență a altor caverne, sau dimensionarea acestora în faza de proiectare;
- Dimensionarea cavernelor subterane și analiza stabilității acestora în condițiile unor solicitări statice sau / și dinamice generate de seisme naturale sau induse;
- Analiza termo-mecanică a stării de tensiune-deformare și a stabilității excavațiilor miniere subterane sub influența emisiilor termice generate de deșeurile radioactive depozitate în spațiile subterane;

Bibliografie selectivă

- Atudorei, C., Bocanete E., Miclea P. . (1971). *Cercetarea, Exploatarea și Valorificarea Sării*. București: Editura Tehnică.
- Barton, N. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. 6(4), 189-239.
- Bérest P., Réveillère A., Evans D., Stöwer M. (2019). *Review and analysis of historical leakages from storage salt caverns wells*. Oil Gas Sci. Technol. - Rev. IFP Energies nouvelles 74, 27. <https://doi.org/10.2516/ogst/2018093>.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Proc. 16th. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, 75-83.
- CAVINFO. (fără an). *CAVINFO software. Informations available on* . <https://socon.com/index.php/de/software-fuer-kavernen/cavinfo-software>.
- Călin, P. (2006). *Exploatarea sării prin sonde*. București: Editura Asociației ”SIPG”.
- Chadwick, A. A. (2008). *Cele mai bune practici pentru stocarea CO2 în acvifere saline – Observații și orientări din proiectele SACS și CO2STORE*. Nottingham, UK: British Geological Survey.
- Cook, N.G.W., Hoek, E., Pretorius, J.P.G., Ortlepp, W.D., Salamon, M.D.G.. (1966). *Rock mechanics applied to the study of rockbursts*. Journal of South Africa Institute of Mining and Metallurgy 66, 436e528.
- Cristescu, N. (1988). *Mecanica rocilor*. . Supliment la notele de curs. Univ. București.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1967). *Design of surface and near surface construction in rock*. Ed. C. Fairhurst, 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. M.
- Diamond, H. (1989). *The Water-Brine Interface Method, an Alternative Mechanical Integrity Test for Salt Solution Mining Wells*. San Antonio: Proc. SMRI Fall Meeting.
- Dinescu, S. (2021). *Cercetări privind evaluarea și gestionarea riscurilor de depozitare a CO2 în minele de sare*. Petroșani: Contract de cercetare științifică universitară nr. 6454/07.10.2021, Universitatea din Petroșani.
- Dodds, K. W. (2010). *Evaluarea metodologiilor de evaluare a riscurilor folosind proiectul de stocare a CO2 In Salah ca istoric de caz*. Proceedings of GHGT10 Conference.
- Durup J.G. (1994). *Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt (Field test nr. 2 with gas)*. Research Project Report nr. 94-002-S.
- Dusseault, M. R. (2002). *Bachu Sechestrarea CO2 în caverne de sare, presented at the* . Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference 2002, Calgary, Alberta, Canada, June 11-13.
- E. Hoek, E. T. Brown. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (8), 1165e86, (1997).

- Einstein H H. (1996). *Analiza riscului și riscului în ingineria rocilor*. . Tunnelling and Underground Space Technology, 11 (2): 141–155.
- Heitman, N. (1987). *Experience with Cavern Integrity Testing Using Nitrogen Gas*. Tulsa: Proc. SMRI Spring Meeting.
- Hirian, C. (1981). *Mecanica rocilor*. București: Ed. Didactică și Pedagogică.
- Hoek E., Brown ET.,. (1980). *Empirical strength criterion for rock masses*. Journal of the Geotechnical Engineering Division 1980b;106(GT9):1013-35.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, USA.
- Holling, C. (1978). *Adaptive environmental assessment and management*. Wiley.
- Hugout, B. (1988). *Mechanical Behavior of Salt Cavities –in situ Tests– Model for Calculating the Cavity Volume*. Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt, Hannover, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 291-310.
- IEA GHG. (2007). *Evaluare de mediu pentru captarea și stocarea CO2*.
- Jain, A.K., Mao, J., Mohiuddin, K.M.,. (1996). *Artificial neural networks - a tutorial*. Computer 29 (3), 31-44.
- Kulatilake P, Fiedler R, Panda B. (1997). *Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses*. Engineering Geology 1997; 48(3e4):217e29.
- Li, Qi, & Liu, G.,. (2015). *Evaluarea riscului stocării geologice de CO2*. Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Behavior (Issue May 2016, p. 37). Springer International Publishing Switzerland.
- Masters, T. (1993). *Practical neural network recipes in C++*. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Mihuț, S. (2015). *Cercetări privind dirijarea controlată a prăbușirii rocilor din planșeul golurilor rezultate în urma exploatării prin dizolvare a zăcămintelor de sare gemă, , .* Universitatea din Petroșani: Teză de doctorat.
- Monte, J. M. (2004). *Rock mass characterization using laser scanning and digital imaging data collection techniques*. MSc Thesis, Tucson, University of Arizona, USA, (2004).
- Muller, P. et Siemens, H. (1974). *Festigkeit, Verformbarkeit und Gefügeregelung von AnhydrExperimentelle Stauchverformung unter Manteldrücken bei 5 kbar bei Temperaturen bis 300 °C*. Tectonophysics.
- Munson, D.E., Dawson, P.R. (1981). *Salt constitutive modelling using mechanism map, .* Penn-State University: 1st Conf. On Mech. Behavior of Salt.
- Onica, I. Cozma, E. (2009). *3D Finite Element Analysis of the Rock Salt Structures Stability of the Romania Salines, .* Banff, Alberta, Canada: Proceedings of Eighteen International Symposium on Mine, Planning and Equipment Selection, November 16-19.

- Onica, I., Cozma, E., Marica, D. (2011). *Stability analysis of the rock salt rooms and pillars of the Ocnele Mari Saline with the aid of the 2D finite element modelling*. Petroșani: Annals of University of Petroșani,.
- OSPAR. (2007). *MEETING OF THE OSPAR COMMISSION*. OSPAR Guidelines for Risk Assessment and Management Preliminary considerations Scope of the Guidelines III. Risk Assessment and Management of CO₂ storage projects (Vol. 7).
- Palmstrom, A. and Broch, E. (2006). *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system*. Tunnels and Underground Space Technology, 21, 575-593.
- Paté-Cornell M E, D. R. (2006). *Rolurile analizei de risc și deciziei în suportul decizional*. Analiza deciziei, 3 (4): 220–232.
- Pereira J.C. (2012). *Common practices – gas cavern site characterization, design, construction, maintenance, and operation*. SMRI Project Report RR2012-03.
- Popescu S., Radu M., S. (2021). *Determinarea indicelui de rezistență geologică a masei de rocă (GSI) pe baza procesării imaginilor*. Petrosani: Simpoziu SIMPRO 2021, UNIVERSITATEA Petrosani.
- Réveillère A., Bérest P., Evans D.J., Stöwer M., Chabannes C., Koopmans T., Bolt R. (2017). *SMRI Research Report RR2017-2. Past salt caverns incidents database Part 1: Leakage, overfilling and blow-out*. <https://www.solutionmining.org/>.
- Roy, D.H., Singh, T.N.,. (2019). *Predicting deformational properties of Indian coal: soft computing and regression analysis approach*. Measurement 149, 106975. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106975>.
- Rummel F., Benke K., Denzau H. (1996). *Hydraulic fracturing stress measurements in the Krummhörn gas storage field, North-western Germany*. Houston: Proc. SMRI Spring Meeting, Houston.
- Shahin, M.A., Jaksa, M.B., Maier, H.A. (2008). *State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering*. Electronic Journal of Geotechnical En Engineering. http://www.ejge.com/Bouquet08/Shahin/Shahin_ppr.pdf.
- Stoica C. și Gherasie I. (1981). *Sarea și sărurile de potasiu și magneziu din România*,. Editura Tehnică.
- Terzaghi, K. (1946). *Rock defects and loads on tunnel supports*. Eds R. V. Proctor and T. L. White 1, 17-99. Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company.
- Thorel, L. (1994). *Plasticité et endommagement des roches ductiles – Application au sel gemme*. Thèse. Paris: Thèse de l’Ecole des Ponts et Chaussées.
- Toderaș, M., C. Danciu, C. Nistor, C. Badulescu. (2013). *In situ studies to estimate the stress state in pillars, from salt mine Praid*. Bulgaria: Engineering Geology and Geotechnics, DOI: 10.5593/sgem2011/s02.125; <http://sgem.org/sgemlib/spip.php?article73>.
- Todorescu, A. (1984). *Proprietățile rocilor*. București: Ed. Tehnică.

-
- Todorescu, A. (1986). *Reologia rocilor cu aplicații în minerit*. București: Ed. Tehnică.
- Torabi-Kaveh, M., Naseri, F., Saneie, S., Sarshari, B. (2015). *Application of artificial neural networks and multivariate statistics to predict UCS and E using physical properties of Asmari limestones*. Arabian Journal of Geosciences 8 (5), 2889-2897.
- TRIPA, P. (2010). *Metode experimentale pentru determinarea deformațiilor și tensiunilor mecanice*, . Timișoara: Editura MIRTON Timișoara, 2010.
- Van Fossan, N. (1983). *The characterization of Mechanical Integrity for Cased Boreholes Entering Solution Caverns*. Proc. 6th Int. Symp. on Salt, Salt Institute, 2, 111-120.
- Van Fossan, N.E. and Whelply, F.V. (1985). *Nitrogen as a Testing Medium for Proving the Mechanical Integrity of Wells*. Houston: Proc. SMRI Fall Meeting, Houston.
- Verma, A.K., Kaushal, K., Chatterjee, S.,. (2016). *Prediction model of longwall powered support capacity using field monitored data of a longwall panel and uncertainty-based neural network*. G. eotechnical and Geological Engineering 34, 2033-2052.
- Vilceanu, F. (2018). *Studiul duratei de viață pentru utilajele de extragere și depunere în depozite, utilizate în carierele din bazinul Olteniei*,. Petroșani: Teza de doctorat, Universitatea din Petroșani, 2018.
- Wang T., Y. C. (2015). *Lățimea permisă a stâlpilor pentru depozitarea gazului din cavernele de sare gemă*, J. ournal of Petroleum Science and Engineering pp. 433–444, 127.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H. (1972). *Support determination based on geologic predictions*. Chicago: eds K.S. Lane and L.A. Garfield, 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. .
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H. (1972). *Support determination based on geologic predictions*. Chicago: Eds K.S. Lane and L.A. Garfield, 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. .