

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Geologie și Geofizică



TEZĂ DE DOCTORAT
Rezumat

*Sistem integrat de modelare a fenomenelor generatoare
de risc pentru iazurile de decantare
din industria minieră*

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Cristian Mărunțeanu

Doctorand

Ing. Pop Diana Maria (căs. Banu)

BUCUREȘTI
2016

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Geologie și Geofizică



Titularul prezentei teze de doctorat a beneficiat pe perioada studiilor universitare de doctorat de o bursă atribuită prin proiectul „Programe doctorale și post-doctorale de excelență pentru formarea de resurse umane înalt calificate pentru cercetare în domeniile Științele Vieții, Mediului și Pământului”, beneficiar Universitatea din București, cod POSDRU/159/1.5/S/133391, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

TEZĂ DE DOCTORAT
Rezumat

***Sistem integrat de modelare a fenomenelor generatoare
de risc pentru iazurile de decantare
din industria minieră***

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Cristian Mărunțeanu

Doctorand

Ing. Pop Diana Maria (căs. Banu)

BUCUREȘTI
2016

MULȚUMIRI

Dedic această lucrare conducătorului de doctorat, domnul prof. dr. ing. Cristian Mărunțeanu pentru tot sprijinul, îndrumarea și ajutorul acordate pe parcursul întregii perioade de cercetare și elaborare a tezei de doctorat.

Adresez sincere mulțumiri tuturor membrilor comisiei de doctorat, domnului Dr. Ing. Sorin Ovidiu Mihai, domnului Prof. Dr. Ing. Daniel Scrădeanu, domnului Dr. Ing. Ervin Robert Medveș, pentru sfaturile și sprijinul acordate.

Doresc să mulțumesc în mod deosebit domnului Dr. Ing. Sorin Ovidiu Mihai pentru răbdarea cu care a analizat de nenumărate ori lucrarea de față, pentru numeroasele sfaturi și sugestii oferite și, nu în ultimul rând, pentru încrederea, suportul și încurajarea acordate pe parcursul celor trei ani de cercetare științifică.

SC Conversmin SA și INCDMRR București le mulțumesc pentru suportul oferit, pentru încrederea acordată și pentru acceptul de utilizarea a datelor fără de care întocmirea acestei lucrări nu ar fi fost posibilă.

Mulțumesc familiei mele pentru răbdarea, sprijinul și iubirea acordate.

În încheiere mulțumesc tuturor profesorilor mei, care mi-au dăruit din cunoștințele lor și care au clădit în mine dragostea și respectul pentru muncă.

CUPRINS

1. Introducere	6
1.1 Scopuri și obiective.....	6
1.2 Elementele de noutate și principalele contribuții propuse.....	6
1.3 Structura tezei.....	7
2. Iazurile de decantare din industria minieră	8
2.1 Elementele componente ale unui iaz de decantare.....	9
2.2 Caracteristicile și clasificarea iazurilor de decantare din industria minieră	9
2.3 Etapele de existență ale iazurilor de decantare	9
2.4 Principalele fenomene generatoare de risc ce afectează iazurile.....	9
2.5 Efectele negative generate asupra mediului înconjurător.....	10
3. Metode de calcul al stabilității iazurilor	10
3.1 Metodele analitice	10
3.1.1 Metoda generalizată a echilibrului limită (GLE).....	10
3.1.1.1 Suprafața de alunecare circulară.....	10
3.1.1.2 Suprafața de alunecare non-circulară.....	12
3.1.2 Metoda Morgenstern-Price.....	12
3.1.3 Metoda Spencer.....	12
3.1.4 Metoda Bishop simplificată.....	12
3.1.5 Metoda Janbu simplificată.....	12
3.1.6 Metoda Janbu generalizată.....	12
3.1.7 Metodele echilibrului forțelor.....	12
3.2 Metodele numerice – metoda elementului finit (FEM).....	12
3.2.1 Modelul constitutiv utilizat la studiul de caz.....	12
3.2.2 Principiul de calcul al metodei numerice aplicată studiului de caz	13
3.3 Metodele probabilistice.....	13
3.3.1 Principiile generale de calcul ale analizelor probabilistice.....	14
3.3.2 Metoda estimării punctuale (PEM).....	14
3.3.3 Metoda Monte Carlo (MC).....	14
3.3.4 Integrarea metodelor probabilistice metodelor deterministe de evaluare a stabilității iazurilor de decantare.....	14
3.3.5 Avantajele utilizării metodelor probabilistice	14
4. Metode de achiziție, prelucrare și corelare a parametrilor utilizați la modelarea stabilității iazului de decantare Târnicioara	15
4.1 Metode directe de achiziție.....	15
4.1.1 Foraje hidrogeotehnice	15
4.1.2 Teste de laborator.....	15
4.1.3 Metode de teledetecție-interferometria radar satelitară (InSAR).....	15
3.1.1.2 Principiul de calcul al interferometriei InSAR.....	15
3.1.1.3 Aplicabilitatea InSAR în industria minieră.....	15
4.2 Metode indirecte de achiziție (metode geofizice).....	16

4.2.1 Metode de rezistivitate electrică.....	16
4.2.1.1 Principiul tehnicii de achiziție ERI (Electrical Resistivity Imaging).....	16
4.2.1.2 Metodologia de interpretare a datelor de electrometrie.....	16
4.3 Rețea de monitorizare (piezometre, reperi topografici, înclinometre).....	16
5. Studiul de caz - Prezentare generală a amplasamentului.....	16
5.1 Geomorfologia zonei.....	16
5.2 Geologia zonei.....	17
5.2.1 Soclul cristalin.....	17
5.2.2 Cuvertura sedimentară mezozoică.....	17
5.3 Hidrologia zonei.....	18
5.4 Hidrogeologia zonei.....	18
5.5 Caracteristicile climatice ale zonei.....	18
5.6 Seismicitatea zonei.....	18
5.7 Caracteristicile generale ale iazului.....	19
5.8 Scurt istoric al activității iazului Tărnicioara.....	19
6. Investigații efectuate pe iazul de decantare Tărnicioara.....	20
6.1 Investigații geotehnice.....	20
6.2 Investigații geofizice.....	20
6.2.1 Rezultatele investigațiilor electrometrice.....	22
6.3 Achiziția de date prin teledetecția InSAR.....	24
6.3.1 Rezultatele măsurărilor InSAR.....	25
6.4 Rețeaua de monitorizare.....	27
7. Sistemul integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc pentru iazul de decantare Tărnicioara.....	27
7.1 Evaluarea stabilității prin metode deterministe	27
7.2 Evaluarea stabilității prin metode probabilistice.....	32
7.2.1 Metoda Monte Carlo utilizată la stabilirea nivelelor de atenționare și de alarmare	32
7.2.2 Metoda estimării punctuale PEM utilizată pentru evaluarea riscului la lichefiere.....	35
7.3 Modelarea numerică și realizarea unor paliere de atenționare – alarmare în predicția fenomenelor de risc la alunecare utilizând date InSAR de deformație.....	38
7.4 Rezultatele obținute în urma modelării fenomenelor generatoare de instabilitate în corpul iazului de decantare Tărnicioara.....	41
7.5 Schema sistemului integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc.....	43
8. Concluzii.....	43
Bibliografie.....	45

1. Introducere

Iazurile de decantare, rezultate prin depozitarea materialului steril obținut din procesarea minereurilor în uzinele de preparare, sunt de dimensiuni relativ mari, modificând uneori fundamental morfologia zonei în care sunt amplasate, iar prin conținutul de noxe, de pulberi, de suspensii, de reactivi de flotație și de ioni metalici, acestea devin factori și surse de poluare ale atmosferei, apei și solului. O breșă în barajul unui iaz de decantare va elibera, în marea majoritate a cazurilor, o cantitate foarte mare de steril ce poate fi puternic contaminat cu compuși toxici proveniți din activitățile de procesare.

De peste jumătate de secol, la evaluarea stabilității taluzelor și a barajelor iazurilor de decantare miniere sunt utilizate metode deterministe de modelare: modelarea numerică și cea analitică. Timpul a demonstrat că utilizarea acestor metode nu a reușit întotdeauna să permită predicția de formare a unor breșe și astfel, a apărut nevoia de înțelegere mai aprofundată a acestor sisteme în vederea unei proiectări și funcționări cu un grad sporit de siguranță.

A apărut, prin urmare, abordarea probabilistică (Metoda Monte Carlo, Metoda Hypercubului Latin, Metoda Estimării Punctuale etc) ce ia în calcul aspecte noi, ignorate complet de către metodele deterministe: incertitudinea și anizotropia parametrilor materialului steril din iaz. Deși pe plan internațional aceste noi metode și-au dovedit pe deplin utilitatea, în România, la momentul actual, la calculul stabilității barajelor iazurilor de decantare sunt încă utilizate metode analitice și numerice.

1.1. Scopuri și obiective

Cercetarea efectuată la realizarea acestei teze prezintă un nou cadru pentru analiza stabilității iazurilor de decantare, în care metodele probabilistice sunt aplicate unor modele numerice sau analitice, un prim obiectiv al lucrării constând deci, în abordarea statistică a problematicii modelării fenomenelor generatoare de risc, aplicată abordării deterministe (Tarek, 2013).

Un alt obiectiv pe care lucrarea de față și-l propune este de a întocmi un sistem complex de modelare a fenomenelor declanșatoare de risc ce pot afecta un iaz de decantare minier (iazul Tărnicioara, cariera Ostra, județul Suceava, România), sistem realizat prin interconectarea rezultatelor obținute prin metodele deterministe cu cele rezultate prin modelările probabilistice și utilizarea informațiilor astfel obținute în scopul monitorizării acestor fenomene, prin implementarea unor sisteme de atenționare - alarmare. Punctul de plecare pentru întocmirea acestui sistem, va fi obținerea parametrilor fizico-mecanici ai materialului steril din corpul iazului, parametrii obținuți prin metode de investigare directe și indirecte. Al doilea pas va consta în modelarea deterministă și probabilistică a acestor parametrii în scopul evaluării fenomenelor ce pot afecta negativ stabilitatea iazului (instabilitatea barajului, creșterea presiunii apei din pori, lichefierea etc).

Acest sistem poate contribui la o mai bună monitorizare a fenomenelor de risc, prin impunerea unor nivele de atenționare - alarmare, alături de rețeaua de monitorizare deja existentă, el putând fi aplicat în mod particularizat oricărui alt iaz de decantare, cu scopul modelării, evaluării și monitorizării celor mai multe dintre fenomenele generatoare de risc ce îl pot afecta de-a lungul existenței sale.

1.2. Elementele de noutate și principalele contribuții propuse

Prin intermediul acestei lucrări se dorește realizarea unui sistem integrat de modelare a fenomenelor generatoare de instabilității pentru un studiu de caz, sistem ce va putea

ulterior să fie aplicat particularizat oricărui iaz de decantare, sau integrat în cadrul unui viitor sistem integrat național / european de monitorizare și monitorizare a fenomenelor generatoare de risc.

Pentru a putea realiza acest lucru se impune aplicarea metodelor relativ noi pe plan național asupra studiului de caz ales: metodele probabilistice. Aceste metode noi iau în considerare aspecte ale caracteristicilor materialului steril ignorate de către abordările deterministe, precum anizotropia și incertitudinea.

Un alt element de noutate constă în integrarea sistemică a tehnologiei de teledetecție InSAR în modelarea numerică a fenomenelor generatoare de risc prin calibrarea datelor de deplasare verticală cu datele corespondente din modelul cu elemente finite și datele obținute din rețeaua de monitorizare. În acest fel datele primare obținute din mai multe surse pot fi utilizate în mod eficient în predicția finală a fenomenelor generatoare de risc la alunecare.

1.3. Structura tezei

Prezenta lucrare este structurată în opt capitole.

Capitolul 1 este introductiv și debutează cu stabilirea scopului și obiectivelor acestei teze și se încheie cu o scurtă prezentare a structurii acesteia.

Capitolul 2 conține o descriere generală a iazurilor de decantare din industria minieră, cu prezentarea principalelor clasificări ale acestora pe baza caracteristicilor (constructive, de amplasare, de conținut etc), continuând cu descrierea principalelor elemente constituente ale acestor construcții. Capitolul se încheie cu o descriere a etapelor de existență ale iazurilor, cu o prezentare succintă a principalelor fenomenelor generatoare de risc, a incidentelor în care sunt implicate raportate la aceste fenomene și a efectelor negative generate de aceste iazurile de decantare miniere asupra mediului înconjurător.

Capitolul 3 prezintă aspecte teoretice privind metodele de calcul ale stabilității iazurilor: analitice (metoda generalizată a echilibrului limită, metoda Morgenstern-Price, metoda Spencer, metoda Bishop simplificată, metodele Janbu simplificată și generalizată, metodele echilibrului forțelor), numerice (metoda elementului finit) și probabilistice (metoda estimării punctuale, metoda Monte Carlo); o atenție sporită se acordă integrării metodelor probabilistice metodelor deterministe de evaluare a stabilității iazurilor de decantare și avantajelor utilizării acestor metode statistice.

Capitolul 4 descrie metodele de achiziție, prelucrare și corelare a parametrilor utilizați la modelarea stabilității iazului de decantare Tărnicioara, în funcție de cele două tipuri de investigare: directă și indirectă. Parametrilor obținuți prin aceste metode de investigare li se adaugă un volum mare de date obținute din rețeaua existentă de monitorizare a iazului.

Capitolul 5 oferă o prezentare generală a iazului de decantare ales ca studiu de caz, plecând de la localizarea amplasamentului, geomorfologia, geologia, hidrologia, hidrogeologia, caracteristicile climatice și seismice ale zonei și continuând cu caracteristicile generale ale iazului și cu un scurt istoric al activității acestuia.

Capitolul 6 prezintă investigațiile efectuate pe iazul de decantare Tărnicioara și parametri fizico-mecanici obținuți.

Capitolul 7, având un impresionant volum de date referitor la coeficienții seismici zonali, parametrii fizico-mecanici ai materialului steril și nivelul hidrostatic din corpul iazului, prin modelări analitice, numerice și probabilistice, interpretând, comparând și coroborând rezultatele obținute, descrie sistemul integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc pentru studiul de caz ales.

Capitolul 8 prezintă aplicabilitatea sistemului integrat de modelare a fenomenelor ce pot declanșa instabilități în corpul iazurilor de decantare din industria minieră, subliniind elementele de noutate și contribuțiile personale aduse.

Schema logică a structurii lucrării împărțită pe cele 8 capitole, ce urmărește construirea sistemului integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc particularizat pentru studiul de caz ales, este prezentată în figura următoare:

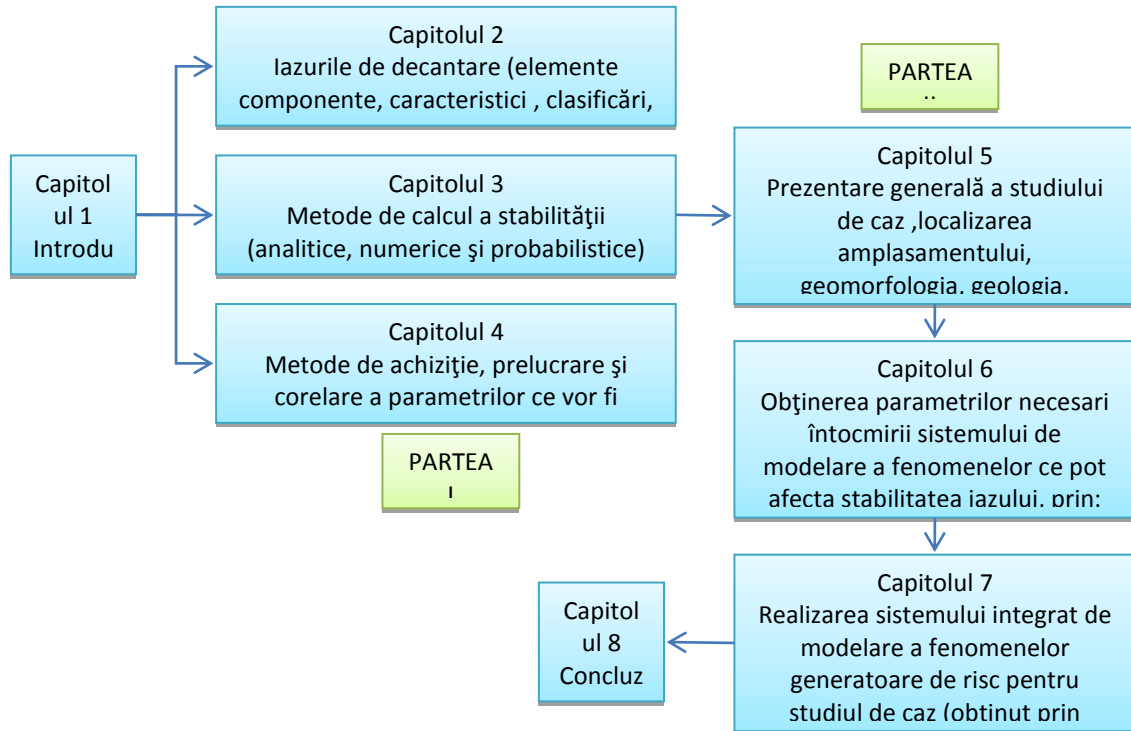


Figura 1.1. Prezentarea schematică a structurii tezei propuse

2. Iazurile de decantare din industria minieră

Prelucrarea minereurilor se poate face prin numeroase proceduri precum: zdrobire, măcinare, percolare, concentrare, încălzire, deshidratare, în urma cărora rezultă materialul steril (Vick, 1983).

După modul de transport și stocare al acestui material steril, depozitele de deșeuri din industria minieră se clasifică în:

- **halde** (depozitare și stocare în stare uscată)
- **iazuri** (depozitare în amestec cu apă - transportul sterilului de face prin decantare gravitațională sau prin hidrociclone)

Conform H.G. nr. 856/13.08.2008, un iaz de decantare este o configurație naturală sau o amenajare tehnică utilizată pentru depozitarea deșeurilor cu granulație fină (steril de procesare), împreună cu cantități variabile de apă liberă, rezultate din tratarea resurselor minerale și din limpezirea și recircularea apei de proces.

Construcția unui baraj debutează cu executarea unui baraj inițial, care poate avea o înălțime inițială de doar câțiva metri. Barajul inițial este supraînălțat treptat, o dată cu creșterea cantității de steril depozitat (figura 2.1.).

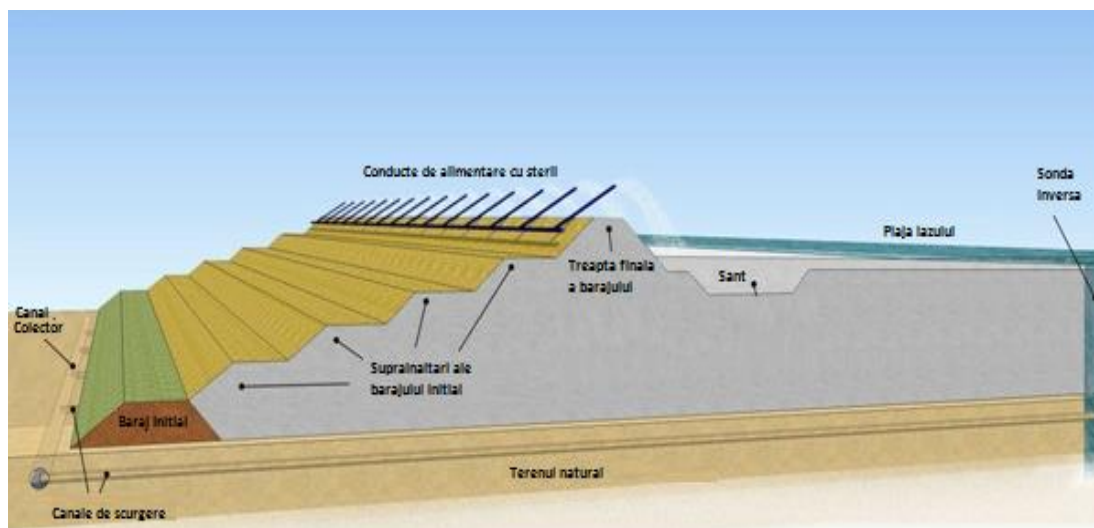


Figura 2.1. Profilul unui iaz de decantare (Vanden Berghe, 2011)

2.1. Elementele componente ale unui iaz de decantare – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

2.2. Caracteristicile și clasificarea iazurilor de decantare din industria minieră – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

2.3. Etapele de existență ale iazurilor de decantare – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

2.4. Principalele fenomene generatoare de risc ce afectează iazurile

Toate iazurile de decantare miniere existente aspiră, la îndeplinirea condițiilor de siguranță, însă de-a lungul vieții lor, unele nu reușesc, iar această rată de cedare a barajelor este în continuă creștere, conform Comisiei Internaționale a Barajelor Mari (ICOLD, 2001).

Conform clasificărilor făcute de Comisia Internațională a Barajelor Mari (ICOLD), principalele cauze ale cedării barajelor de retenție sunt date de stabilitatea versantului, urmată de supraîncărcare, cutremur, infiltrații și fundații, iar iazurile de decantare construite în amonte (cu înălțare spre interior) au cel mai ridicat procent de cedare al barajelor (ICOLD, 2001).

Principalele fenomene cu impact direct asupra stabilității structurale a barajelor iazurilor de decantare sunt (Chambers, 2011, Ștefănescu et. al., 2010, Moraru et. al., 2012):

- regimul hidrodinamic din corpul barajului, respectiv oscilația nivelului piezometric cuplat cu regimul de precipitații și particularitatea hidrogeologică zonală;
- fenomene de eroziune externă ce pot antrena volume importante de material din depunerea de steril și din coronament și pot ravna paramentul aval;
- fenomene de eroziune internă în corpul barajului, ce se pot dezvolta pe direcții preferențiale prin depășirea gradientului critic;
- evenimente seismice ce pot reduce valoarea parametrilor de forfecare a rocilor din ampriză și a materialului din baraj și pot induce fenomene de lichefiere în nisipurile fin prafoase saturate;
- fenomene de sufozie hidro-geo-chimică accelerate de oxidarea sulfurilor metalice și generarea apelor acide ce pot dizolva matricile coezive din materialul sedimentat în iaz;
- slăbirea capacității portante a rocilor din ampriza barajului.

2.5. Efectele negative generate asupra mediului înconjurător – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

3. Metode de calcul al stabilității iazurilor

În practica ingierească există în prezent două categorii de metode utilizate la determinarea factorului de siguranță pentru taluze naturale, diguri și baraje:

- Metode deterministe / clasice: reprezentate de metodele analitice (Fellenius, Taylor, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer, Janbu etc) și de cele numerice (metoda elementului finit, metoda diferenței finite, metoda elementului de frontieră etc)
- Metode probabilistice / statistice / stocastice (întotdeauna integrate metodelor deterministe): metoda Monte Carlo, metoda Hypercubului Latin, metoda estimării punctuale etc.

Cele mai multe dintre ele presupun că suprafața de alunecare este o suprafață circulară, algoritmi de calcul fiind aplicați acestei ipoteze (Fredlund et. al., 1981).

Masa alunecătoare este la rândul ei împărțită în fâșii caracteristice.

3.1. Metodele analitice

Tehnicile de calcul analitic presupun rezolvarea unui sistem de ecuații preluate din mecanica statică, ecuații ce satisfac echilibrul momentelor și / sau echilibrul forțelor pentru fiecare fâșie verticală (Wright, 1969), ce reprezintă elementul de discretizare al unei potențiale suprafețe (circulare sau non-circulare) de alunecare.

De peste jumătate de secol, numeroase metode bazate pe împărțirea în fâșii caracteristice au fost aplicate pentru rezolvarea bidimensională a metodei echilibrului limită: Metoda generalizată a echilibrului limită GLE, Metoda Morgenstern-Price, Metoda Spencer, Metoda Bishop simplificată, Metoda Janbu simplificată și generalizată etc.

Între metodele de mai sus, există diferențele majore, apărute, în primul rând, din lipsa de uniformitate a ecuațiilor utilizate ale factorului de siguranță și, în al doilea rând, din cauza ambiguității privind forțele ce acționează între fâșiile caracteristice și ale limitărilor impuse de suprafețele de alunecare (Fredlund et. al., 1981).

Numeroase încercări au fost făcute de-a lungul timpului, cu scopul de a evalua diferențele cantitative dintre factorii de siguranță obținuți prin aceste metode (Wright, 1969, Bishop, 1955, Duncan et. al., 1980).

3.1.1. Metoda generalizată a echilibrului limită (GLE)

Ecuațiile statice ce pot fi utilizate pentru determinarea factorului de siguranță sunt reprezentate de însumarea forțelor pe două direcții și de însumarea momentelor calculate în raport cu un anumit punct de rotație. Însă aceste elemente, împreună cu criteriile de rupere, sunt insuficiente pentru determinarea problemei stabilității versanților. Studiile teoretice au arătat că ecuațiile factorului de siguranță pot fi derivate în mod independent pentru a satisface echilibrul momentelor și pe cel al forțelor pentru o fâșie caracteristică, situată deasupra suprafeței de alunecare (Fredlund et. al., 1981, Fredlund et. al., 1977).

3.1.1.1. Suprafața de alunecare circulară

Condițiile impuse de echilibrul static aplicate inițial pentru o fâșie individuală, se pot aplica ulterior pentru întreaga masă de deasupra suprafeței de alunecare. Sistemul forțelor

implicate în generarea ecuațiilor factorului de siguranță ce satisface echilibrul momentelor și / sau forțelor pentru o suprafață de alunecare circulară este schematizat în figura 3.1.

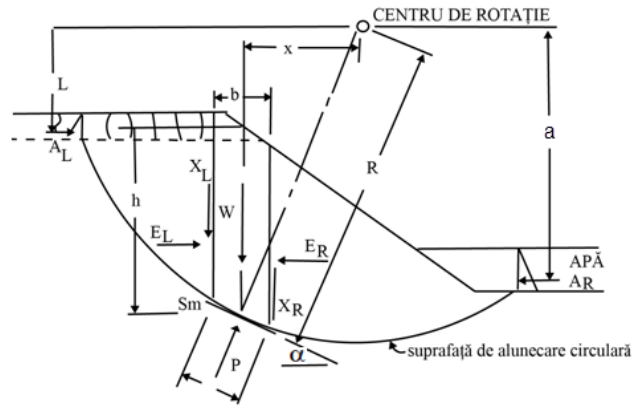


Figura 3.1. Sistemul forțelor care acționează la nivelul unei fâșii caracteristice (pentru o suprafață de alunecare circulară) (Fredlund et. al., 1981)

unde:

W = forța verticală totală datorată masei fâșiei caracteristice de lățime b și înălțime h ;

P = forța normală totală la baza fâșiei caracteristice;

S_m = forța de forfecare mobilizată la baza fiecărei fâșii caracteristice;

E = forțele normale orizontale apărute între fâșii;

X = forțele de forfecare verticale apărute între fâșii;

R = raza sau brațul momentului asociat cu forța de forfecare mobilizată S_m ;

x = distanța orizontală dintre centrul de greutate și centrul de rotație pentru o fâșie;

A = rezultanta forței hidrostactice;

a = distanța perpendiculară dintre rezultanta forței hidrostactice A și centrul de rotație;

b = lățimea fâșiei caracteristice;

α = unghiul dintre tangenta la centrul bazei fiecărei fâșii și orizontală.

Magnitudinea forței de forfecare mobilizată la baza unei fâșii caracteristice poate fi scrisă utilizând criteriul de rupere Mohr-Coulomb:

$$S_m = \frac{l}{F} [c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'] \quad (1)$$

unde:

c' = coeziunea efectivă

ϕ' = unghiul de frecare efectiv

$\sigma_n = P/l$

P = forța normală totală la baza fâșiei caracteristice

l = lungimea suprafeței de rupere de la baza fâșiei caracteristice

F = factorul de siguranță

Ecuația momentului de echilibru pentru GLE este descrisă pentru toate fâșiile caracteristice prin însumarea momentelor centrului de rotație:

$$\sum W_x - \sum S_m R \pm Aa = 0 \quad (2)$$

Forțele de forfecare dintre fâșiile caracteristice, precum și forțele normale verticale și orizontale (X și E) nu apar în mod direct în ecuația (2), deoarece aceste forțe din corpul versantului, ce acționează la nivelul unei fâșii caracteristice se anulează reciproc atunci când acesta este privit ca un întreg.

Forța de forfecare mobilizată la baza fiecărei dintre fâșiile caracteristice S_m , este scrisă utilizând rezistența la forfecare (1) și astfel ecuația (2) poate fi rezolvată respectând

echilibrul momentelor, iar factorul de siguranță F_m (F_m = factor de siguranță obținut în condițiile respectării echilibrului momentelor) se calculează cu relația (3).

$$F_m = \frac{\sum [c'l + (P-ul) \tan \phi'] R}{\sum W_x \pm Aa} \quad (3)$$

Ecuția echilibrului forțelor pentru metoda GLE este scrisă însumând forțele pe direcție orizontală pentru întregul versant:

$$\sum P \sin \alpha - \sum S_m \cos \alpha \pm A = 0 \quad (4)$$

Rezultanta forțelor dintre fâșiile caracteristice se va anula, astfel forța de forfecare mobilizată va fi scrisă în funcție de criteriul de rupere (1), iar ecuația (4) poate fi rezolvată respectând echilibrul forțelor și factorul de siguranță F_f (F_f = factor de siguranță obținut în condițiile respectării echilibrului forțelor) se calculează cu relația (5):

$$F_f = \frac{\sum [c'l + (P-ul) \tan \phi'] \cos \alpha}{\sum P \sin \alpha \pm A} \quad (5)$$

Forța normală totală la baza unei fâșii caracteristice P , poate fi evaluată pentru ecuațiile (3) și (5) însumând forțele verticale ale tuturor fâșiilor caracteristice (indicele L și R reprezintă laturile stângă (L) sau dreaptă (R) ale fâșiei caracteristice).

$$P = \frac{W - (X_R - X_L) - \frac{c'l \sin \alpha}{F} + \frac{ul \tan \phi' \sin \alpha}{F}}{m_\alpha} \quad (6)$$

unde:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F} \quad (7)$$

Factorul de siguranță F , din ecuația (6) respectă atât echilibrul momentelor, cât și pe cel al forțelor (Fredlund et. al., 1981).

3.1.1.2. Suprafața de alunecare non-circulară – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.2. Metoda Morgenstern-Price – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.3. Metoda Spencer – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.4. Metoda Bishop simplificată – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.5. Metoda Janbu simplificată – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.6. Metoda Janbu generalizată – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.1.7. Metodele echilibrului forțelor – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.2. Metodele numerice – metoda elementului finit (FEM)

Metoda numerică a elementului finit a fost aplicată prima dată în 1966 la rezolvarea problemelor de natură geotehnică (Bishop, 1966), iar de atunci lucrurile au evoluat într-un mod deosebit de accelerat, ajungându-se ca aceste metode numerice să fie aplicate cu succes pe scară largă pentru probleme deosebit de complexe ce nu puteau fi rezolvate prin metodele analitice, decât abordând diverse aproximații și ipoteze de multe ori speculative.

3.2.1. Modelul constitutiv utilizat la studiul de caz

În literatura de specialitate sunt prezentate un număr mare de modele constitutive pentru metoda numerică a elementului finit, fiecare captând diverse aspecte ale comportamentului masei de roci.

Modelul utilizat în cadrul prezentei lucrări este reprezentat de modelul Mohr Coulomb (MC), model considerat perfect elasto – plastic, ce utilizează cinci parametri: modulul lui Young E , coeficientul Poisson ν (reprezentativi pentru elasticitatea rocii), unghiul de frecare ϕ , coeziunea c (reprezentativi pentru plasticitatea rocii) și unghiul de dilatanță ψ . Deși poate fi luată în considerare și creșterea rigidității rocii cu adâncimea, acest model constitutiv nu ia în considerare dependența de efort și direcția de anizotropie. Modelul nu ilustrează comportamentul rocii și după ce aceasta atinge punctul critic. Rocile moi, precum argilele normal consolidate, prezintă, în timpul forfecării, o scădere a efortului efectiv mediu, prin urmare, modelul MC este potrivit pentru a fi utilizat la determinarea rezistenței la forfecare a rocilor (Brinkgreve, 2005).

Pentru o stabilitate pe termen lung (peste 1000 de ani) a acestor baraje, este necesară o evaluare constantă a raportului dintre infiltrațiile și exfiltrațiile din corpul iazului și aplicarea de măsuri necesare pentru controlul acestor mișcări ale apei în corpul barajului și pe suprafața acestuia (canale de gardă, canale de scurgere, șanțuri laterale etc) și de a preîntâmpina acumulări de apă în corpul barajului, acumulări ce pot determina o presiune excesivă în porii materialului.

Așadar, o bună înțelegere a comportamentului materialului pe termen lung, impune o înțelegere corectă a caracteristicilor acestuia: încărcări ciclice, fluaaj. Astfel, modelul constitutiv ales joacă un rol foarte important la analiza numerică. Validitatea modelului ales ar trebui să se facă prin compararea cu teste de laborator și măsurători pe teren (Zardari, 2011).

3.2.2. Principiul de calcul al metodei numerice aplicată studiului de caz –
pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

3.3. Metodele probabilistice

Rocile nu sunt medii perfect și linear elastice, ci sunt mai degrabă materiale complexe cu un comportament non-linear, anizotrop și dependent de factorul timp atunci când sunt supuse la solicitări (Zardari, 2011).

Metodele statistice, spre deosebire de cele deterministe, permit o evaluare probabilistică a analizei de stabilitate mai apropiată de realitate (Greco, 1996), deoarece iau în calcul variabilitatea parametrilor de intrare (parametrii geomecanici, nivelul hidrostatic, coeficienții seismici etc.). Valorile parametrilor de intrare din modelul de calcul nu pot fi întotdeauna cunoscute cu precizie și nici gradul de variabilitate al acestora.

În principiu, metoda statistică permite ca, pe baza datelor de intrare punctuale, să se genereze aleator mulțimi de valori pe baza unor distribuții statistice (normale, log normale, exponențiale, gamma etc.), astfel încât pentru o anumită suprafață critică de alunecare să existe mai multe valori ale factorului de siguranță. Pe baza distribuției acestor valori se poate determina probabilitatea de alunecare pentru modelul studiat.

Metodele probabilistice sunt încorporate metodelor numerice, precum metoda elementului finit (FEM) ce abordează conceptul reducerii rezistenței la forfecare (SSR) pentru calcularea factorului de siguranță la analiza stabilităților de taluze. Un avantaj principal al metodelor probabilistice este versatilitatea lor; ele pot modela o gamă largă de comportamente continue și discontinue ale rocilor.

3.3.1. Principiile generale de calcul ale analizelor probabilistice – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

3.3.2. Metoda estimării punctuale (PEM)

Metoda PEM (Rosenblueth, 1975) folosește o serie de estimări punctuale (puncte de pondere) ale funcției de răspuns pentru anumite valori selectate ale variabilelor aleatorii de intrare.

Metoda se aplică punctelor de pondere apropiate între ele. Metoda PEM folosește două valori de ponderare pentru fiecare variabilă aleatoare de intrare: deviația / abaterea standard (\pm) pentru fiecare parte a mediei. Pentru toate aceste posibile permutări de intrare se efectuează analize complete numerice (FEM), iar pe baza rezultatelor acestor analize numerice se calculează momentele statistice.

O dată cu creșterea numărului de variabile aleatorii de intrare, crește exponențial și numărul de estimări punctuale, deci timpul de calcul. Pentru a înlătura aceste dezavantaj al metodei originale s-au aplicat modificări de reducere a numărului de estimări punctuale (Hammah et. al., 2009).

3.3.3. Metoda Monte Carlo (MC)

Metoda Monte Carlo poate fi aplicată unei game foarte largi de probleme, fiind simplu de utilizat și având o precizie mare (în cazul folosirii unui număr suficient de simulări / eșantionări).

Această metoda utilizează variabile de intrare probabilistice combinate în mod aleatoriu pentru a efectua o serie de calcule numerice (FEM). Din simulările rezultate se obțin informații privind distribuția și momentele variabilelor de răspuns.

Spre deosebire de metoda estimării punctuale (PEM), numărul de simulări obținute nu depinde de numărul de variabile aleatorii de intrare, însă metoda Monte Carlo necesită un număr mare de simulări pentru a atinge precizia dorită (în cazul unui număr redus de simulări se obține forma “rudimentară” a momentelor statistice ale variabilelor de ieșire).

Folosind estimările momentelor și presupunând o funcție probabilistică a densității pentru o variabilă de ieșire, se poate aproxima distribuția acestor variabile de ieșire și se poate estima probabilitatea de apariție a instabilității.

Probabilitatea de apariție a fenomenelor de instabilitate (probabilitatea de rupere) μ și abaterea standard (abaterea standard) σ se pot calcula folosind relațiile (Hammah et. al., 2009):

$$\mu = 1 - \theta \quad (25)$$

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad (26)$$

unde:

θ = funcția normală standard a distribuțiilor cumulative

β = indicele de fiabilitate.

3.3.4. Integrarea metodelor probabilistice metodelor deterministe de evaluare a stabilității iazurilor de decantare – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

3.3.5. Avantajele utilizării metodelor probabilistice – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

4. Metode de achiziție, prelucrare și corelare a parametrilor utilizați la modelarea stabilității iazului de decantare Tărnicioara

La alegerea metodelor adecvate de investigație se selectează, într-o primă etapă, metodele mai puțin costisitoare, urmând a se extinde investigația, dacă se impune, și prin metode mai scumpe pentru investigații detaliate (de exemplu: metodele geofizice înaintea teledetecției, metodele geologice și hidrogeologice înaintea celor geochimice etc).

De asemenea, la alegerea metodelor adecvate de investigare a terenului se va mai lua în considerare și tipul de proiect, mărimea zonei investigate, condițiile geologice întâlnite, condițiile de suprafață și de accesibilitate, precum și limitările de buget și de timp.

În funcție de configurația amplasamentului și formațiunile morfologice străbătute, numărul, tipul și disponerea în plan a lucrărilor de investigare va fi stabilit în puncte și pe axe caracteristice, numărul lor inițial putând fi redus sau sporit pe parcursul cercetării în funcție de rezultatele obținute (Knödel et. al., 2007).

Principalele metode de achiziție a valorilor parametrilor fizico-mecanici și chimici caracteristici fenomenelor generatoare de risc, ce însoțesc iazurile de decantare din perimetrele miniere, sunt:

- metode directe reprezentate de cartografiere, foraje hidro-geotehnice, metode de teledetecție, investigații geotehnice in situ (penetrarea dinamică standard –SPT, penetrarea dinamică pe con – DP, penetrarea statică pe con - CPT, sondaje cu dilatometrul plat – DMT, sondaje cu determinări presiometrice – PMT, sondaje cu aparatul de forfecare cu palete – FVT, încercări cu placa – PLT),
- metode indirecte (geofizice) reprezentate de metode geoelectrice, seismice, georadar, electrometrice, electromagnetice, radiometrice, gravimetrice, magnetometrice etc;
- Alături de aceste metode, informații importante pot fi preluate și din rețelele de monitorizare (piezometre, înclinometre, reperi topografici etc).

În cele ce urmează, în cadrul studiului nostru de caz, vor fi prezentate detaliat metodele de achiziție directe și indirecte utilizate la investigarea iazului de decantare Tărnicioara în vederea obținerii parametrilor fizico-mecanici, a prelucrării și corelării acestora în scopul modelării stabilității iazului, principiile și tehnicile de calcul, precum și metodologiile de interpretare a datelor.

4.1. Metode directe de achiziție – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.1.1. Foraje hidrogeotehnice – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.1.2. Teste de laborator – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.1.3. Metode de teledetecție-interferometria InSAR – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.1.3.1.Principiul de calcul al interferometriei InSAR – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.1.3.2.Aplicabilitatea iNSAR în industria minieră – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.2. Metode indirecte de achiziție (metode geofizice) – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.2.1. Metode de rezistivitate electrică – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.2.1.1. Principiul tehnicii de achiziție ERI (Electrical Resistivity Inaging) – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.2.1.2. Metodologia de interpretare a datelor de electrometrie – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

4.3. Rețea de monitorizare (piezometre, reperi topografici, înclinometre) – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta în extenso

5. Studiul de caz - Prezentare generală a amplasamentului

Motivele alegerii acestui obiectiv ca studiul de caz a iazului de decantare Târnicioara, cariera Ostra, județul Suceava, România au fost determinate de faptul că lucrările de închidere erau finalizate la data investigării, acesta deținând o rețeaua de monitorizare parametrică în funcțiune (rețea de monitorizare ce furnizează un volum informațional de date impresionant, deținută de către SC Conversmin SA). Pe întreaga suprafață a iazului de decantare Târnicioara au fost realizate măsurători de teledetecție InSAR, deoarece acesta, alături de alte trei iazuri de decantare din județul Suceava (Valea Straja, Poarta Veche și Ostra), au făcut parte din Programul Național PHARE 2006 pentru sprijinirea programelor pilot de monitorizare a iazurilor de decantare din județul Suceava, acesta fiind un alt motiv al alegerii ca studiu de caz al acestui obiectiv.

5.1. Geomorfologia zonei

Din punct de vedere **morfologic**, perimetrul iazului de decantare Târnicioara aparține Orogenului Carpat, fiind amplasat, în apropierea limitei dintre acesta și Platforma Moldovenească, unitate geomorfologică ce prezintă un relief de podiș.

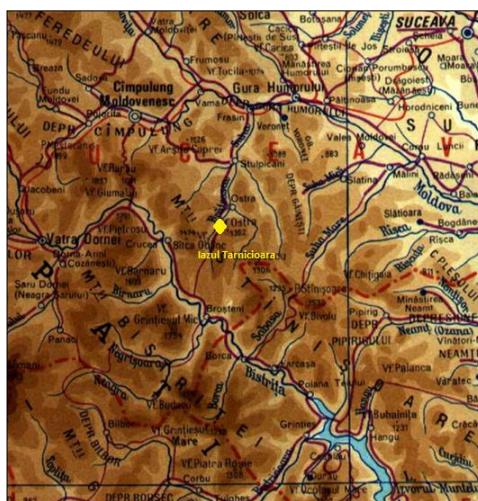


Figura 5.2. Harta fizico-geografică a amplasamentului (Mândruț, 2008)

Iazul Târnicioara este situat la baza Munților Rarău, între Munții Stânișoarei și depresiunea Găinești, în bazinul râului Suha.

5.2. Geologia zonei

Particularitățile evoluției geotectonice și bazinale a Orogenului Carpaților Orientali, a avut drept consecință formarea unităților morfostructurale majore, dezvoltate longitudinal pe direcția NNW-SSE (Juravle, 2015-2016).

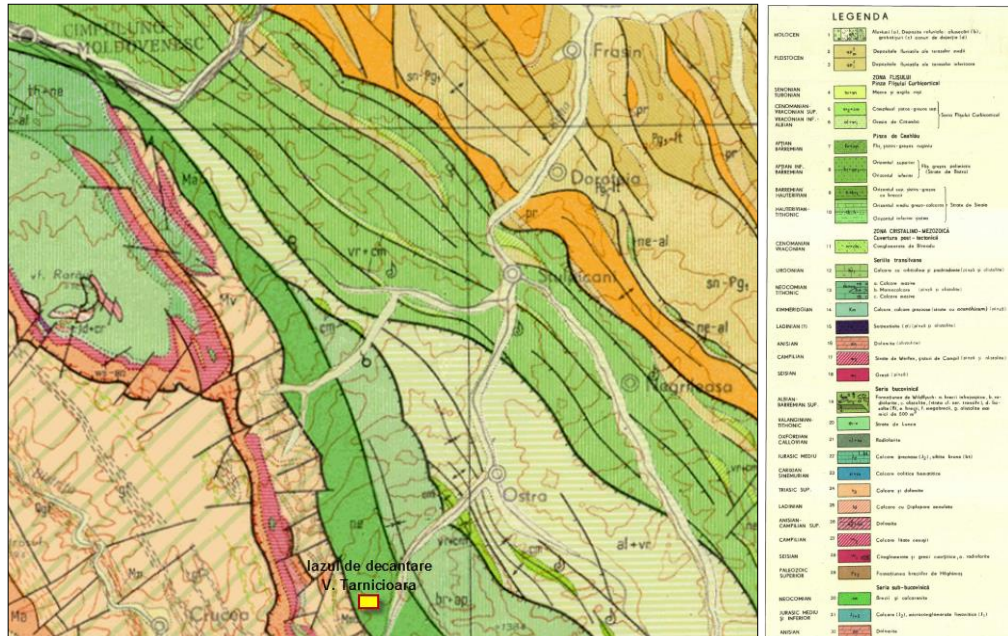


Figura 5.4. Harta geologică a amplasamentului iazului de decantare Târnicioara (Petrescu et. al., 1966-1968)

Zona cristalino-mezozoică alcătuiește axul central al Carpaților Orientali, formând substratul munților Maramureș, Rodnei, Bistriței Aurie (Suhard, Culmea Țapului, Obcina Mestecănișului), Rarău, Giupalău, Bistriței Mijlocii, Giurgeu, Hăghimaș și Perșani.

Din punct de vedere **litostratigrafic** se separă formațiunile cristaline de soclu, prealpine și o cuvertură sedimentară mezozoică. Cuvertura sedimentară este alcătuită la rândul ei dintr-o serie autohtonă și o serie alohtonă.

Din punct de vedere **sedimentogenetic și tectogenetic**, în bazinului central-est carpatic se separă compartimentul moldav între Tisa și Ciuc și compartimentul Perșani în sud (Juravle, 2015-2016).

Din punct de vedere **tectonic** se disting două unități majore: unitatea autohtonă (pânzele bucovinice), alcătuită din soclul cristalin și sedimentarul autohton, denumită și unitatea bucovinică și unitatea alohtonă transilvană (pânzele transilvane), formată din sedimentarul și complexe ofiolitice provenite din zona riftului transilvan.

5.2.1. Soclul cristalin – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

5.2.2. Cuvertura sedimentară mezozoică – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

5.3. Hidrologia zonei

Aproape în totalitatea lor, râurile care drenează teritoriul județului sunt tributare Siretului, datorită configurației generale a reliefului. Afluenții principali: Suceava, Moldova, Bistrița, își au izvoarele în munții înalți de la vest și nord-vest.

Zona studiată este tributară pârâului Brăteasa și afluenților săi, pâraiele Tarnița, Scăldători și Târnicioara. Pârâul Brăteasa este afluentul râului Suha, la rândul lui afluent de dreapta al râului Moldova. Perimetrul este situat la aproximativ 220m amonte de confluența pârâurilor Tarnița și Brăteasa, chiar la confluența pâraielor Scăldători și Târnicioara.

5.4. **Hidrogeologia zonei** – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

5.5. Caracteristicile climatice ale zonei

Din punct de vedere al sectoarelor de climă zonală, zona studiată este încadrată într-un etaj topoclimatic colinar cu influențe ale climei sub-baltice (figura 5.6.).

Din punct de vedere al precipitațiilor atmosferice, zona studiată are valori medii multianuale de 600 mm. Precipitațiile lunii februarie (luna cea mai secetoasă) înregistrează valori cuprinse între 20 - 30 mm/lună, iar în luna iunie (luna cea mai ploioasă) 80 – 90 mm/lună.

Temperatura aerului (valorile medii multianuale) în zona studiată este între 6 – 8°C. În luna ianuarie, temperatura medie variază între -5°C și -4°C; temperatura medie a lunii iulie variază între 18 și 20°C.

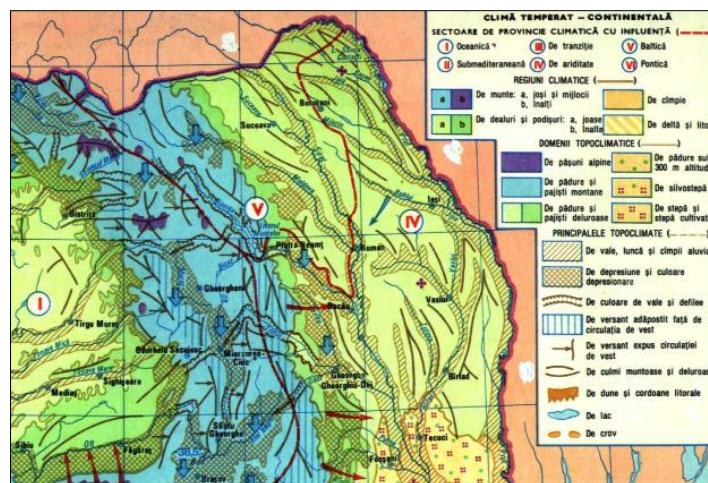


Figura 5.6. Harta climatică a zonei (Mândruț, 2008)

5.6. Seismicitatea zonei

Din punct de vedere seismic, accelerația orizontală a terenului în care este amplasat iazul de decantare Târnicioara, jud. Suceava are valoarea $K_s=0,15$, conform Indicativ NP 076/2013.

Perioada de colț (control) T_c a spectrului de răspuns reprezintă granița dintre zona de valori maxime în spectrul de accelerații absolute și zona de valori maxime în spectrul de

viteze relative. Pentru zona studiată, perioada de colț are valoare $T_c=0,7$ sec, conform normativelor în vigoare. (Indicativ P 100-1/2013).

5.7. Caracteristicile generale ale iazului

Iazul de decantare Târnicioara este catalogat ca fiind un iaz de vale de mare capacitate, situat la confluența pâraielor Scăldători cu Târnicioara.

Iazul de decantare Târnicioara a servit la depozitarea sterilului minier rezultat din prelucrarea minereurilor de cupru, plumb, zinc și baritină în Uzina de Preparare Târnița a perimetrului minier Ostra, situat pe teritoriul comunei Ostra, județul Suceava.

Iazul este amplasat la circa 220 m amonte de confluența cu pâraul Brăteasa și este delimitat spre aval, pe valea Târnița, de un baraj principal de la care s-a realizat înălțarea spre interior. În amonte este delimitat pe ambele văi, Scăldători și Târnicioara, de alte două baraje. Aceste baraje s-au construit o dată cu barajul principal și s-au înălțat tot spre interior o dată cu creșterea nivelului sterilului din iaz.

Conform Registrului Național al Barajelor din Romania iazuri de decantare din industria minieră, iazul de decantare Târnicioara este încadrat în clasa a III de importanță (Standard STAS 4273-83) și în categoria C de importanță ($RB = 0,148$) (Regulament NTLH-021 2002).

Pentru evacuarea debitelor naturale de pe cele două văi închise (Târnicioara și Scăldători) s-au folosit două soluții diferite (figura 5.11.):

- apa pâraului Târnicioara a fost deviată printr-o galerie în pâraul Brăteasa, galerie hidrotehnică săpată prin metode miniere;
- apa pâraului Scăldători subtraversează iazul printr-un canal închis din beton armat prefabricat, amplasat sub iazul de decantare, pe firul văii naturale.

Pe timpul exploatării evacuarea apelor tehnologice și pluviale din iaz s-a făcut prin sonde inverse metalice.

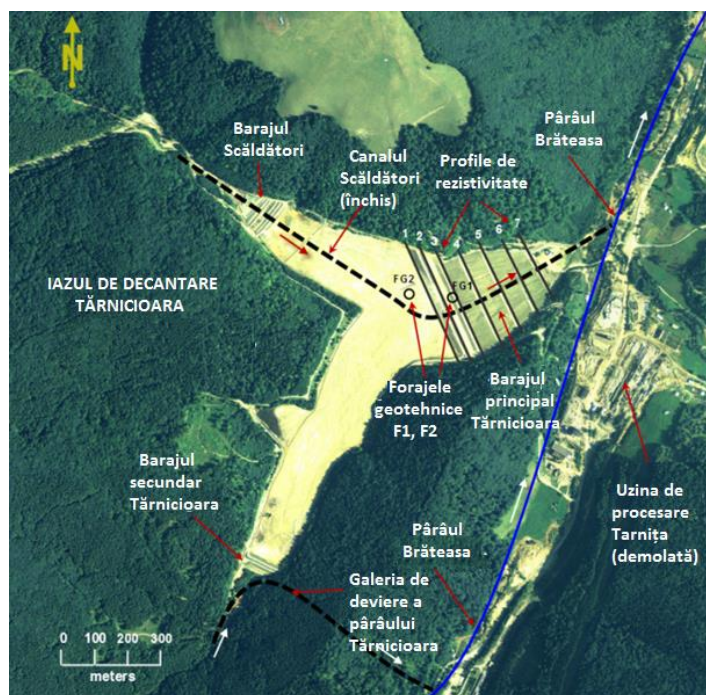


Figura 5.11. Vedere în plan a iazului Târnicioara (Banu et. al., 2015)

5.8. Scurt istoric al activității iazului Târnicioara – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

6. Investigații efectuate pe iazul de decantare Tărnicioara

6.1. Investigații geotehnice

Forajul FG1, amplasat pe o bermă a barajului principal Tărnicioara, s-a executat până la adâncimea de 40 m, neinterceptând terenul natural. Până la adâncimea de 24 m s-a forat fără tubaj, după care coloana de foraj s-a tubat până la adâncimea finală de 40 m. Terenul nisipos în care s-a forat este de fapt materialul hidrociclonat din iaz cu care s-a înălțat barajul principal prin diguri succesive. S-au prelevat 10 probe din foraj, din 4 în 4 m.

Forajul FG2, amplasat pe plaja iazului Tărnicioara, s-a executat până la adâncimea de 60 m, de asemenea, fără a intercepta terenul natural. Forajul a fost executat cu tubaj din cauza terenului saturat cu apă. Terenul nisipos în care s-a forat este de fapt partea mai fină a materialului hidrociclonat cu care s-a înălțat barajul principal prin diguri succesive. S-au prelevat 15 probe din foraj, din 4 în 4 m.

Cele două foraje geotehnice au fost săpate în luna august 2011 în scopul prelevării probelor necesare determinării în laborator a parametrilor geomecanici necesari calculului de stabilitate. Nivelul apei după stabilizare în cele două foraje a fost de 28 metri măsurat de la guler.

În vederea realizării analizei de stabilitate a iazului de decantare Tărnicioara, a fost necesară efectuarea de analize pe cele 25 de probele recoltate din forajele executate, cu scopul determinării următorilor parametri:

- compoziția granulometrică pe fracțiuni;
- determinarea greutății volumice γ (kN/m^3) în stare uscată și naturală;
- determinarea porozității n (%);
- determinarea indicelui porilor e (-);
- determinarea umidității naturale w (%);
- determinarea gradului de saturație S_r (-);
- încercări de compresiune – tasare în edometru cu determinarea modului de deformare edometric M (kPa); coeficientul de compresibilitate a_v (1/kPa) și tasarea specifică ϵ (%);
- determinarea conductivității hidraulice k (m/s) în stare saturată;
- determinarea parametrilor rezistenței la forfecare: unghiul de frecare ϕ (°) și coeziunea c (kPa) la caseta de forfecare în stare nedrenată-consolidată.

6.2. Investigații geofizice

Pe iazul Tărnicioara s-a efectuat măsurători geoelectrice utilizând metodologia de măsură a rezistivității electrice prin tehnica ERI - Electrical Resistivity Imaging.

Dispozitivul folosit pentru efectuarea măsurătorilor a fost de tipul Wenner-Schlumberger cu electrozii poziționați la o distanță, de 5m între ei pe toată lungimea profilului.

Disponerea celor 16 profile este prezentată mai jos:

- pe plaja iazului Tărnicioara au fost executate 7 profile longitudinale (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7), dispuse până la confluența cu valea Scăldători și acoperindu-se astfel în totalitate plaja iazului. (figura 6.6.);
- pe barajul principal au fost executate 7 profile longitudinale cu direcția bermelor (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7): un profil pe plajă (figura 6.14.), unul pe coronament, patru pe bermele aval și unul pe coronamentul digului de amorsare;

- pe a doua îndiguire din amonte, barajul Valea Scăldători, au fost executate două profile longitudinale (S1, S2), unul pe coronamentul barajului (figura 6.22.) și altul pe plajă.

Pe baza acestor măsurători și studiind zonele evidențiate de acestea, au putut fi stabilite nivele hidrostatice care au fost reprezentate pe secțiunile de rezistivitate aparentă sau rezistivitate reală (modelată cu algoritmi de inversiune).

Metoda ERI a pus în evidență pe unele secțiuni, traseul galeriei de subtraversare Scăldători (acolo unde adâncimea de investigație a permis) și un alt traseu excentric axului barajului principal care ar putea fi un traseu prezumptiv al conductei de colectare a apelor limpezite de la sondele inverse.

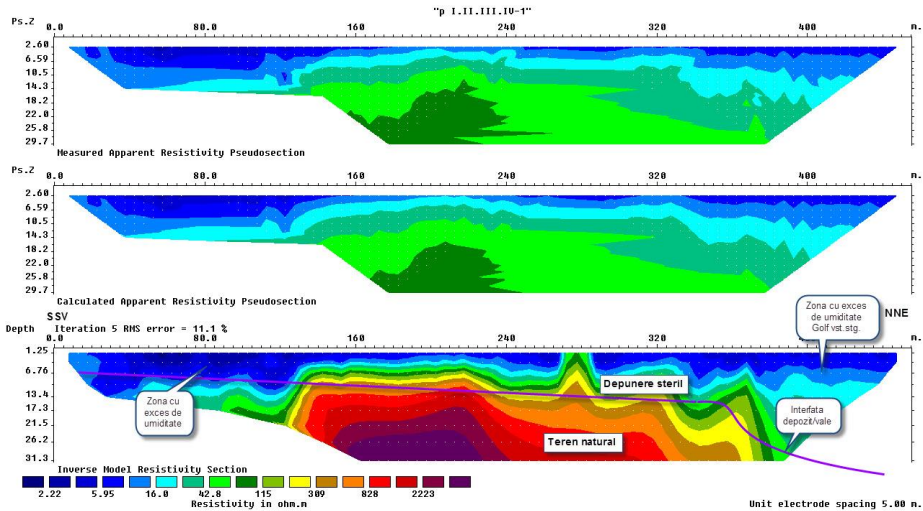


Figura 6.6. Profile de rezistivitate aparentă și reală - pe suprafața depozitului în Valea Tărnicioara (P1)

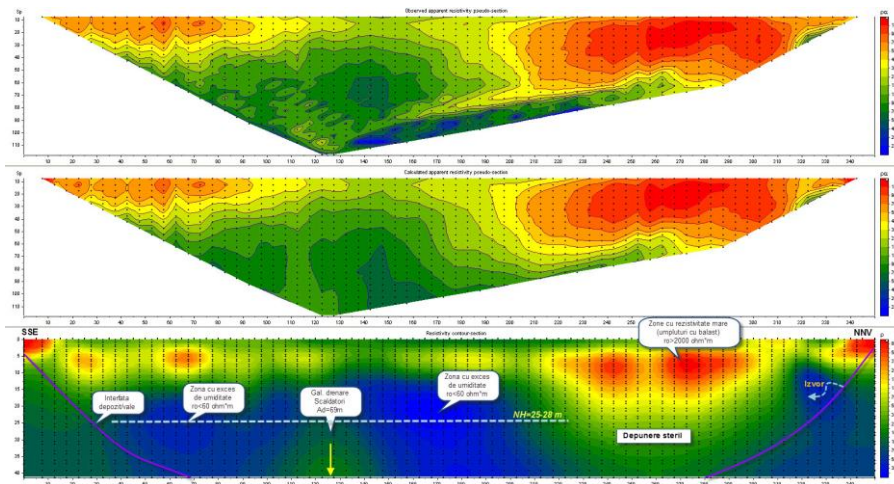


Figura 6.14. Profile de rezistivitate aparentă și reală - Plajă – Barajul principal (T1)

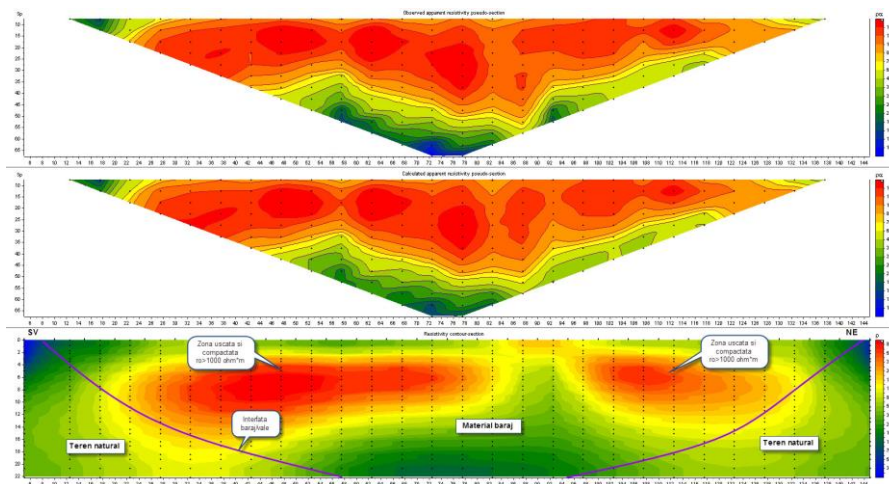


Figura 6.22. Profile de rezistivitate aparentă și reală pe coronamentul barajului Valea Scăldători (S1)

6.2.1. Rezultatele investigațiilor electrometrice

Datele primare obținute în urma măsurătorilor de electrometrie au fost prelucrate cu ajutorul softului RES2DINV, valorile necorespunzătoare, fiind eliminate sau corectate, după o analiză statistică, cu ajutorul aceluiași program.

După modelarea cu algoritmi de inversiune, prin metoda elementului finit, rezultatele finale au fost prezentate pe secțiuni bidimensionale de rezistivitate aparentă (măsurată și calculată) și de rezistivitate reală, pe cele trei zone (valea Târnicioara, barajul principal și valea Scăldători) în modele 3D de tip “fence panels”.

Din interpretarea datelor modelului 3D de rezistivitate electrică de pe plaja iazului (zona văii Târnicioara), reies următoarele (figura 6.32.):

- există o zonă foarte saturată pe primii 160 de metri începând de la primul electrod situat spre baraj ce confirmă faptul că datorită cotelor mai joase din această zonă, apa a stagnat și s-a infiltrat în porii materialului (P1÷P5);
- interfața material depus / teren natural a fost pusă în evidență la adâncimi cuprinse între 10 m și 37 m (P1 ÷ P7);
- în general, nivelul apei se situează la cca. 1.5 – 2.0 m (P1, P2);
- pe profilul 5 (lângă sonda inversă S1) a fost pus în evidență un fenomen de sufoziune;
- piezometrul P3 din capătul profilului 3 confirmă adâncimea nivelului hidrostatic la circa 1,5 m.

În zona barajului Scăldători au fost executate două profile de electrometrie, unul pe plajă și altul pe coronamentul barajului (figura 6.34.).

Din rezultatele prelucrării datelor se pot trage următoarele concluzii:

- materialul din baraj, conform profilului executat pe coronament, are rezistivități mari, este uscat iar în zona superioară materialul este compactat pe o adâncime de 8-12 metri;
- pe profilul de pe plajă se remarcă o zonă cu rezistivități mari pe jumătatea dinspre versantul drept, iar spre versantul stâng o zonă cu rezistivități foarte mici, ce indică posibile infiltrații dinspre posibile izvoare de pantă. La suprafață există indicii cu privire la acest lucru observându-se zone cu ape stagnante și vegetație tipică.

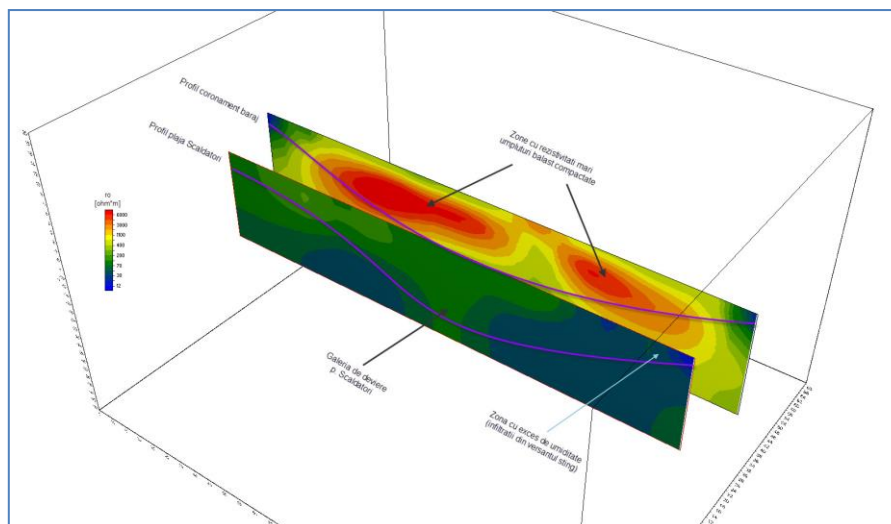


Figura 6.34. Interpretarea modelului 3D de rezistivitate electrică obținut prin profilare rezistivimetrică, în zona barajului secundar al iazului Tărnicioara – valea Scăldători (S1÷S2)

6.3. Achiziția de date prin teledetecția InSar

Achiziția datelor InSAR pentru iazul de decantare Tărnicioara s-a realizat în cadrul Programului Național PHARE 2006 aprobat de către Comisia Europeană pentru sprijinirea programelor pilot de monitorizare a iazurilor de decantare din județul Suceava și implementat de M.E.C.M.A. DGRM cu indicativul 2006/018-147-03.03/04.11 (Răducă, 2010).

Datorită faptului că întreaga zonă de măsurare cuprinde o suprafață de circa 2500 km² (50x50 km), datele satelitare au cuprins în afară de iazul Tărnicioara și alte trei iazuri de decantare, respectiv iazurile Valea Straja, Poarta Veche și Ostra. Pentru fiecare iaz au fost create hărți de deformare separate, deoarece zonele de calibrare sunt diferite.

Tehnica de măsurare constă în achiziționarea unor imagini satelitare în banda X ($\lambda=3$ cm) cu ajutorul senzorilor InSAR ai satelitului german de ultimă generație TerraSAR-X.

Rezoluția în plan orizontal a fost de aproximativ 3x3 metri. Însă în plan vertical, deformarea terenului a putut fi redată cu precizie milimetrică.

Din analiza imaginii optice se remarcă lipsa de vegetație și o relativă lipsă a apei în zonă, fapt ce constituie un avantaj pentru tehnica InSAR; prin urmare majoritatea celor 50.000 de pixeli au reflectat activ semnalul radar.

6.3.1. Rezultatele măsurătorilor InSAR

Achiziția datelor satelitare, prelucrarea interferogramelor și întocmirea hărților de deformare s-a realizat de către Advanced Studies and Research Center ASRF – București (Șerban, 2010).

În urma măsurătorilor InSAR efectuate pe suprafața iazului Târnicioara au putut fi puse în evidență următoarele:

- în perioada 18.05 – 08.10.2011 (5 luni de monitorizare) iazul Târnicioara a suferit un fenomen de tasare importantă în general pe brațul Scăldători (incluzând și taluzurile) (figura 6.35.). Pe amprența barajului principal, deformățiile măsurate pe o perioadă de 143 de zile sunt cuprinse între -10 și +5 mm;
- în perioada 20.06 – 08.10.2011 (4 luni de monitorizare) s-au observat fenomene de tasare accentuată pe taluzurile brațurilor Scăldători și Târnicioara, de până la 70 mm / 110 zile. De asemenea, centrul iazului suferă de fenomene de tasare importante, până la 80 mm / 110 zile (figura 6.36.). În zona barajului principal; deformățiile măsurate pe o perioadă de 110 zile sunt cuprinse între -25 și +5 mm;
- în perioada 23.07 – 27.09.2011 se observă o tasare accentuată în lunile de vară, acest lucru fiind pus în evidență și pe profilele de deformare (figura 6.37.). În zona barajului principal, deformățiile măsurate pe o perioadă de 66 zile sunt cuprinse între -50 și -20 mm. Pentru această situație s-a realizat o modelare numerică pentru corelarea datelor de piezometrie cu cele de deformare InSAR;
- în perioada 27.09 – 19.10.2011 mișcarea de tasare s-a accentuat, cu valori de până la 15 mm în zonele centrale. Pe taluzul principal se poate observa o zonă locală cu o mișcare de tasare de până la 30 mm (figura 6.38.). Fenomene asemănătoare apar și pe taluzul Văii Târnicioara. În zona barajului principal, deformățiile măsurate pe o perioadă de 22 zile sunt cuprinse între -20 și +2 mm.

În figura 6.39. sunt prezentate profilele de deformare aferente unor reflectori naturali poziționați în principal în zona barajului de amorsare din aval.

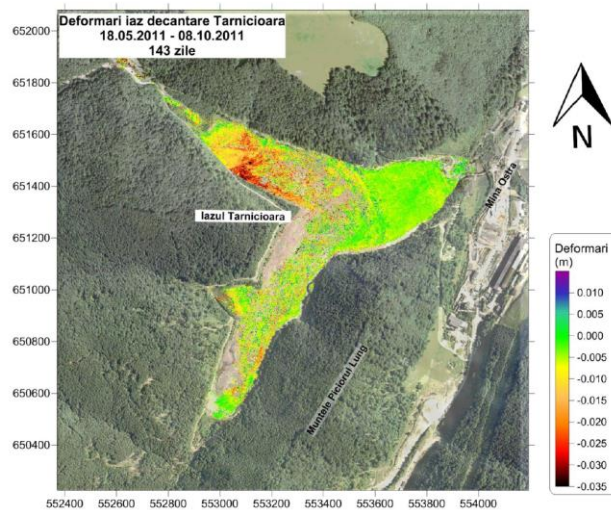


Figura 6.35. Harta de deformare pentru iazul Târnicioara pe perioada 18.05-08.10.2011 (după Advanced Studies and Research Center -ASRC București)

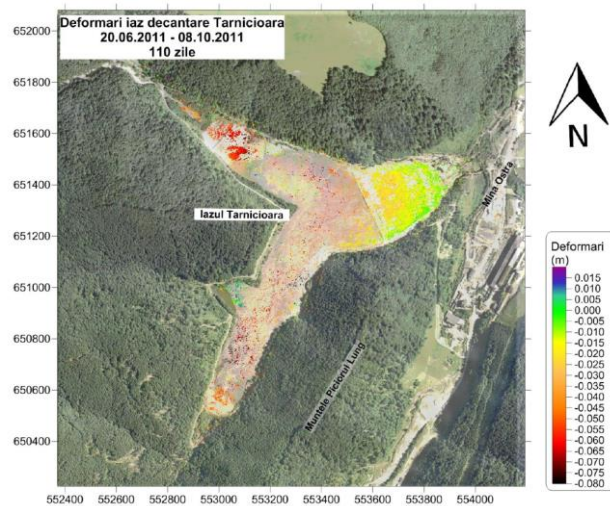


Figura 6.36. Harta de deformare pentru iazul Tarnicioara pe perioada 20.06-08.10.2011 (după Advanced Studies and Research Center -ASRC București)

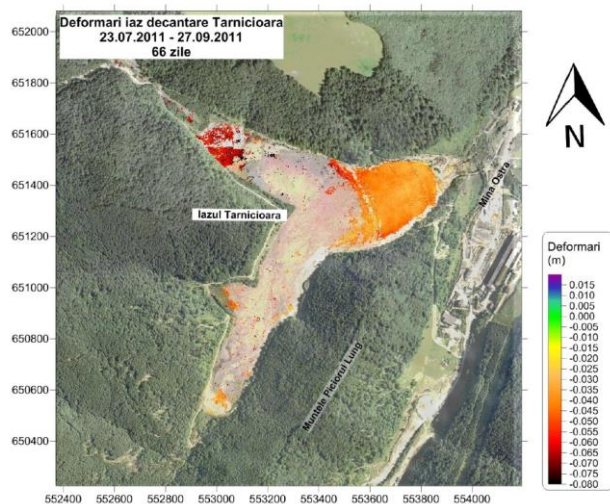


Figura 6.37. Harta de deformare pentru iazul Tarnicioara pe perioada 23.07-27.09.2011 (după Advanced Studies and Research Center - ASRC București)

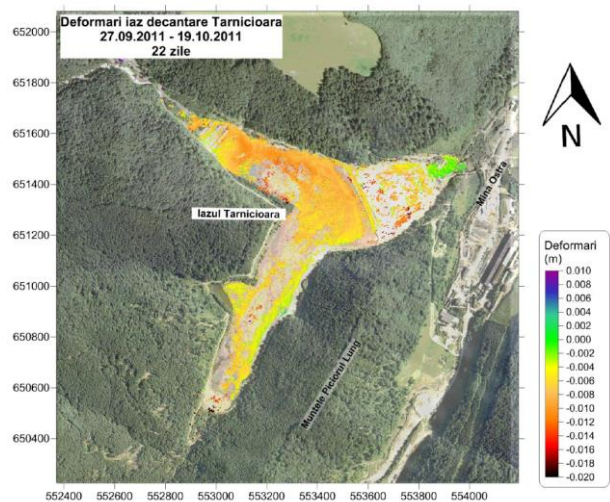


Figura 6.38. Harta de deformare pentru iazul Tarnicioara pe perioada 27.09-19.10.2011 (după Advanced Studies and Research Center - ASRC București)

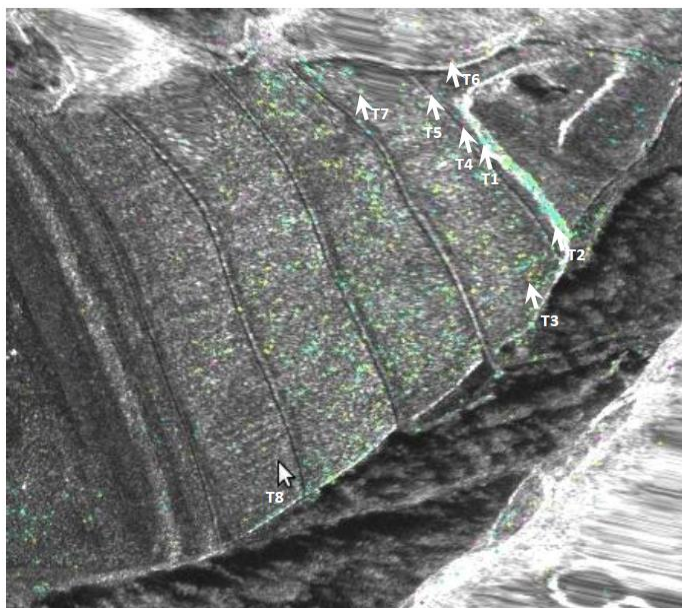


Figura 6.39. Poziția punctelor T 1 – T 8 de pe iazul Tărnicioara unde au fost calculate profilele de deformare în timp (după Advanced Studies and Research Center - ASRC București)

6.4. Rețeaua de monitorizare

Alături de metodele directe (foraje geotehnice, analize de laborator, teledetecția InSAR) și indirecte (măsurători de electrometrie), un volum impresionant de date a fost obținut din rețeaua de monitorizare existentă deținută de către SC Conversmin SA.

Rețeaua de monitorizare a iazului Tărnicioara este compusă din două înclinometre (Î1, Î2) și cinci piezometre (P1, P2, P3, P4, P5), foraje de monitorizare executate în corpul iazului în scopul înregistrării permanente a oscilațiilor nivelului hidrostatic.

Valorile nivelelor hidrostatice medii, minime și maxime corespondente celor 5 piezometre au fost înregistrate automat de stația de monitorizare realizată prin programul PHARE. Valorile nivelelor piezometrice sunt determinate având ca reper talpa piezometrului.

Tabel. 6.1 Valorile nivelelor hidrostatice medii, minime și maxime ale celor 5 piezometre

Piezometru	P1	P2	P3	P4	P5
Lungime piezometru	15	15	15	10	7
NH mediu	0,803	0,973	1,275	0,621	0,450
NH min	0,774	0,102	0,874	0,144	0,416
NH max	0,849	2,470	5,524	2,573	0,501

7. Sistemul integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc pentru iazul de decantare Tărnicioara

7.1. Evaluarea stabilității prin metode deterministe

În vederea evaluării stabilității studiului de caz ales, a fost aleasă o secțiune geotehnică reprezentativă, ce străbate perpendicular taluzele paramentului aval. Aceasta este direcționată SV-NE și are o lungime de aproximativ 550 m. Pe această secțiune s-au reprezentat atât forajele geotehnice, cât și cele cinci piezometre P1, P2, P3, P4, P5 (figura

7.1.) (Mihai, 2006). Pentru această secțiune de calcul au fost considerate două ipoteze, cea statică și cea pseudo-statică în care intervin solicitările seismice la magnitudinea zonei amplasamentului ($K_s=0,15$).

Parametrii geotehnici utilizați la modelarea stabilității și determinarea factorului de siguranță prin metode deterministe: greutatea volumetrică, greutatea volumetrică în stare saturată, coeziunea și unghiul de frecare (criteriul de rupere Mohr-Coulomb) au fost determinați în laboratorul geotehnic al Facultății de Geologie și Geofizică București și sunt reprezentați în tabelul 7.1.

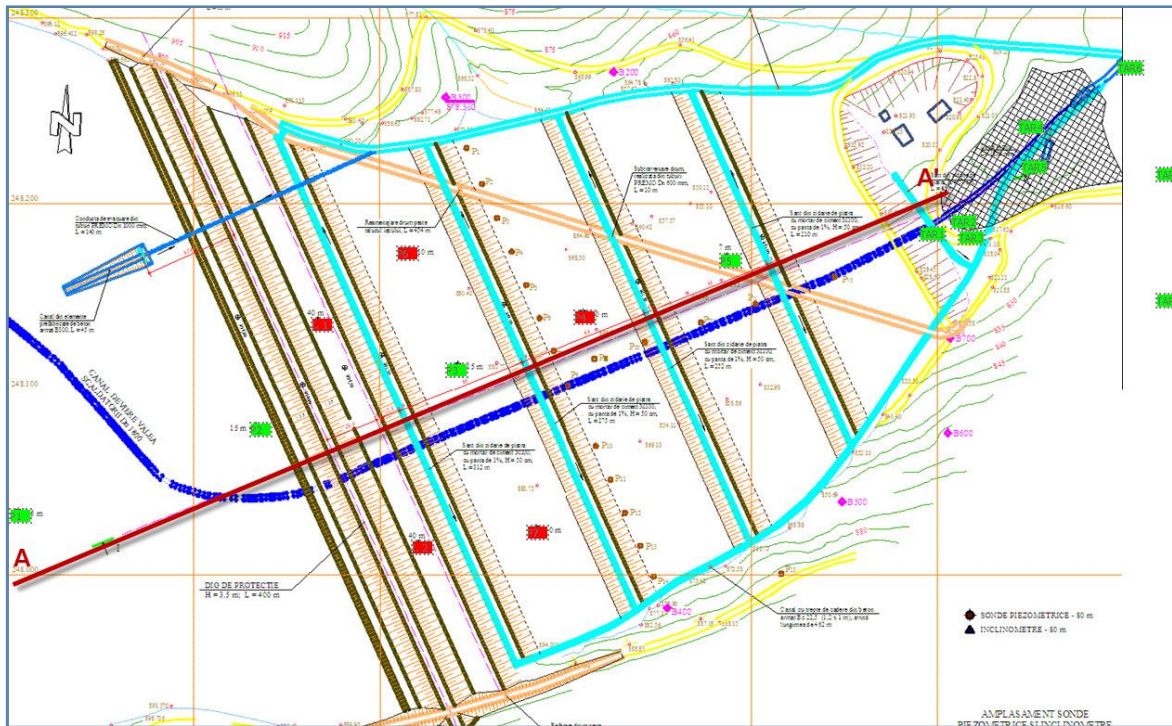


Figura 7.1. Amplasarea secțiunii caracteristice de calcul în planul barajului principal al iazului de decantare Tărnicioara

Tabel 7.1 Parametrii geotehnici utilizați la evaluarea stabilității iazului Tărnicioara

Tip material	Legendă	Greutate volumetrică (kN/m ³)	Greut. vol. saturată (kN/m ³)	Coeziune (kN/m ²)	Unghi de frecare (°)
Digul de amorsare	■	20	21,5	0	30
Supraînălțarea	■	21,19	22,54	6,5	28
Depunere nisip fin	■	23,87	26,13	1,7	30
Depunere nisip prăfos NP1	■	23,96	25,42	5,6	29
Depunere nisip prăfos NP2	■	20,87	21,35	14,8	24
Terenul natural marnă argiloasă	■	19,5	19,5	18	22

În prima etapă a fost aplicată **metoda analitică** a echilibrului limită, astfel secțiunea bidimensională de calcul a fost analizată prin cinci metode analitice diferite ce satisfac fie echilibrul static al forțelor sau momentelor (Bishop, Lowe-Karafiath și Janbu), fie simultan echilibrul static al forțelor și al momentelor (Spencer și Morgenstern-Price), utilizând softul Rocscience Slide versiunea 5 (Cheng et. al., 2008).

Astfel, analiza s-a efectuat pentru un număr de circa 5000 suprafețe de alunecare per calcul împărțite în 50 de fâșii, convergența fiind de 0,001, iar numărul maxim de iterații fiind de 100.

În vederea confirmării corectitudinii factorului de siguranță obținut prin metoda echilibrului limită, a fost aplicată, în cea de-a doua etapă, și **metoda numerică** a elementelor finite, varianta cu reducerea parametrilor de forfecare (SSR – Shear Strength Reduction), utilizând softul Rocscience Phase2 versiunea 6.

Valorile factorilor de siguranță determinați prin cele două metode de modelare a stabilității iazului prezintă mici diferențe (tabel 7.2.), diferențe ce pot fi explicate prin reducerea unghiului de dilatanță la 0 în timpul rulării modelărilor analitice și numerice. Aproximarea cu 0 a acestui parametru, ce cuantifică schimbările de volum ale rocii ce au loc în timpul fluajului acesteia, se face, pe de-o parte, deoarece determinarea lui necesită analize complexe de laborator și pe de altă parte, pentru că reducerea lui la 0 conduce la o mică diminuare a valorii factorului de siguranță. Din acest motiv se recomandă utilizarea în paralel a metodelor deterministe.

Stabilitatea barajului a fost calculată prin metodele analitice și numerice ținând cont de nivelul hidrostatic (măsurat în luna august în FG1 și FG2). Din cauza perioadei în care s-au executat forajele (luna secetoasă) și pe de altă parte, datorită lucrărilor de drenare existente și funcționale (șanțuri de gardă, canale deschise cu trepte, descărcătoare de torenți de pe versanți, timpanul de evacuare ape de pe plajă), nivelul hidrostatic la data măsurării în cele două foraje este foarte scăzut.

În general, pentru perioadele secetoase ale anului (nivel hidrostatic măsurat în forajele geotehnice), calculele de stabilitate atât cele analitice, cât și cele numerice arată valori acoperitoare ale factorului de siguranță determinat, atât pentru ipoteza statică, cât și pentru cea pseudo-statică. Rezultatele calculelor de stabilitate pentru iazul de decantare Tărnicioara obținute prin metode analitice și numerice, sunt centralizate în tabelul 7.2.

Tabel 7.2 Rezultatele calculelor de stabilitate pentru iazul de decantare Tărnicioara obținute prin metoda echilibrului limită și metoda elementului finit

Metode de modelare	Bishop		Janbu		Spencer		Lowe-Karafiath		Morgenstern-Price	
	F _{static}	F _{dinamic}	F _{static}	F _{dinamic}	F _{static}	F _{dinamic}	F _{static}	F _{dinamic}	F _{static}	F _{dinamic}
Metoda de modelare analitică										
NH măsurat în forajele geotehnice	2,003	1,142	2,029	1,156	1,993	1,136	1,996	1,126	1,997	1,136
Valorile medii ale factorului de siguranță	1,691	0,948	1,729	0,957	1,695	0,955	1,692	0,933	1,694	0,952
Valorile minime ale factorului de siguranță	1,569	0,883	1,508	0,901	1,573	0,904	1,571	0,879	1,572	0,888
Valorile maxime ale factorului de siguranță	1,809	1,012	1,840	1,011	1,813	1,004	1,809	0,906	1,812	1,016
Metoda de modelare numerică	Metoda elementelor finite – SSR (cu reducerea parametrilor de forfecare)									
	F _{static}					F _{dinamic}				
NH măsurat în forajele	1,87					1,02				

Valorile factorului de siguranță rezultate prin metoda Bishop sunt cuprinse între 2,003 (figura 7.2.) și 1,691 pentru ipoteza statică și între 1,142 (figura 7.3.) și 0,948 pentru ipoteza pseudo-statică (seismică). Valorile factorului de siguranță rezultate prin metoda elementului

finit sunt de 1,87 pentru ipoteza statică (figurile 7.5 ÷ 7.6) și 1,02 pentru ipoteza pseudo-
 statică (figurile 7.8 ÷ 7.9).

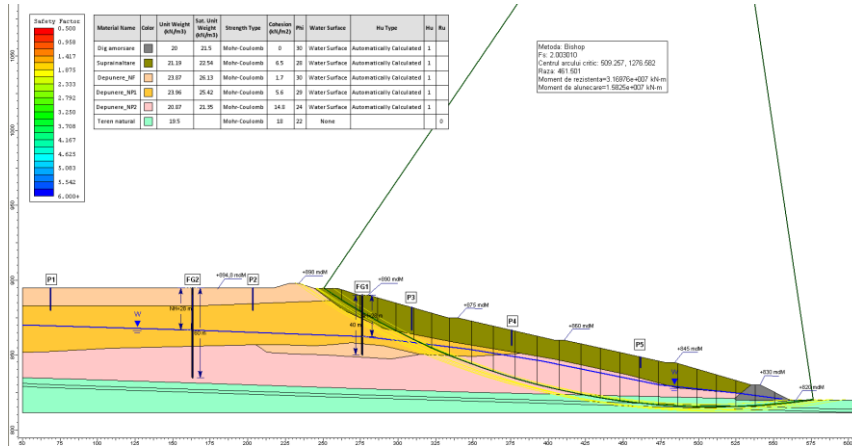


Figura 7.2. Analiza statică a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal, NH măsurat în forajele geotehnice FG1 și FG2. Factor de siguranță determinat prin metoda Bishop $F_s = 2,003$

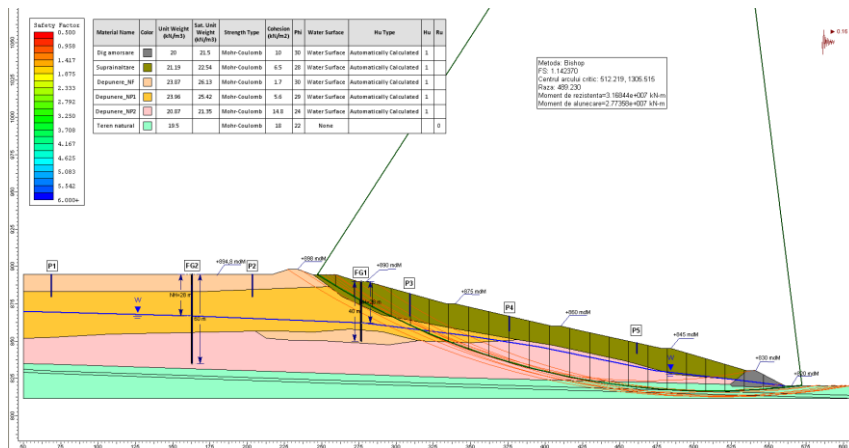


Figura 7.3. Analiza pseudo-statică a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal, NH măsurat în forajele geotehnice FG1 și FG2. Factor de siguranță determinat prin metoda Bishop $F_s = 1,142$ ($K_s=0,15$)

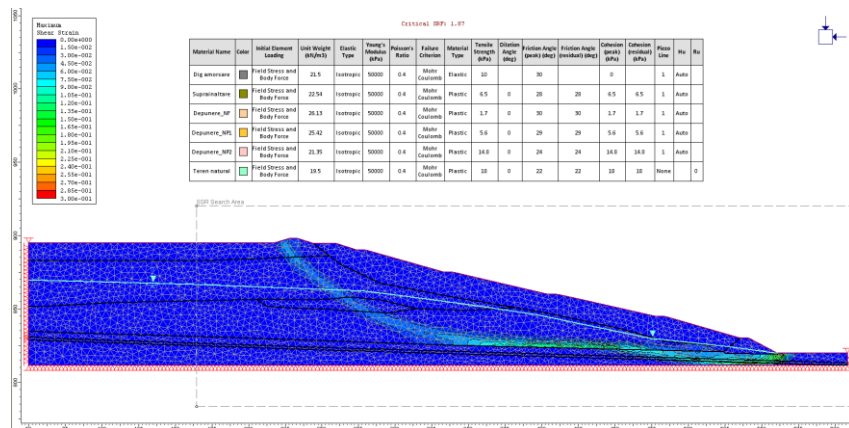


Figura 7.5. Analiza statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deformațiilor la forfecare, $F_s=1,87$

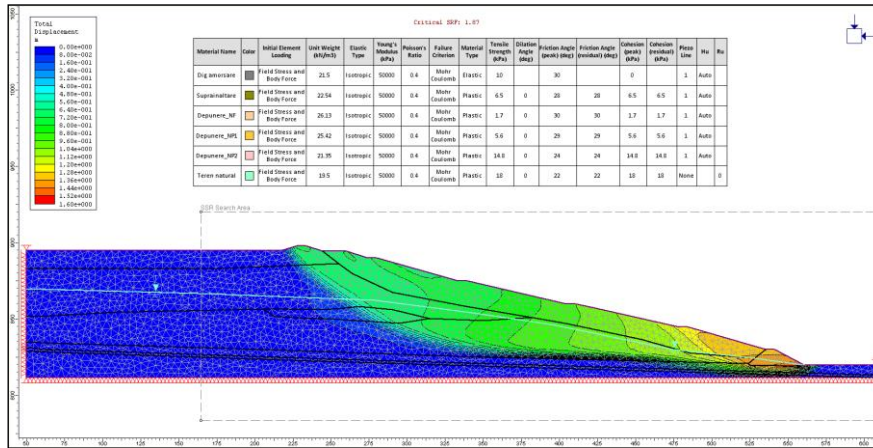


Figura 7.6. Analiza statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deplasărilor totale, $F_s=1,87$

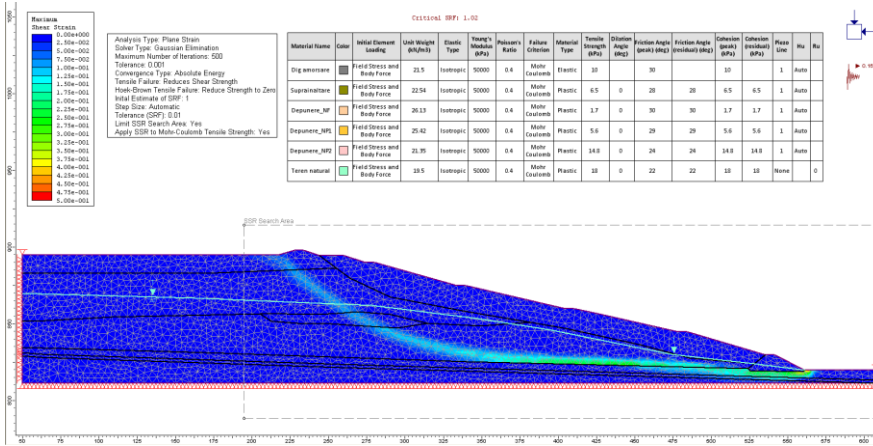


Figura 7.8. Analiza pseudo-statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deformațiilor la forfecare, $F_s=1,02$ ($K_s = 0,15$)

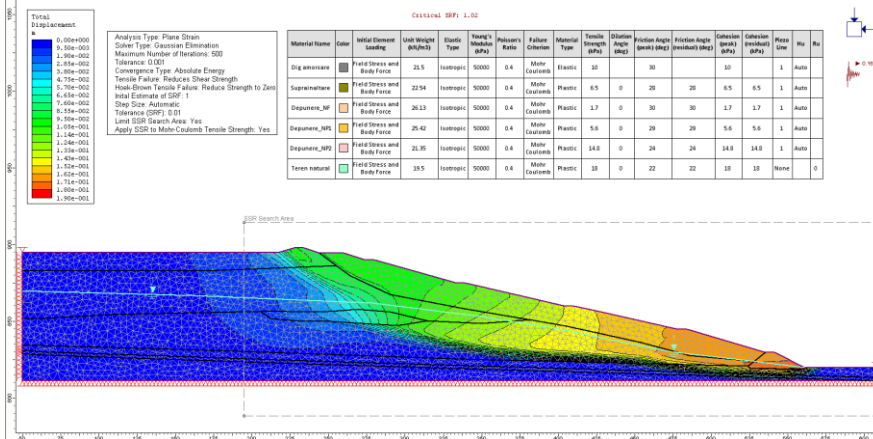


Figura 7.9. Analiza statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deplasărilor totale, $F_s=1,02$ ($K_s = 0,15$)

7.2. Evaluarea stabilității prin metode probabilistice

7.2.1. Metoda Monte Carlo utilizată la stabilirea nivelelor de atenționare și de alarmare

Calculul de stabilitate, precum și măsurătorile nivelului hidrostatic care au stat la baza lui, s-au realizat într-o perioadă secetoasă a anului (luna august) și în condiții de funcționare la parametri maximi ai lucrărilor de drenare existente.

Pentru o bună evaluare a stabilității, factorul de siguranță trebuie calculat și în eventualitatea în care nivelul hidrostatic atinge alt nivel (precipitații puternice, defecțiuni ale sistemului de drenaj etc).

Așadar, au fost considerate 3 nivele de referință pentru curba de depresiune:

- primul: nivelul minim reprezentat de adâncimea tălpii fiecărui piezometru (NH_{min}),
- al doilea: nivelul maxim, cu adâncimea cu 5 metri mai puțin față de nivelul inferior al piezometrelor (NH_{max}),
- al treilea: nivelul mediu aflat între cele două nivele extreme (generat de programul de calcul) (NH_{med}).

Pentru valoarea medie a nivelului hidrostatic (0,5) am considerat o abatere standard de 0,15, pentru a permite generarea de eșantioane de valori normal distribuite între valorile minime și maxime al nivelului hidrostatic.

Modelarea a fost efectuată în scopul de a verifica fezabilitatea sistemului de monitorizare în funcțiune. De asemenea, cele două ipoteze luate în considerare au fost: cea statică și cea pseudo-statică, cu amplitudinea seismică specifică perimetrului studiat de $K_s = 0,15$ g. În acest caz, variabila aleatoare va fi nivelul hidrostatic, cu valori maxime și minime din seriile de timp ale fiecărui piezometru.

Primul pas al modelării constă într-o analiză de sensibilitate, intervalul dintre valoarea minimă și maximă a nivelului hidrostatic fiind eșantionat în 50 de valori. Pentru fiecare dintre valori s-a calculat factorul de siguranță corespunzător prin metodele echilibrului limită (metode analitice).

Al doilea pas al modelării constă în repetarea de 5000 de ori a acestei analize de sensibilitate prin eșantionare, determinându-se distribuția probabilistică a factorilor de siguranță în funcție de elevația nivelului hidrostatic.

Aceasta procedură reprezintă metoda de eșantionare Monte Carlo.

După rularea programului și reprezentarea grafică a suprafețelor critice de alunecare (figurile 7.11. și 7.14.) se folosesc două grafice pentru a pune în evidență distribuția valorii factorilor de siguranță și a nivelelor hidrostatice normalizate, și anume graficul de variație al factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat, pentru ambele ipoteze (figurile 7.12. și 7.15.) și graficul de distribuție statistică a factorilor de siguranță determinați prin metoda Bishop în funcție de oscilația nivelului hidrostatic, pentru ambele ipoteze.

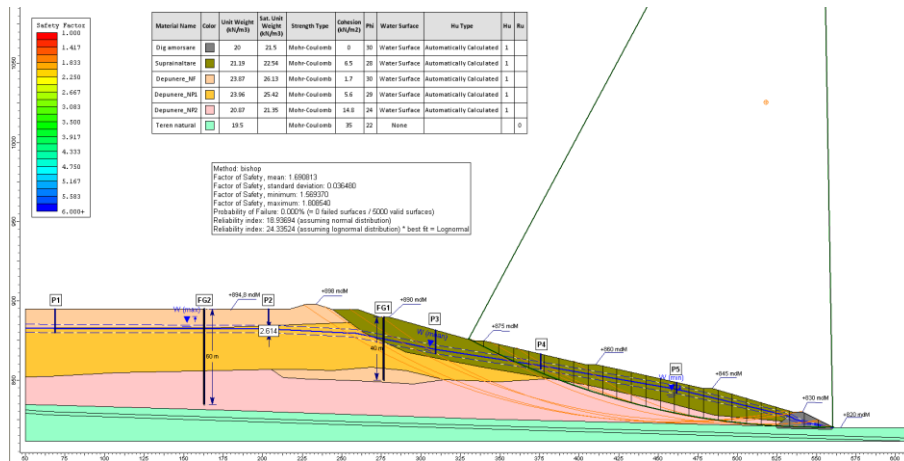


Figura 7.11. Analiza **statică** a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Metoda statistică de determinare a factorului de siguranță ținând cont de oscilația minimă-maximă a nivelului hidrostatic în piezometrele P1, P2, P3, P4, P5. Factor de siguranță mediu cu probabilitate maximă evaluat prin metoda Bishop $F_s = 1,691$

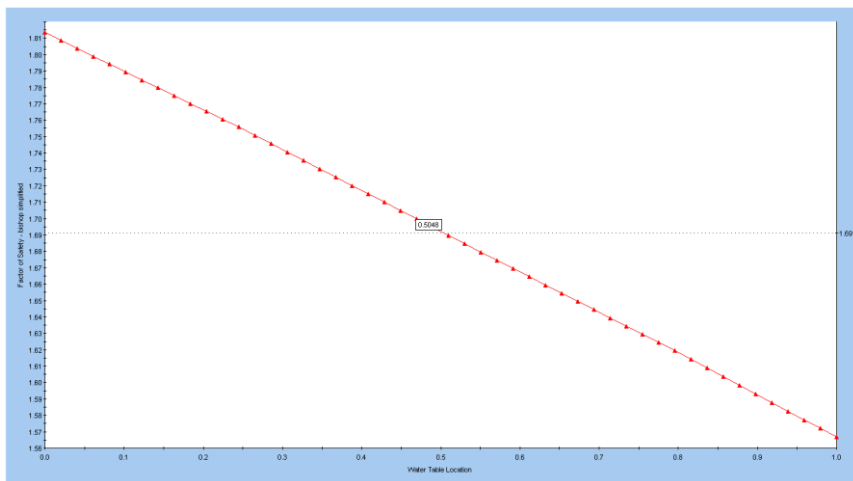


Figura 7.12. Variația factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat

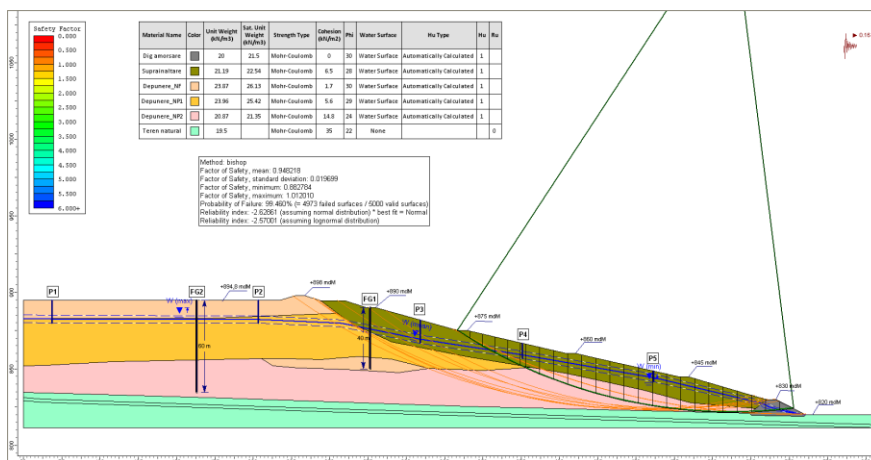


Figura 7.14. Analiza **pseudo-statică** a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Metoda statistică de determinare a factorului de siguranță ținând cont de oscilația minimă-maximă a nivelului hidrostatic în piezometrele P1, P2, P3, P4, P5.

Factor de siguranță mediu cu probabilitate maximă evaluat prin metoda Bishop $F_s = 0,948$

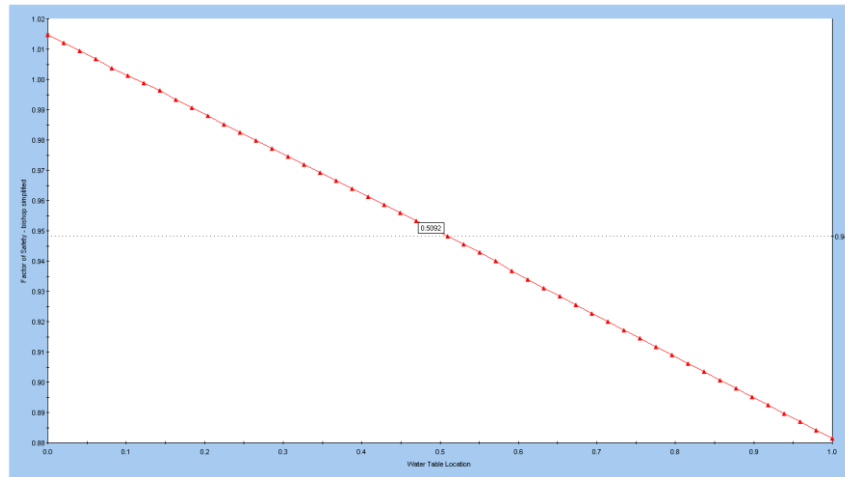


Figura 7.15. Variația factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat

În urma evaluării statistice a factorilor de siguranță, se poate observa că pentru un nivel maxim măsurat în piezometre de 5 metri, din punct de vedere static, stabilitatea este corespunzătoare (factorul de siguranță este supraunitar), însă în ipoteza pseudo-statică factorul de siguranță are o valoare subunitară, ceea ce reprezintă posibilitatea apariției fenomenelor de alunecări de teren, în cazul unui eveniment seismic major, conform reglementărilor în vigoare (Standard SR EN 1997-1:2004).

Echilibrul este satisfăcut pentru ambele ipoteze atunci când NH este mai mic de 0,510 m (măsurat de la talpa forajului).

Impunerea unor paliere de atenționare - alarmare implică necesitatea existenței unei rețele de piezometre performante, care să aibă adâncimile corespunzătoare detectării oricărei valori a nivelului hidrostatic (minim, mediu, maxim).

Metoda de eșantionare Monte Carlo aplicată anterior a scos în evidență faptul că actuala rețea de piezometre nu poate intercepta nivelul de alarmare, stabilit pentru un factor de siguranță pseudo-static.

Astfel, se realizează o nouă simulare statistică pentru un nivel hidrostatic ce oscilează de această dată pe un ecart de 15 metri între valoarea minimă și maximă. Simularea a fost realizată în ipoteza pseudo-statică pe 5000 de eșantioane pentru rețeaua de piezometre actuală.

Din graficul de variație al factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat, au fost impuse valorile de referință atât pentru nivelul de atenționare ($1 < F_s < 1.1$), cât și pentru nivelul de alarmare ($F_s \leq 1,0$) (fig. 7.18 ÷ 7.19).

Valorile de referință au fost calculate pentru fiecare piezometrul și în cele din urmă a rezultat faptul că acestea trebuie prelungite până la o adâncime care permite interceptarea nivelului hidrostatic (tabel 7.4.) (INCDMRR 2011).

Tabel 7.4 Valorile de referință calculate pentru fiecare piezometru

Piezometru	Lungimea actuală (m)	Lungimea necesară (m)	Valoarea NH pt. nivelul de atenționare (m)	Valoarea NH pt. nivelul de alarmă (m)
P1	15	22	1,90	8,22
P2	15	24	1,87	8,91
P3	15	21	1,93	7,33
P4	10	18	2,32	7,73
P5	7	15	2,11	7,20

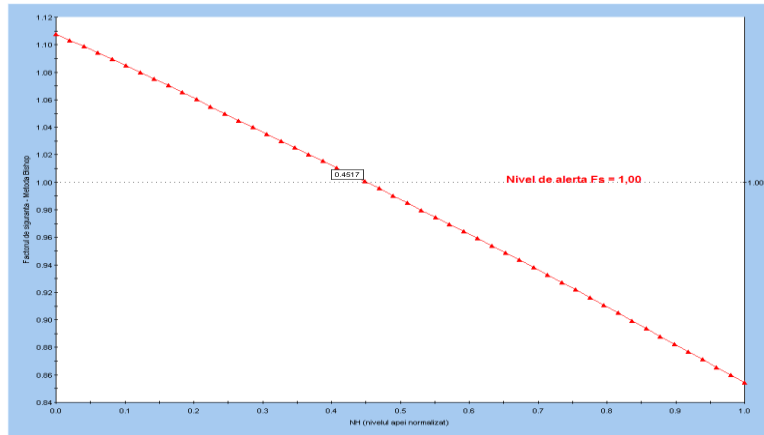


Figura 7.18. Graficul de variație al factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat în ipoteza extinderii nivelului hidrostatic minim și maxim față de extinderea adâncimii piezometrelor de monitorizare - ipoteză pseudo-statică.

Nivel de alertă $F_s = 1,00$

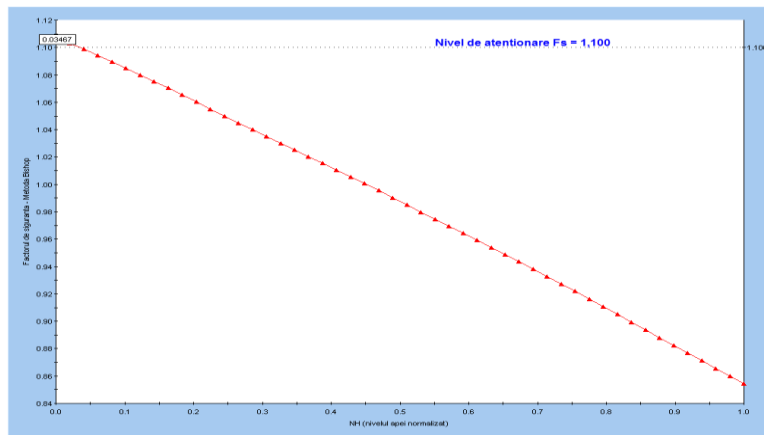


Figura 7.19. Graficul de variație al factorului de siguranță mediu determinat statistic față de nivelul hidrostatic normalizat în ipoteza extinderii nivelului hidrostatic minim și maxim față de extinderea adâncimii piezometrelor de monitorizare - ipoteză pseudo-statică.

Nivel de atenționare $F_s = 1,10$

7.2.2. Metoda estimării punctuale PEM utilizată pentru evaluarea riscului la lichefiere

Lichefierea este un fenomen de pierdere a capacității portante a unui pământ necoeziv saturat, sub acțiunea unor solicitări monoton crescătoare sau ciclice ca urmare a creșterii presiunii apei din pori. Parametrii principali care intervin la apariția fenomenului de lichefiere sunt: granulometria materialului, densitatea relativă, starea inițială de efort.

Metoda numerică a elementului finit cu reducerea parametrilor de forfecare (SSR), presupune că roca constituentă a iazului este un material elasto-plastic, căruia rezistență la forfecare este treptat redusă până la nivelul la care se produce alunecarea.

Calculul a luat în considerare modelul constitutiv și criteriul de rupere Mohr-Coulomb (Mihai et. al., 2008).

Analizele se bazează pe teste de laborator privind numărul de cicluri în care se produce lichefierea și/sau pe teste standard de penetrare în teren.

Amplasamentul iazului Tărnicioara este localizat într-o zonă cu o valoare de vârf a accelerației seismice orizontale a terenului $K_s = 0,15$, corespunzătoare unui interval mediu de recurență de 225 de ani. Există posibilitatea ca un cutremur cu această accelerație seismică să

permită depunerilor de deșeuri miniere din iazul de decantare, având structura unor nisipuri fin-medii prăfoase aflate sub nivelul piezometric, să se lichefieze.

La evaluarea riscului la lichefiere a materialului din corpul iazului a fost utilizată metoda statistică de estimare punctuală (PEM), datorită incertitudinii privind determinarea gradului de reducere al parametrilor de forfecare sub influența încărcării seismice.

Metoda PEM a fost aplicată evaluării de stabilitate prin metoda elementelor finite (rulată cu softul de analiză numerică Rocscience Phase 2).

Pe secțiunea de calcul, domeniul lichefiabil este nisipul prăfos NP1 (tabel 7.1.) aflat sub nivelul piezometric. Datorită naturii sale coezive, formațiunea naturală (roca de bază) din ampriza depozitului de tip marno-argilos nu este susceptibilă la fenomenul de lichefiere.

În prima fază se evaluează stabilitatea iazului în ipoteza pseudo-statică, considerând accelerația seismică la valoarea maximă ($K_s = 0,15$) și creșterea presiunii în pori în stratul lichefiabil NP1 - Depunere nisip prăfos 1 (figurile 7.23 ÷ 7.24).

În cea de-a doua fază modelarea stabilității se realizează prin evaluarea post-seismică în ipoteză statică și reducerea rezistenței la forfecare și implicit a parametrilor acesteia: coeziunea și unghiul de frecare la 25 % din valorile inițiale, cu o abatere a valorilor de $\pm 5 \%$ pe o distribuție normală (figurile 7.25 ÷ 7.26).

Cuplarea metodei stocastice de estimare punctuală PEM cu metoda numerică a elementelor finite, oferă posibilitatea de a prezice deplasările datorate lichefierii declanșate în cazul unui eveniment seismic.

Astfel, se observă că lichefierea apare în corpul iazului în stratul cu denumirea NP1 - Depunere nisip prăfos 1, atunci când presiunea apei din pori devine egală cu componenta totală a eforturilor, iar efortul efectiv va fi zero.

Așadar, rezultatele evaluării post-seismice prin metoda estimării punctuale raportată modelului cu elemente finite au relevat un grad ridicat de risc datorită lichefiabilității în stratul NP1 - Depunere nisip prăfos 1.

Din figura 7.27. se poate observa că extinderea zonei susceptibile la lichefiere este de aproximativ 53 m în spatele barajului și deformarea maximă a acesteia are o valoare de aproximativ -57 cm și este poziționată în apropierea coronamentului barajului principal.

Din cauza scăderii efortului efectiv spre suprafață, lichefierea apare la adâncimi mici în zona taluzului, în timp ce creșterea efortului efectiv cu adâncimea, atrage după sine reducerea susceptibilității la lichefiere (Banu et. al., 2015, Banu et. al., 2016).

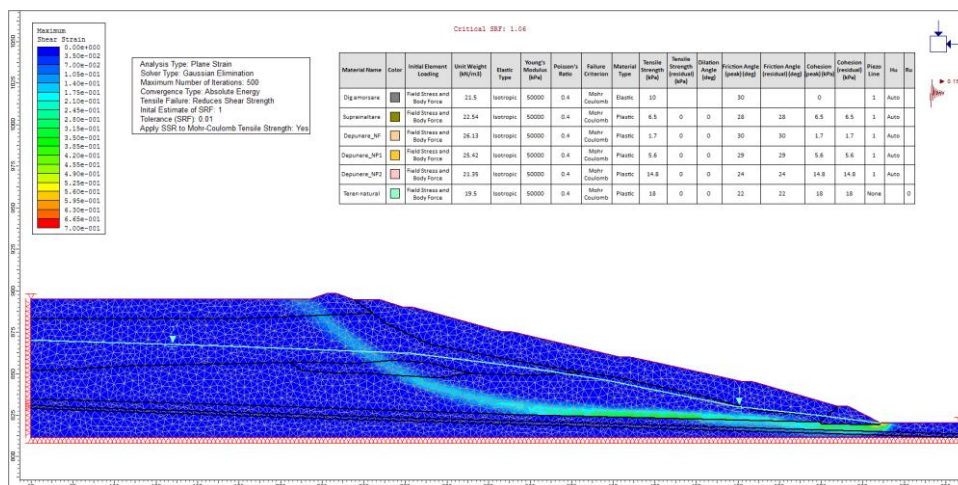


Figura 7.23. Analiza pseudo-statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deformațiilor la forfecare. $F_s=1,06$ ($K_s = 0,15$)

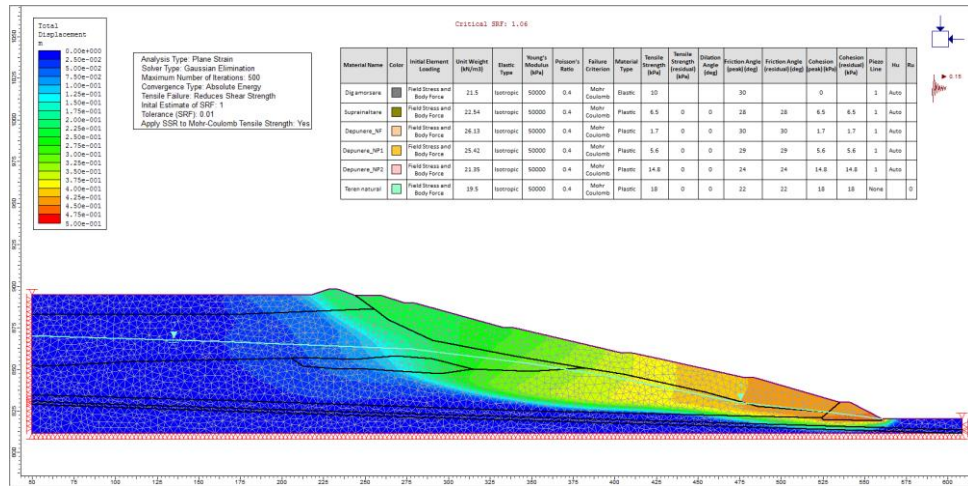


Figura 7.24. Analiza pseudo-statică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deplasărilor totale, $F_s=1,06$ ($K_s = 0,15$)

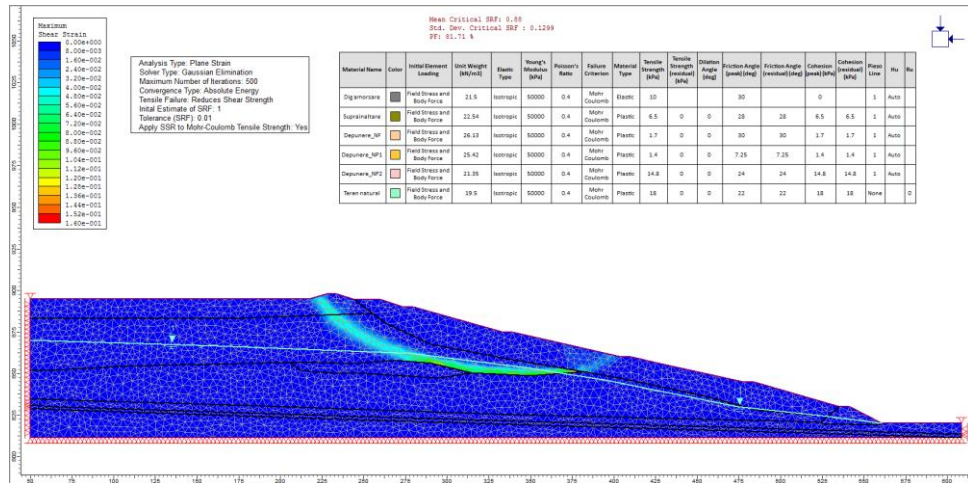


Figura 7.25. Evaluarea post-seismică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deformațiilor la forfecare. $F_s=0,88$ ($K_s = 0,15$)

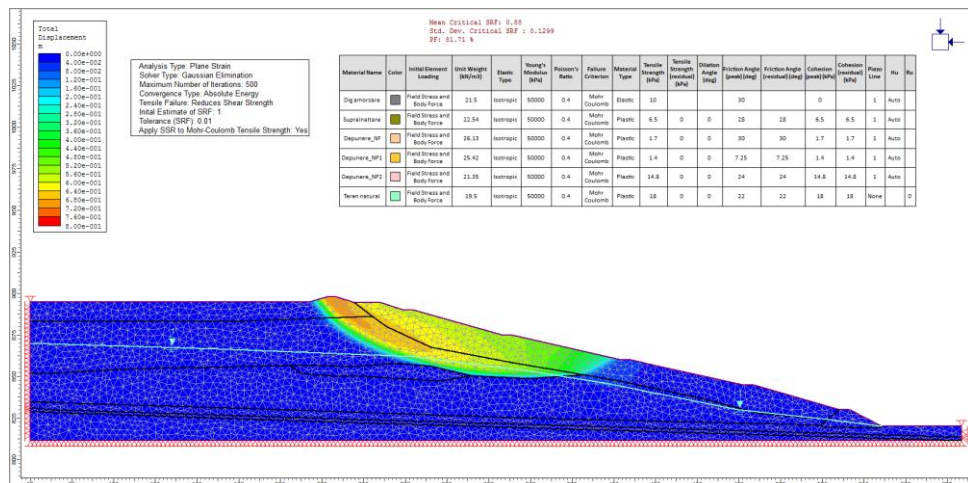


Figura 7.26. Evaluarea post-seismică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Distribuția deplasărilor totale. $F_s=0,88$ ($K_s = 0,15$)

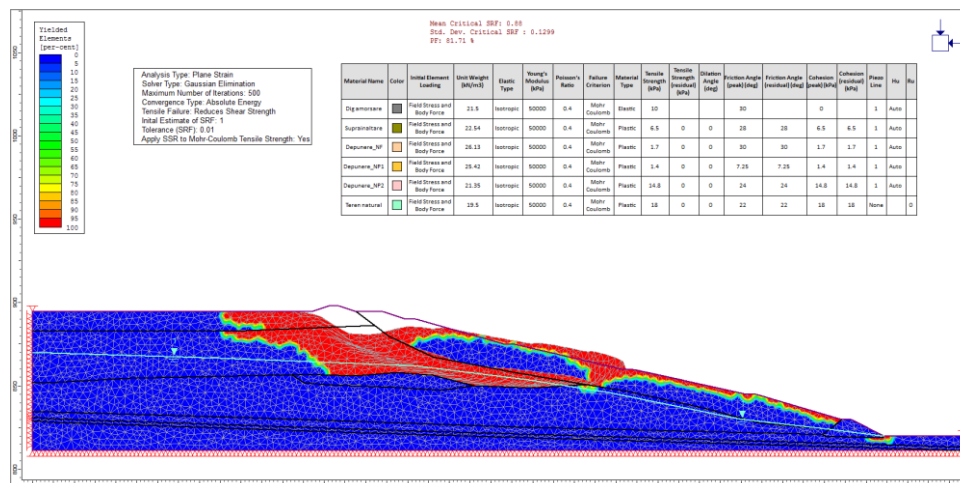


Figura 7.27. Evaluarea post-seismică cu ajutorul metodei elementului finit a stabilității iazului de decantare Tărnicioara – barajul principal. Profil deformat cu distribuția elementelor cu fluaj. $F_s=0,88$ ($K_s = 0,15$)

7.3. Modelarea numerică și realizarea unor paliere de atenționare – alarmare în predicția fenomenelor de risc la alunecare utilizând date InSAR de deformare

Pentru a prognoza deformațiile suprafeței barajului principal în perioada 23.07 - 27.09.2011 (perioada în care au fost executate măsurători de teledetecție InSAR pe întreaga arie a iazului Tărnicioara) a fost realizată o modelare numerică prin metoda elementului finit în două etape.

În prima etapă s-a considerat un nivel hidrostatic mediu estimat în luna iulie 2011 din datele obținute pe rețeaua de piezometre aliniate pe axa mediană a barajului (P1, P2, P3, P4 și P5) (figura 7.1.).

În a doua etapă a fost considerat un nivel hidrostatic mediu la nivelul lunii septembrie, luând în considerație deficitul de precipitații existent la acea dată conform datelor statistice.

În acest caz, rețeaua de piezometre nu a putut face înregistrări, datorită faptului că lungimile reduse ale piezometrelor nu au permis interceptarea nivelului hidrostatic scăzut.

Modelarea s-a realizat cu ajutorul softului specializat Rocscience Phase 2 și s-au determinat pentru fiecare etapă deplasările verticale care se produc la suprafața depozitului și barajului în 60 de puncte egal distanțate. Distribuția deplasărilor verticale este reprezentată grafic în figurile 7.30. și 7.31. și numeric.

Deformațiile verticale realizate sunt date de diferența dintre deplasările măsurate în etapa 23.07.2011 și 27.09.2011 și au valori negative cuprinse între 0 și -36 mm.

De asemenea, au fost determinate și deplasările orizontale în modelul numeric reprezentate grafic în figurile 7.32. și 7.33. și numeric, pentru a le compara cu datele celor 2 înclinometre existente pe barajul principal. Direcția și mărimea vectorilor deplasărilor orizontale în corpul barajului principal pentru nivelul hidrostatic de la data de 27.09.2011 sunt spre piciorul taluzului aval.

Pentru calibrarea modelului numeric au fost alese două puncte, unul pe coronamentul barajului și altul pe berma 4 a taluzului aval (figura 7.35.).

Deplasările cele mai mari se realizează în zona coronamentului și berma imediat următoare, urmând ca ele să se diminueze spre piciorul taluzului în zona digului de amorsare. În figura 7.36. este prezentată grafic variația deplasărilor verticale și poziția celor 4 reperi de monitorizare.

Pe baza rezultatelor evaluărilor anterioare s-a considerat că este posibilă și fezabilă o modelare a fenomenelor generatoare de risc la alunecare integrând datele obținute prin tehnica InSAR cu rezultatele analizelor de stabilitate tip SSR.

Pornind de la acest fapt am considerat existența a 4 puncte fixe de monitorizare InSAR dotate cu reflectoare fixe (pentru a asigura o precizie și la nivelul rezoluției la suprafață) poziționate în proximitatea gulerului piezometrelor P2, P3, P4 și P5.

Modelarea numerică s-a făcut luând în considerație nivelul hidrostatic mediu realizat în luna iulie 2011 și s-au considerat două ipoteze, cea statică și cea pseudo-statică cu solicitare seismică la vârful accelerației terenului ($K_s=0,15$).

În ipoteza statică, analiza de stabilitate prin metoda elementului finit a determinat un factor de siguranță $F_s=1,57$, iar în ipoteza pseudo-statică $F_s=1,2$.

Considerându-se ca limite ale factorului de stabilitate valorile de 1,6 în ipoteza statică și 1,2 în ipoteza pseudo-statică, se pot considera ca valori-prag de monitorizare cu nivel de atenționare valorile deplasărilor verticale realizate în cele 4 locații fixe la nivel static și ca valori-prag de monitorizare cu nivel de alarmare valorile deplasărilor verticale realizate în situația pseudo-statică.

Trebuie ținut cont că aceste praguri de atenționare - alarmare corespund unui anumit nivel piezometric și unei anumite intensități seismice, care nu este neapărat egală cu valoarea maximă zonală.

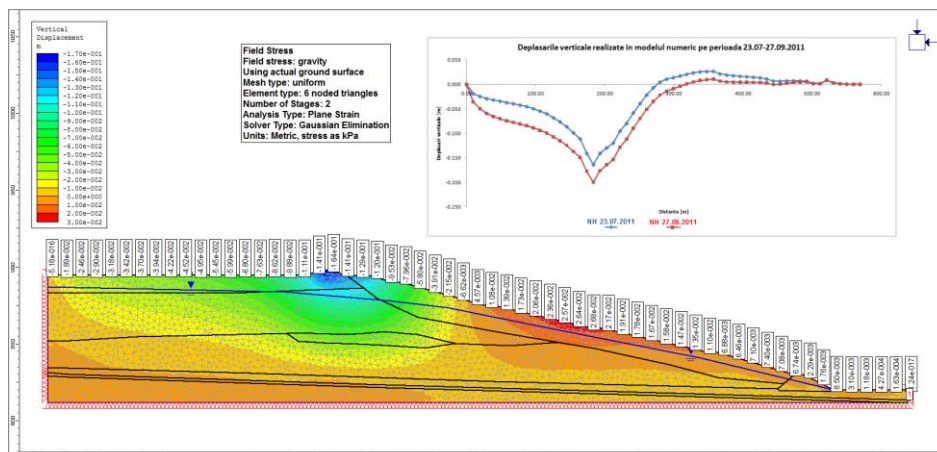


Figura 7.30. Deplasarea verticală a suprafeței depozitului pentru nivelul hidrostatic (23.07.2011)

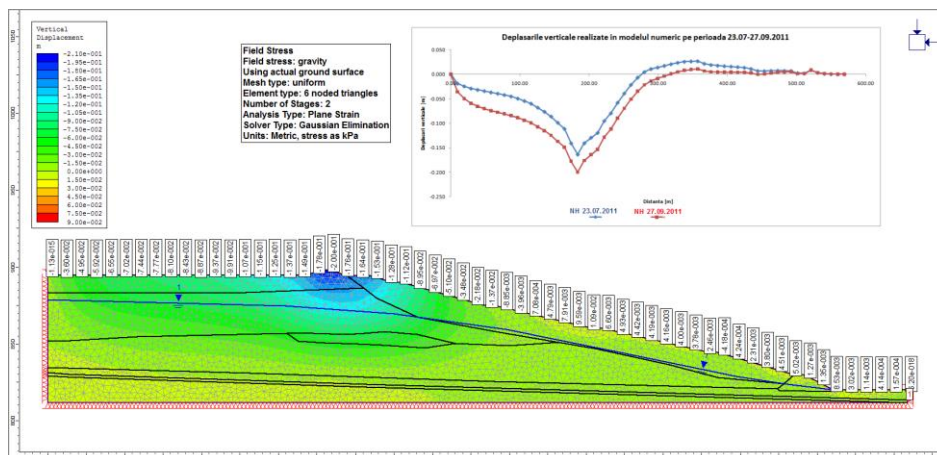


Figura 7.31. Deplasarea verticală a suprafeței depozitului pentru nivelul hidrostatic (27.09.2011)

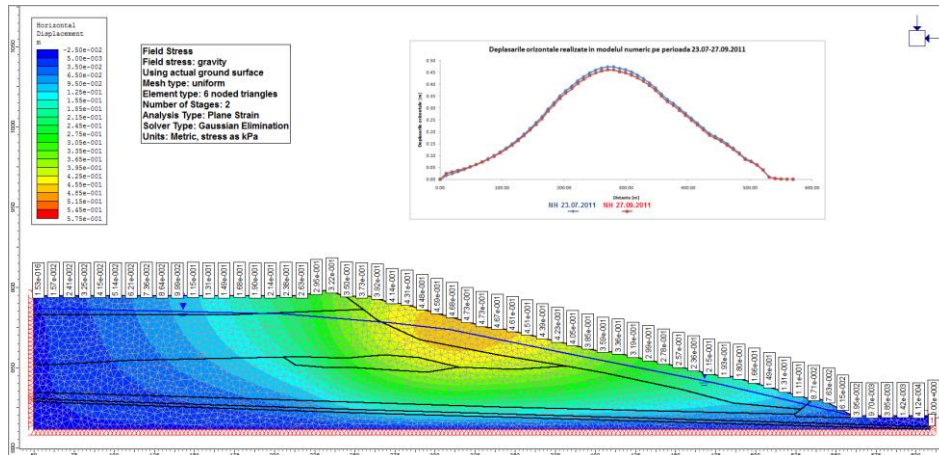


Figura 7.32. Deplasarea orizontală a suprafeței depozitului pentru nivelul hidrostatic (23.07.2011)

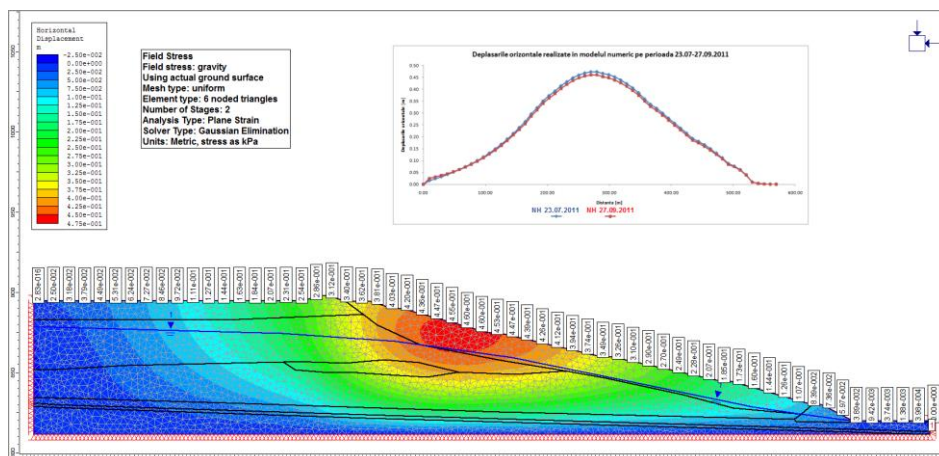


Figura 7.33. Deplasarea orizontală a suprafeței depozitului pentru nivelul hidrostatic (27.09.2011)

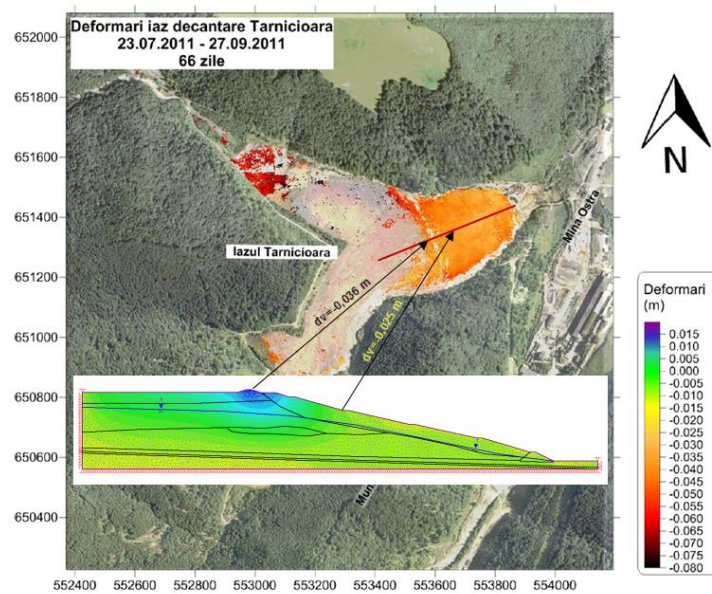


Figura 7.35. Punctele de calibrare ale modelului numeric

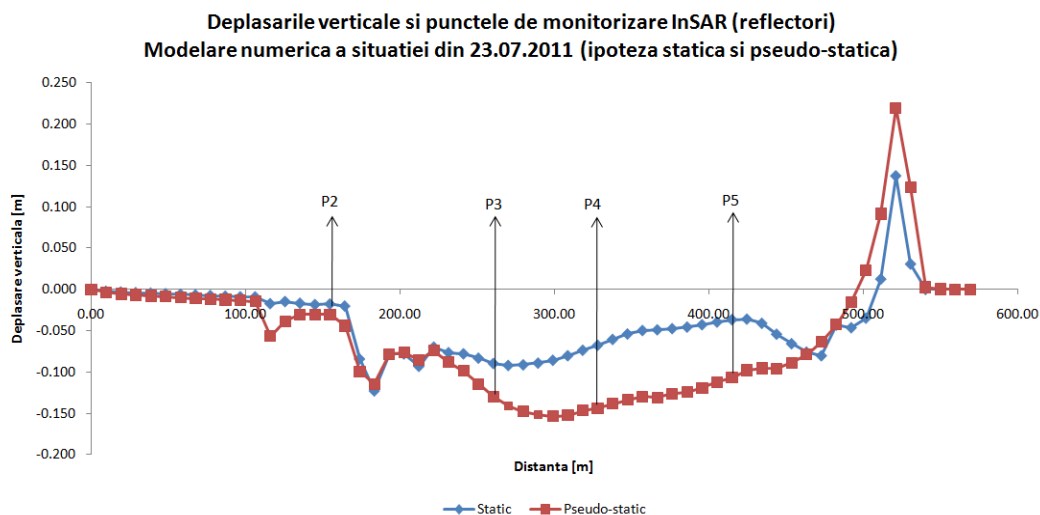


Figura 7.36. Distribuția și mărimea deplasărilor determinate prin modelare numerică comparate cu datele obținute prin teledetecție InSAR

Pentru a fi utilizabil în predicție, acest tip de modelare trebuie să țină cont de mai mulți factori:

- oscilația nivelului piezometric și valoarea deplasării determinate prin InSAR la date temporale apropiate;
- înregistrarea locală a fenomenelor seismice;
- eventuale modificări ale structurii interne a corpului barajului (fenomene de eroziune internă) și upgradarea modelului după investigații geofizice executate la intervale de timp prestabilite;
- verificarea periodică a poziției reflectorilor fiși.

7.4. Rezultatele obținute în urma modelării fenomenelor generatoare de instabilitate în corpul iazului de decantare Târnicioara

Scopul acestei lucrări a fost acela de a evalua gradul de stabilitate existent și de a monitoriza și gestiona eventualele pierderi de stabilitate ce pot apărea în corpul iazului de decantare ales ca studiu de caz, utilizând atât metode deterministe, cât și metode probabilistice, în scopul întocmirii unui sistem integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc.

O primă evaluare a stabilității digului și treptelor de supraînălțare a barajului principal fost realizată abordând metodele **deterministe**. Aplicarea metodelor analitice și numerice a fost efectuată pe o secțiune caracteristică de calcul perpendiculară pe treptele paramentului aval.

Valorile factorului de siguranță rezultate prin metoda analitică Bishop sunt cuprinse între 2,003 și 1,691 pentru ipoteza statică și între 1,142 și 0,948 pentru ipoteza pseudo-statică.

Valorile factorului de siguranță rezultate prin metoda numerică a elementului finit cu reducerea parametrilor de forfecare sunt de 1,87 pentru ipoteza statică și 1,02 pentru ipoteza pseudo-statică.

În ceea ce privește ipoteza pseudo-statică, abordarea analitică a evidențiat faptul că, dacă pentru ipoteza statică factorul de siguranță variază între 2,003 și 1,993, stabilitatea iazului fiind în afara oricărui pericol (respectând regulamentele în vigoare), la o solicitare seismică, factorul de siguranță are valori mult reduse, variind între 1,142 și 1,136, evidențiind

faptul că în cazul unui eveniment seismic la magnitudinea zonei, depozitul este la limita de stabilitate (la limita de cedare / alunecare).

Cea de-a doua abordare a fost realizată utilizând metodele **probabilistice**. Modelarea prin metoda de eşantionare Monte Carlo a fost efectuată în scopul verificării sistemului de monitorizare în funcţiune, dar şi de stabilire a unor intervale de atenţionare - alarmare cu ajutorul acestui sistem existent de piezometre ce monitorizează constant nivelul hidrostatic din corpul iazului. Aşadar, această metodă probabilistică foloseşte nivelul hidrostatic şi implicit presiunea apei din pori ca variabilă aleatoare.

Metoda Monte Carlo a fost integrată metodei echilibrului limită, secţiunea de calcul şi cele două ipoteze de calcul rămânând aceleaşi. Ea a evidenţiat faptul că, pentru un nivel hidrostatic maxim ales de 5 m, factorul de siguranţă este supraunitar în ipoteza statică, însă are o valoare subunitară în ipoteza pseudo-statică, ceea ce reprezintă posibilitatea apariţiei fenomenelor de alunecări de teren, în cazul unui eveniment seismic.

Concluziile ce au putut fi trase în urma modelării probabilistice Monte Carlo sunt următoarele: echilibrul este satisfăcut pentru ambele ipoteze atunci când nivelul hidrostatic este mai mic de 0,510 m (măsurat de la talpa forajului), iar la momentul actual, nivelele de atenţionare - alarmare nu sunt fezabile, deoarece piezometrele reţelei de monitorizare existentă au adâncimi improprii, care nu permit interceptarea nivelului hidrostatic.

Modelarea prin metoda estimării punctuale a fost efectuată în scopul obţinerii de rezultate în ipoteză post-seismică, de predictibilitate a posibilităţii de lichefiere a materialului steril în cazul unei încărcări seismice.

Metoda estimării punctuale a fost integrată modelării numerice a elementului finit cu reducerea parametrilor la forfecare, secţiunea de calcul rămânând aceeaşi, ipotezele alese fiind: pseudo-statică şi post pseudo-statică (post seismică).

Rezultatele evaluării post-seismice au relevat un grad ridicat de risc din cauza lichefierii stratului NP1 - Depunere nisip prăfos 1, în momentul în care presiunea apei din pori devine egală cu componenta totală a eforturilor, iar efortul efectiv devine zero.

Aşadar, această modelare probabilistică a estimării punctuale ne dă posibilitatea de a prezice locaţia şi suprafaţa zonei din corpul barajului susceptibile la lichefiere, distribuţia deformaţiilor la forfecare şi distribuţia deplasărilor totale a acestora în caz de seism major.

Cea de-a treia abordare s-a realizat prin utilizarea şi **integrarea datelor obţinute din interferometria INSAR modelării numerice** a elementului finit, în scopul prognozării deformaţiilor orizontale şi verticale ale suprafeţei barajului principal pe o perioadă finită de monitorizare şi de stabilire a unor paliere de atenţionare – alarmare utilizate la predicţia fenomenelor de alunecare.

Metoda numerică a elementului finit cu reducerea parametrilor la forfecare utilizează datele obţinute prin tehnica InSAR (4 puncte fixe de monitorizare InSAR dotate cu reflectoare fixe), secţiunea de calcul rămânând aceeaşi, iar ipotezele alese fiind: statică şi pseudo-statică. Rezultatele evaluării numerice, au stabilit valori ale factorilor de siguranţă de 1,6 în ipoteza statică şi 1.2 în ipoteza pseudo-statică, valori obţinute pentru un nivel hidrostatic şi o încărcare seismică arbitrar alese.

Aşadar, pentru stabilirea unui nivel de atenţionare se poate considera ca nivel de atenţionare valoarea deplasărilor verticale în ipoteza statică, iar ca nivel de alarmare valoarea deplasărilor verticale în ipoteza pseudo-statică (în cele patru puncte fixe de monitorizare alese în dreptul gulerelor piezometrelor P2, P3, P4 şi P5).

Modelarea deterministă, utilizată de peste jumătate de secol la calculele de stabilitate ale barajelor iazurilor de decantare din industria minieră au rezultate fiabile, însă fără a ţine cont de incertitudinea, anizotropia şi variabilitatea proprietăţilor rocilor.

Abordarea probabilistică a apărut în mod firesc ca răspuns la necesitatea unei mai profunde înţelegeri a problemelor de stabilitate structurală, de cunoaştere a comportamentului

parametrilor fizico-mecanici din corpul unui iaz de decantare. Toată această cuantificare a riscurilor are drept scop elaborarea unor decizii de monitorizare adecvate și a unor măsuri de stabilizare fiabile.

Ca și concluzie, rezultatele obținute prin modelare probabilistică vin în întâmpinarea rezultatelor metodelor deterministe cu un plus de cunoaștere și informații, permițând integrarea lor în cadrul unui sistem integrat de modelare a fenomenelor de risc ce pot afecta iazurile de decantare din industria minieră.

7.5. Schema sistemului integrat de modelare a fenomenelor generatoare de risc – pentru a consulta acest subcapitol, vă rugăm să consultați varianta in extenso

8. Concluzii

Prezenta lucrare, prin tema abordată, propune o metodologie modernă de evaluare și modelare a fenomenelor generatoare de risc ce pot periclita stabilitatea pe termen scurt și lung a iazurilor de decantare din industria minieră și în special a elementelor de retenție (diguri și baraje), care să înglobeze date obținute în urma aplicării metodelor deterministe, însă și informații suplimentare rezultate în urma abordării probabilistice.

Pe plan național există o propunere asemănătoare sistemului integrat de modelare din prezenta lucrare, și anume posibilitatea creării unui **Sistem Național Integrat de Monitorizare a Impacturilor de Mediu (SNIMIM)** pentru siturile afectate de activitățile miniere, ca instrument eficient de prevenire, planificare și răspuns în situațiile de urgență și a infrastructurii de racordare al acestuia la un **Sistem European de Reacție pentru Situațiile de Urgență (SCERSU)**. Așadar, metodologia propusă în cadrul prezentei lucrări, poate fi preluată și implementată în infrastructura unui sistem național de monitorizare a iazurilor din industria minieră.

Pentru punerea în practică a acestei metodologii, este necesar un grad ridicat de cunoaștere a parametrilor fizico-mecanici ai materialului din corpul iazului, prin urmare, la alegerea studiului de caz, am ținut cont de acest aspect foarte important și am decis ca aplicarea sistemului integrat de modelare să se realizeze pe iazul de decantare Tărnicioara din județul Suceava, iaz la care lucrările de închidere au fost finalizate, care dispune de o rețea de monitorizare parametrică în funcțiune (face parte din programul pilot aflat în derulare în zona Vatra Dornei alături de alte 6 iazuri) și care dispune de datele satelitare pe întreaga sa suprafață, date obținute prin tehnica de interferometrie InSAR (a făcut parte din programul pilot de monitorizare a iazurilor de decantare din județul Suceava în cadrul Programului Național Phare 2006 alături de alte 3 iazuri).

În afară de volumul informațional obținut din rețeaua de monitorizare și de hărțile de deformare realizate din măsurătorile InSAR, pentru experimentarea și validarea metodologiei integrate de modelare a fenomenelor generatoare de risc au mai fost obținuți suplimentar parametri fizico-mecanici prin metode directe și indirecte. Aceste investigații au fost efectuate în anul 2011 de către Institutul Național de Metale și Resurse Radioactive (INCDMRR-București), în scopul realizării **Studiului hidrogeotehnic pentru analizarea stării generale actuale a iazului de decantare Tărnicioara**, având ca beneficiar compania SC Conversmin SA, ce deține și rețeaua de monitorizare amplasată pe iaz.

În cadrul prezentei lucrări, o primă abordare a fost cea deterministă, modelare ce a utilizat parametri fizico-mecanici obținuți prin analizarea în situ și în laborator a probelor prelevate din forajele geotehnice. Rezultatele au fost coroborate cu datele de electrometrie, iar

calculul de stabilitate a scos în evidență o stabilitate la limită a barajului principal în ipoteza pseudo-statică.

Cea de-a doua abordare a fost cea probabilistică, integrată întotdeauna metodelor deterministe, modelare ce a ținut cont de incertitudinea și anizotropia distribuției parametrilor geologici. Această abordare s-a realizat în două etape: prima (metoda de eșantionare Monte Carlo) a utilizat ca variabilă aleatorie nivelul hidrostatic în scopul stabilirii unor nivele de atenționare - alarmare și a doua (metoda estimării punctuale) a fost utilizată cu scopul predictibilității fenomenului de lichiefiere în corpul iazului în timpul și imediat după o activitate seismică majoră. Abordarea probabilistică a adus noi informații: lungimile piezometrelor existente în actuala rețea de monitorizate nu sunt suficiente pentru a putea stabili paliere de atenționare - alarmare a creșterii nivelului hidrostatic, iar în corpul barajului există o zonă susceptibilă la lichiefiere în cazul unei activități seismice.

În final, cea de-a treia abordare a integrat datele de teledeteție InSAR metodei numerice, în scopul predictibilității deformațiilor verticale și totale ale suprafeței plajei iazului, dar și a barajului principal pe anumite intervale temporale, precum și în cazul unei activități seismice și, de asemenea, de stabilire a unor paliere de atenționare și alarmare utilizate în predicția fenomenelor de alunecare.

Deși metodele analitice și numerice, surprind complet și corect gama de mecanisme de cedare probabile, rezultând un calcul al probabilității de cedare cuprinzător și factori de stabilitate ce oglindesc realitatea geo-mecanică, metodele probabilistice promovează o mai bună înțelegere a problemelor (deoarece iau în calcul incertitudinea, anizotropia și variabilitatea proprietăților rocilor), ducând la decizii de monitorizare și măsuri de stabilizare îmbunătățite față de metodele deterministe.

Principalele contribuții și elemente de noutate aduse prin intermediul acestei lucrări:

Aplicarea metodelor probabilistice / statistice / stocastice (metoda Monte Carlo, metoda estimării punctuale) la calculul stabilității, metode utilizate de câțiva ani cu succes peste granițele țării. Rezultatele obținute prin această nouă abordare confirmă rezultatele obținute prin metode deterministe, însă aduc și un plus de informații privind parametrii ce caracterizează fenomenele ce pot afecta stabilitatea unui iaz.

Propunerea unor soluții de monitorizare (ex. stabilirea unor nivele de atenționare - alarmare ale rețelei de piezometre și pentru predicția fenomenelor de alunecare) a unor parametri fizico-mecanici generatori de risc (ex. oscilația nivelului hidrostatic, deformații orizontale și verticale ale suprafeței iazului), pot avea ca rezultat diminuarea sau chiar eliminarea efectelor negative induse mediului sau comunității umane de către iazurile de decantare miniere.

Integrarea, în premieră a datelor de interferometrie InSAR la modelarea numerică, rezultatele fiind calibrate cu date din rețeaua de monitorizare existentă (înclinometre) pentru confirmarea preciziei acestora și cu scopul prognozării deformațiilor orizontale și verticale ale suprafeței barajului principal pe o perioadă finită de monitorizare și, și astfel de stabilire a unor paliere de atenționare – alarmare utilizate la predicția fenomenelor de alunecare.

Integrarea metodelor utilizate într-un **sistem modern și fiabil de identificare, modelare și monitorizare a fenomenelor de hazard**, sistem ce ar putea fi implementat într-un sistem național de management al riscului pentru iazurile de decantare din industria minieră.

Nu în ultimul rând, modelarea parametrilor fizico-mecanici ai materialului din corpul iazului și deci, caracterizarea stabilității unui iaz de decantare, pune la dispoziția proiectanților o **bază de proiectare foarte bună**, ce poate fi utilizată cu succes la execuția lucrărilor de punere în siguranță, închidere și reconstrucție ecologică a iazurilor de decantare din industria minieră și a zonelor afectate de acestea.

Bibliografie selectivă

- Banu, D., Mihai, S. 2015. *Integration of stochastic methods in the assessment of the risk generating phenomena. Study case - Tărnicioara tailings pond, Romania*. Ecoterra 12(4), pp. 45-58
- Banu, D., Mihai, S.O. 2016. *The probabilistic modeling of safety factor for mining tailings ponds*. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining Conference Proceedings Volume II, ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2016B12, pp. 921-928
- Bishop, A.W. 1955. *The Use of The Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Geotechniques, 5, pp. 7-17
- Bishop, A.W. 1966. *The strength of soils and engineering materials*. Géotechnique, 16(2), pp.89-130
- Brinkgreve, R.B.J. 2005. *Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application*. Soil Constitutive Models (doi: 10.1061/40771(169)4), pp. 69-98
- Chambers, D. M. 2011. *Long term risks of tailings dam failure*. Alaska Park Science - Volume 13 Issue 2: Mineral and Energy Development
- Cheng, Y.M., Lau, C.K. 2008. *Slope Stability Analysis and Stabilization-New methods and insight*, Published by Routledge 270 Madison Ave, New York, NY 10016, USA, ISBN 0-203-92795-8 Master e-book ISBN
- Duncan, J.M., Wright, S.G. 1980. *The accuracy of Equilibrium Methods of Slopes Stability Analysis*. Proceedings of the International Symposium on Landslides, New Delhi, Vol. I, pp. 247-254
- Fredlund, D.G., Krahn, J. 1977. *Comparison of Slope Stability Methods of Analysis*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 429-439
- Fredlund, D.G., Krahn J., Pufahl D.E. 1981. *The relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods*. Dept. Of. Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, pp. 11-17
- Greco, V.R. 1996. *Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface*. Journal of Geotechnical Engineering. Vol.122, No.7, July, pp. 517-525
- H.G. nr. 856/13.08. 2008. *Gestionarea deșeurilor din industriile extractive*
- Hammah, R.E., Yacoub, T.E. 2009. *Probabilistic Slope Analysis with the Finite Element Method*. Asheville 2009, the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium
- ICOLD. 2001. *Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learnt from Practical Experiences*. Paris, Commission Internationale des grands Barrages. Bulletin 121: pp. 145
- Petrescu, I., Nițu, V. 1966 – 1968. *Harta geologică 1:200000 – foaia 5 Rădăuți (L-35-XI)*. Comitetul de Stat al Geologiei - Institutul Geologic Român
- INCDMRR (Institutul Național de Metale și Resurse Radioactive București). 2011. *Studiu hidrogeotehnic pentru analizarea stării generale actuale a iazului de decantare Tărnicioara, Faza 2 – Evidențierea fenomenelor de risc din corpul iazului de decantare, inclusiv stabilirea nivelului de alarmă și pericol (în piezometre)*. Vol.1. Contract : 203 /01.05.2011, Beneficiar: S.C. Conversmin S.A. București
- Indicativ NP 076/2013. *Normativ de proiectare, execuție și evaluare la acțiuni seismice a lucrărilor hidrotehnice din frontul barat*. Revizuire NP 076-2002.
- Indicativ P 100-1/2013. *Cod de proiectare seismică - Partea I - Prevederi de proiectare pentru clădiri*

- Juravle, D. 2015-2016. *Geologia României*. Curs intern la Facultatea de Geografie și Geologie Al. I. Cuza, Iași
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.J. 2007. *Environmental Geology (Handbook of Field Methods and Case Studies)*. Springer
- Mândruț, O. 2008. *Atlas geografic școlar*. Editura Corint, Romania.
- Mihai, S.O. 2006. *Numerical and statistical methods to assess the tailing ponds stability in mining industry*, Buletin Resurse Minerale, nr. 1, 2006, pp. 27-34
- Mihai, S.O, Deák, Gy., Oancea, I., Petrescu, A. 2008. *Tailings Dams and Waste-rock Dumps Safety Assessment using 3D Numerical Modeling of Geotechnical and Geophysical Data*, Proceedings of the 12th International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics 1-6 October, 2008, Goa, India, pp. 4212-4220
- Moraru, R. I., Babuș, G. B, Ciocă, L. I. 2012, *An inventory of environmental risks induced by tailing dams and sytematic mitigation measures*. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference - SGEM2012 Conference Proceedings/ ISSN 1314-2704, June 17-23, 2012, Vol. 5, pp. 43 - 50
- Regulamentul NTLH-021/2002. *Metodologie privind stabilirea categoriilor de importanță a barajelor*
- Rosenblueth, E. 1975. *Point estimates for probability moments*. Proc Nat Acad Sci USA 72(10), pp.3812-3814
- Standard SR EN 1997-1/2004, *Eurocod 7: Proiectarea geotehnică – Partea I: Reguli generale*
- Standard STAS 4273-83. *Construcții hidrotehnice. Încadrarea în clase de importanță*
- Șerban, F., 2010. *Utilizarea tehnicilor satelitare pentru monitorizarea deformării terenului*. Propunere proiect pilot pentru monitorizarea zonelor miniere închise. Advanced Studies and Research Center (ASRC).
- Ștefănescu, M., working group 1988. *Geological cross sections at scale 1:200.000*. A9-14. Inst. Geol. Geofiz., Bucharest
- Vanden Berghe, J.F., Ballard, J.C., Wintgens, J.F., List, B. 2011, *Geotechnical Risks Related to Tailings Dam Operations*. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, 6-9 November
- Vick, S. G. 1983. *Planning, design and analysis of tailings dams*. New York John Wiley & Sons
- Wright, S. 1969. *A study of Slope Stability and the Undrained Shear Strenght of Clay Shales*. PH. D. Thesis, University of California, Berkeley, California
- Zardari, M. A. 2011. *Stability of Tailings Dams - Focus on Numerical Modelling*, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering, Lulea University of Technology, SE-97187 Luleå, Sweden