

CONTRIBUȚII LA MONITORIZAREA STABILITĂȚII CONSTRUCȚIILOR HIDROTEHNICE

-Rezumat-

Cuvinte cheie: baraje, rețele geodezice, monitorizare, baze de date, măsurători GPS.

Analiza comportării în timp a barajelor pe baza măsurătorilor geodezice în vederea determinării deplasărilor și deformațiilor reprezintă o activitate complexă și un volum de calcule cu totul deosebite.

Apariția echipamentelor și tehnologiilor geodezice moderne de măsurare, sigur, a adus o îmbunătățire remarcabilă a preciziei de determinare a poziției punctelor rețelelor geodezice de urmărire, a permis facilități deosebite în procesul de măsurare, dar în același timp, așa cum am precizat în această lucrare, a impus necesitatea stabilirii gradului de încredere în rezultatele măsurătorilor, astfel încât să fie înlăturată orice incertitudine în interpretarea și luarea deciziilor privind deformațiile obiectivului urmărit, în speță, punerea în evidență a fenomenelor fizice care determină deplasările, nu utilizarea performantă a aparaturii, a metodelor de măsurare și a prelucrării datelor rezultate în urma măsurătorilor, cu alte cuvinte obținerea de informații privind comportarea în timp a obiectivului urmărit.

Concret, în funcție de metoda aleasă pentru analiza deplasărilor și deformațiilor, se impune efectuarea compensării mărimilor măsurate, individual, pentru fiecare epocă de măsurare sau în bloc.

Este necesară efectuarea analizei deplasărilor și deformațiilor prin metode specifice statisticii matematice, deoarece pe această cale nu se determină doar niște simple diferențe între poziția planimetrică și altitudinile punctelor rețelei geodezice de urmărire la diferite epoci de măsurare, ci se analizează semnificația lor din punct de vedere statistic. Astfel, dacă aceste diferențe conțin doar informații în legătură cu erorile de măsurare, atunci acestea nu vor fi considerate a fi semnificative, însă dacă diferențele conțin informații atât cu privire la erorile de măsurare, cât și deplasările pe care le-au suferit punctele, atunci aceste diferențe vor fi considerate semnificative.

Prelucrarea statistică a măsurătorilor a fost efectuată stabilind variabilele dependente și independente astfel:

- variabilele dependente pentru fiecare observație, s-au obținut prin transformarea valorii cotei măsurată pentru un reper într-o diferență față de cota de bază pentru acel reper;
- variabilele independente pentru fiecare observație, au fost obținute prin transformarea datei observației (măsurătorii) în o valoare care exprimă (în luni) distanța în timp de la originea axei timpului (considerată prima tranșă de măsurători);

Analiza a fost efectuată în mod unitar pentru toate reperele de pe un aliniament, căutând ecuații de regresie asemănătoare pentru aceste puncte.

Construirea modelelor de comportare ale obiectivelor studiate, care pot furniza informații în legătură cu deplasările și deformațiile suferite de către obiectivul urmărit, analiza situațiilor anterioare, dar și prognoza tendinței de evoluție în timp impun, așa cum am aratat prin tratarea teoretică, dublată de experimentele practice prin compararea între utilizarea diverselor aparate clasice și moderne, a metodelor de măsurare clasice și moderne, inclusiv tehnicile de prelucrare a datelor măsurate, aplicarea testelor de congruență între epocile de măsurare. Astfel pot fi puse în evidență ambiguitățile și procedeele de înlăturare a lor. Mai exact se pot găsi punctele unde se produc deplasări și se poate analiza cauza acestor deplasări.

Atât în abordarea clasică cât și în abordările moderne se pune problema realizării unei baze (rețele) geodezice de urmărire într-o zonă relativ stabilă față de mărcile de urmărire(ținte) aplicate pe construcția supusă urmăririi, care să asigure stabilitatea poziției punctelor între intervalele de timp în care se executau măsurătorile ciclice. Primul ciclu este considerat ciclul de referință (*ciclul zero*). În acest caz proiectarea și realizarea configurației rețelei trebuia să asigure pe lângă precizia măsurătorilor, un sistem de materializare a punctelor geodezice, conservarea lor în timp și nu în ultimul rând să țină seama de faptul că o analiză corectă a deplasărilor și deformațiilor se poate face doar în cazul în care la fiecare epocă de măsurare se iau în considerare aceleași puncte din cadrul rețelei geodezice de urmărire.

Bazele (rețelele) geodezice se construiesc după principiul omogenității, prin urmărirea asigurării unei precizii de determinare uniforme pentru toate punctele din cadrul rețelei geodezice de urmărire, din această cauză sunt preferate rețelele libere, care să nu permită introducerea erorilor produse *a priori*.

Într-o rețea geodezică liberă, volumul de date inițiale este constituit de valorile provizorii ale necunoscutelor, măsurătorile efectuate și de matricea de covarianță corespondentă.

În cazul clasic era relativ dificil să fie efectuată o zonificare exactă, stabilitatea rețelei de urmărire era determinată prin măsurători de precizie iar omogenitatea rețelei presupunea metode riguroase de compensare.

O dată cu apariția tehnologiilor GNSS, coordonatele punctelor rețelelor de urmărire pot fi determinate prin măsurători satelitare, care dacă sunt prelucrate corect (aplicând toate corecțiile aferente), rezolvă problema stabilității zonei de influență, singurul impediment fiind acela că în apropierea unor împrejmuiri înalte, acestea pot obstrucționa vizibilitatea optimă a sateliților.

Lucrarea de față reprezintă rezultatul studiilor și lucrărilor practice desprinse din activitate de monitorizare a barajelor Tarnița și Fântânele din județul Cluj, desfășurate pe parcursul mai multor ani.

Capitolul 1 prezintă aspectele generale cu privire la construcțiile hidrotehnice, o clasificare a barajelor, întrucât modul de monitorizare a barajelor hidroenergetice diferă în funcție de tipul barajelor, clasificarea barajelor prezentate anterior a avut ca scop luarea în evidență a unor parametri ce trebuiesc monitorizați la diferite tipuri de baraje și în funcție de care și rețelele de urmărire sunt diferite.

Efectuarea măsurătorilor geodezice impune cunoașterea în detaliu a unor noțiuni privind construcțiile hidrotehnice atât pentru amplasarea rețelei geodezice de bază pentru urmărire, cât și pentru amplasarea mărcilor/țintelor pentru stabilirea cu precizie a deplasărilor.

În **capitolul 2** am analizat principalele metode de monitorizare a stabilității construcțiilor hidrotehnice cu precadere a metodelor geodezice clasice și moderne inclusiv tehnologia GNSS.

Măsurătorile pentru determinarea deplasărilor orizontale se vor raporta întodeauna la o rețea de sprijin situată în afara zonei de influență a construcției.

Determinarea deplasărilor orizontale se poate realiza cu ajutorul următoarelor metode: metoda microtriangulației, metoda microtrilaterației, metoda aliniamentului, metoda poligonometrică.

Dintre metodele amintite cele mai des utilizate sunt metoda *microtriangulației*, *microtrilaterației* și *metoda aliniamentului*, pe care le-am tratat pe larg în acest capitol, de asemenea am dezvoltat teoria și analiza erorilor privind deplasările în diferite forme ale rețelelor de urmărire.

La fiecare ciclu de observații se verifică poziția punctelor de sprijin N și P față de aliniamentul MQ, toate punctele să fie perfect colineare. Dacă pe obiectul examinat există o rețea de microtriangulație este bine ca aliniamentul să fie încadrat în aceasta, pentru a putea determina mai precis stabilitatea stațiilor. Aprecierea preciziei rezultatelor măsurătorilor, deplasărilor orizontale se face cu formulele[37]:

- eroarea medie pătratică de determinare a abaterii fiecărei mărci față de aliniament dintr-o singură serie:

$$m_o = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (2.19)$$

unde:

v – eroarea aparentă;

n - numărul de citiri într-o serie.

- eroarea medie pătratică a mediei aritmetice din n serii:

$$m = \pm \frac{m_o}{\sqrt{n}} \quad (2.20)$$

- eroarea medie pătratică a mediei abaterilor obținute din stația N și stația P se determină cu ajutorul relației mediei ponderate :

$$M_{tot.} = \pm \frac{m_{st.N} \cdot m_{st.P}}{\sqrt{M_{st.N}^2 + M_{st.P}^2}} \quad (2.21)$$

- eroarea medie pătratică de determinare a deplasării δ de la aliniamentul comun, obținută ca diferență a abaterilor ei în două cicluri de măsurători:

$$\mu_\delta = \pm \sqrt{M_{tot.(1)}^2 + M_{tot.(2)}^2} \quad (2.22)$$

Pentru a depista din timp eventualele situații de risc și a putea adopta măsuri de prevenire,obiectivele hidrotehnice sunt supravegheate permanent, dupa un program bine stabilit atât prin metode geodezo-topografice cât și prin metode fizice prin măsurarea anumitor parametri cu ajutorul aparatelor de măsură și control (traductoare) instalate în corpul construcției [75]. Dintre mărimile fizice care se determină enumerăm: nivelul apei în lac, temperatura aer, beton, apă, subpresiunea apei din terenul de fundare, presiunea apei în rosturi, nivelul pânzei freatice, nivelul curbei apei de exfiltrație, debite drenate, etc.

Deplasările complexe ale corpului barajului, datorate variației nivelului de apă din lac și variației temperaturii ambiante, constituie unele din mărimile cele mai importante care caracterizează global comportarea barajului la stres [75]. În acest capitol am prezentat și câteva metode fizice și dispositive utilizate la monitorizarea barajelor.

Monitorizarea și predicția comportării construcțiilor hidrotehnice și a zonelor adiacente acestora presupune utilizarea celor mai eficiente metode și instrumente, în primul rând că acestea reprezintă o prioritate publică pentru siguranța mediului și pentru că ele au un rol important în dezvoltarea regională durabilă.

Utilizarea instrumentelor și metodelor geotehnice și geodezice de ultimă generație, de la senzori la măsurătorile de poziționare GPS, particularizate pentru fiecare construcție hidrotehnică în parte a impus dezvoltarea unor noi tehnologii care au determinat creșterea credibilității măsurătorilor asigurate de sistemele de monitorizare.

În **capitolul 3** se prezintă analiza sub aspectul eficienței și calitații metodelor de monitorizare facând o comparație între metodele geodezice și celelalte metode EMM de monitorizare a barajelor.

Dacă procesul de monitorizare a barajelor se înscrie în Programul de eficiență energetică națională și europeană, *analiza cost-eficacitate (ACE)* este un instrument care poate ajuta la asigurarea utilizării eficiente a resurselor de investiții în sectoare în care beneficiile sunt dificil de exprimat monetar (să li se confere o valoare). Există o categorie vastă de proiecte ale căror beneficii fie nu au un preț de piață ușor accesibil fie nu sunt ușor măsurabile în termeni monetari.

Acesta este cazul metodelor de monitorizare a siguranței barajelor și în caz particular al măsurătorilor topo-geodezice de urmărire în timp a barajelor.

În acest context capitolul privind *analiza cost-eficacitate (ACE)*, are următoarele obiective:

- explică de ce ar trebui să fie utilizată ACE, în ce situații tipice poate fi utilizată și cum poate fi utilizată (prezentând principiile, conceptele și terminologia metodei, tehnicile ACE, etc)
- clarifică utilizarea ACE ca instrument alternativ sau complementar al Analizei Cost-Beneficiu
- identifică tipurile de investiții pentru care metoda ACE poate fi folosită
- oferă *exemplificarea practică* (prezentare generală și exemplu practic), cu privire la momentul și modul în care ACE ar trebui folosită în cazul monitorizării siguranței barajelor, având în vedere utilizările ACE.

Instrumentul cel mai utilizat pentru a fundamenta realizarea eficientă a unui proiect este *Analiza Cost-Beneficiu-ACB*[35].

Analiza cost-eficacitate privind utilizarea metodelor geodezice de măsurare față de măsurătorile efectuate cu instrumente EMM arată faptul că utilizarea simultană a acestora este soluția cea mai bună atât din punct de vedere financiar, cât și din punct de vedere tehnic.

În **capitolul 4** se prezintă realizarea un sistem informatic pornind de la diversitatea datelor de intrare, pe care le-am analizat pe larg, pentru a defini cât mai corect structura bazelor de date, care poate sta contribui substanțial la interpretarea datelor și luarea deciziilor, deasemenea este prezentată realizarea bazelor de date, privind măsurătorile topo-geodezice pentru monitorizarea stabilității barajelor în vederea creării unui suport decizional inteligent care va evalua în timp real parametrii de mediu necesari în gestiunea riscului producerii avariilor barajelor, pe baza unor tehnologii avansate (sisteme automate de achiziție date din teren, comunicatii wireless, sisteme de baze de date relationale, medii integrate de analiza a masivelor de date istorice— *Business Intelligence*, tehnologii de modelare și prognoza, medii GIS, dispozitive mobile pentru coordonarea activitatilor operative) și va oferi servicii S/T complexe de monitorizare și control. Am analizat realizarea unui sistem informatic de urmărire în timp a siguranței barajelor prin implementarea bazei de date *BDGEOSIGBARAJE*, cu cele două componente ale sale - "*realizarea platformei tehnologice de achiziție, analiză și decizie*" și "*realizarea suportului de studiu, prognoză și evaluare*", astfel au fost urmărite obiectivele :

- realizarea modelelor probabilistice pentru modelarea și simularea alunecărilor de teren;
- realizarea unei platforme tehnologice de achiziție date în timp real, analiză și decizie-suport al monitorizării on-line a parametrilor de mediu și managementului inteligent al riscului la alunecările de teren;
- realizarea suportului GIS de analiză (harta de hazard și harta de risc a zonei studiate);
- elaborarea unei soluții avansate de prognoză și evaluare a evoluției alunecărilor de teren, în intervale temporare determinate:
 - prin studii experimentale având la bază colecții de date reale, medii integrate de analiză software (*Business Intelligence*) și tehnologii de recunoaștere a modelului de evoluție (pattern-recognition).
 - prin aplicarea metodelor probabilistice.

BDGEOSIGBARAJE face parte din categoria sistemelor complexe urmând a asigura suportul decizional în evaluarea riscului la alunecările de teren pe versanți în aval și amonte de baraj și monitorizarea deformațiilor pe baza măsurătorilor topo-geodezice

Sistemul propus asigură achiziția datelor provenite de la traductoarele de deplasare și meteorologice și prelucrarea lor; prezentarea mărimilor achiziționate la dispecer, pentru obiectivizarea răspunsurilor specifice, eliminarea și/sau minimizarea efectelor asupra mediului și procesului tehnologic; prezentarea se face prin scheme sinoptice ca instrumente virtuale, diagrame de evoluție pe grupuri de parametri și intervale de timp selectabile, analize sincrone pe grupuri de parametri, marimi calculate și înregistrări grafice de evoluție pe diverse perioade de timp; încadrarea între limite admise a marimilor achiziționate, alarmare în cazul depășirii limitelor; realizarea buletinului de urmărire și a raportărilor specifice; elaborarea de rapoarte de sinteză utilizând datele din baza de date și din arhive și prezentarea lor pe display sau imprimantă, cu posibilitatea completării/ modificării lor de către utilizator; prezentarea conținutului bazei de date, a arhivelor, cu posibilitatea completării/ modificării; asigurarea suportului informațional prin crearea, întreținerea unei baze de date sigure și complete; informarea și formarea factorilor de decizie în vederea luării măsurilor optime ce se impun; informarea personalului, a mass-mediei, populației prin mijloace informatice la distanță;

Din punctul de vedere al arhitecturii, sistemul este dezvoltat pe modelul unei rețele distribuite de echipamente și microcalculatoare având la baza tehnica de calcul la nivelul standardelor actuale pentru respectarea cerințelor de prelucrare rapidă a unui volum important de informații, a cerințelor de fiabilitate ridicată și a necesităților de acces deschis către sistemul informatic.

În capitolul 5 intitulat "*Contribuții la realizarea bazelor (rețelelor) geodezice și topografice permanente folosite la determinarea stabilității construcțiilor barajelor*" am analizat posibilitatea de realizare a unor soluții practice privind realizarea bazelor geodezice și topografice permanente pornind de la o abordare sistemică în stabilirea zonei de influență, prin realizarea modelului digital al zonelor de risc la alunecări de teren, în special în amonte de baraj, practice astfel se răspunde la întrebarea unde se amplasează punctele bazei geodezice de urmărire a barajului. Apoi am analizat posibilitatea optimizării bazelor geodezice pe o cauzistică concretă, analizând rețeaua de urmărire pentru barajul Fântânele.

Pe baza unor experimente practice am utilizat principalele instrumente moderne de măsurare pentru a stabili condițiile optime de utilizare a metodologiilor de măsurare pentru îmbunătățirea preciziilor și punere în evidență și înlăturare a erorilor sistematice și întâmplătoare. De asemenea am plecat de la premisa că în cazul măsurătorilor în diverse epoci, la intervale de timp relativ mari, este necesară analiză omogenă a rezultatelor măsurătorilor, compararea acestor rezultate obținute în epoci diferite trebuie să aibă același grad de încredere.

Prin urmare modelul determinist al măsurătorilor trebuie completat cu modelul stochastic. S-a pus problema comparării unor măsurători de un anumit nivel de precizie cu alt set de măsurători de precizie diferită, ceea ce induce un grad de incertitudine în interpretare: diferențele dintre ciclurile de măsurători, întrebarea: "Diferențele de la o epoca la alta sunt datorate tehnologiei de măsurare sau fenomenelor fizice care influențează construcția?"

În acest capitol am prezentat câteva din metodele prin care se poate înlătura această incertitudine. Am analizat următoarele cazuri:

- înlăturarea incertitudinii datorate utilizării în epoci diferite a diferitelor tipuri de instrumente de măsurare
- înlăturarea incertitudinii datorate utilizării în epoci diferite a diferitelor metode de măsurare

- înlăturarea incertitudinii datorate utilizării în epoci diferite a diferitelor metode de prelucrare a măsurătorilor

În **capitolul 6** am prezentat ca studiu de caz măsurătorile pentru urmărirea comportării în timp a barajelor-Acumularea Fântânele-Marișelu și Tarnița. În acest capitol am introdus măsurătorile efectuate în mai multe cicluri de măsurători împreună cu prelucrările acestora pe baza cărora am analizat prin grafice comportarea în timp a barajelor.

Principalele activități avute în vedere în cursul anilor au urmărit:

- programul de măsurători, care a fost îndeplinit, în ce privește frecvența, numărul și calitatea măsurătorilor, în conformitate cu prevederile proiectului de urmărire specială.
- efectuarea urmăririi curente a barajului prin observații vizuale directe asupra tuturor părților de construcții neimersate.
- prelucrarea primară a măsurătorilor cu ajutorul unor programe speciale de compensare atât din punct de vedere planimetric, cât și altrimetric, a permis analiza complexă prin grafice sugestivă și a scos în evidență normalitatea comportării barajelor urmărite;
- întocmirea referatelor de observații asupra construcțiilor însoțite de fotografii și comentarii corespunzătoare.

Se apreciază ca activitatea de supraveghere asupra barajelor s-a desfășurat la un nivel cantitativ și calitativ foarte bun, permițând astfel o apreciere corectă a stării și comportării lucrărilor.

Frecvența măsurătorilor a fost respectată, numărul și calitatea măsurătorilor satisfac în prezent exigențele unei supravegheri corespunzătoare, în concordanță cu starea și condițiile de exploatare ale barajelor, deși o parte din EMM (traducătoarele termorezistive) nu mai prezintă în prezent, garanție în funcționare; influența acestora în aprecierea stării de comportare a ansamblului este însă actualmente mai puțin importantă, fiind suplinită de măsurătorile geodezice.

Dintre principalele tendințe, utilizate în ultima perioadă pentru urmărirea în timp a comportării construcțiilor se desprinde problema **înlocuirii metodelor clasice cu metode care utilizează aparatură modernă și tehnologii moderne.**

Metodele clasice au fost înlocuite sau completate de măsurători prin unde, măsurători fotogrammetrice, dar în special de metodele de măsurare și poziționare spațiale cum ar fi: măsurători laser de distanțe spre sateliți (SLR-Satellite Laser Ranging), măsurători interferometrice de baze (VLBI-Very Long Baseline Interferometry), măsurători Doppler, măsurători folosind sistemul de sateliți Navstar – GPS (*Navigation System with Time And Ranging- Global Positioning System*).

O concluzie deosebită s-a putut desprinde privind aplicarea tehnologiilor GNSS și anume aceea ca măsurătorile GPS nu pot fi introduse în analiza globală a epocilor de măsurare (măsurătorile GPS nu trec **testul de concordanță**).

Dacă se dorește utilizarea acestei tehnologii atunci prima măsurătoare GPS se constituie ca epocă de referință, iar celelalte măsurători GPS se raportează față de aceasta. Aplicarea acestei metodologii este benefică pentru ca toate punctele rețelelor geodezice de urmărire intră în prelucrare, nefiind necesară vizibilitatea reciprocă dintre puncte.

Dacă prin măsurarea deformațiilor se înțelege totalitatea măsurătorilor efectuate pentru stabilirea unei deformații elastice sau permanente a unor obiecte, sub influența forțelor interne și externe, atunci folosirea metodelor de măsurare topo-geodezice are importanță deosebită pentru:

a) determinarea deformațiilor barajului cum ar fi: tasările; influența vînturilor; deformarea sub presiunea schimbătoare a apei; etc.

b) determinarea deplasărilor unor părți ale suprafeței pământului, datorită construcțiilor subterane sau a exploatării subsolului, ca: alunecări de versanți; tasări datorită nivelului variabil al

pânzei freatică; scufundări lente în zonele de exploatare minieră; mișcările scoarței terestre sub influența forțelor tectonice;etc.

Aceste câteva exemple indică importanța care revine, mai ales în domeniile tehnicii construcțiilor și a științelor geologice, a măsurătorilor de deformații.

Ca o concluzie generală privind activitatea de urmărire în timp a barajelor, pentru asigurarea siguranței lor în procesul de exploatare, se desprinde necesitatea utilizării celor mai moderne și performante echipamente de măsurare cu aplicarea tehnologiilor aferente, dar mai ales utilizarea unor instrumente cel puțin la fel de performante pentru analiza și interpretarea datelor achiziționate- baze și bănci de date, sisteme informatice ca suport de analiză în luarea deciziilor etc.

Indiferent de tehnologia utilizată, a modelelor utilizate, cunoașterea forțelor generatoare de deformații nu poate fi realizată decât prin măsurători asupra cauzelor generatoare. În foarte multe cazuri nu se poate stabili o legătură funcțională univocă între cauzele fizice și efectul geometric al deformației, astfel încât procesul de mișcare este descris în timp prin poziția punctelor. Descrierea observațiilor prin parametrii cinematici ajută la deosebirea a două posibilități fundamentale și anume:

- modelarea mișcării ca o funcție de timp la care sunt acceptați parametri de mișcare individuali, care pot diferi puternic, chiar în punctele învecinate ;
- modelarea mișcării ca o funcție de timp și loc, la care are loc suplimentar față de modelul precedent o generalizare locală, ceea ce înseamnă că deplasarea unui punct de pe construcție la o anumită dată este interpretată prin prisma deplasării aceluiaș punct determinată la o măsurătoare anterioară.

*Progresul realizat prin apariția metodelor de crearea unei **realități virtuale** prin reprezentarea modelului digital 3D al barajului(utilizând tehnologii fotogrammetrice și de teledetecție-culegerea datelor folosind drone etc.) cu aplicarea **tehnologiilor de simulare**, va produce în viitor o dezvoltare fără precedent în monitorizarea construcțiilor hidrotehnice, domeniu pentru care această lucrare sper să fie o mică piatră de temelie.*