

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
FACULTATEA DE CĂI FERATE, DRUMURI ȘI PODURI
ȘCOALA DOCTORALĂ

Rezumatul tezei de doctorat

STUDIUL TUNELELOR EXECUTATE LA ZI

Doctorand
Ing. Flaviu Ioan Nică

Coordonator științific
Prof. Univ. Dr. Ing. Teodor Iftimie

**București
Aprilie 2019**

Mulțumiri

În primul rând doresc să-mi exprim recunoștință și aprecierea față de domnul profesor dr. ing. Teodor IFTIMIE conducătorul științific al tezei de doctorat, pentru atenta sa îndrumare și răbdare atât la realizarea tezei cât și în activitatea curentă de proiectare.

În al doilea rând, doresc să aduc mulțumiri firmelor S.C ISPCF S.A și S.C ARCADA COMPANY S.A pentru datele puse la dispoziție.

Mulțumiri deosebite la finalizarea prezentei teze, doresc să adresez familiei pentru încurajarea și susținerea acordată pe parcursul cercetării științifice.

Flaviu Ioan NICĂ

CUPRINS

CAPITOLUL I. Tunele executate de la suprafață.....	1
I.1. Introducere	1
I.2. Execuția tunelurilor de la suprafață în România	2
I.2.1. Tuneluri de metrou	2
I.2.2. Tuneluri de cale ferată	2
I.2.3. Tuneluri rutiere	2
I.3. Perspectivele realizării tunelurilor cu metode de execuție de la suprafață	3
I.3.1. Tunele de cale ferată.....	3
I.3.2. Tunele rutiere	3
I.4. Obiectivele lucrării	3
CAPITOLUL II. Calculul structural al tunelurilor executate la zi	4
II.1. Introducere	4
II.2. Modelul unidimensional	4
II.2.1. Metode analitice – structura provizorie	5
II.2.2. Acțiuni asupra tunelurilor executate de la suprafață	5
II.3. Metoda grinzii poligonale sau metoda resoartelor	5
II.4. Modelul mediului continuu.....	6
II.4.1. Programul cu element finit Plaxis 3D Tunnel	6
II.4.2. Modelarea cu Plaxis 3D Tunnel a Tunelului Turdaș	6
II.4.3. Comparatie între metoda resoartelor și MEF	8
II.5. Concluzii	8
CAPITOLUL III. Monitorizarea tunelurilor executate de la suprafață	9
III.1. Introducere.....	9
III.2. Monitorizarea tunelurilor executate la zi.....	9
III.2.1. Aparat de monitorizare a tunelurilor	9
III.2.1.1. Introducere	10
III.2.1.2. Stadiile betonului	10
III.2.1.3. Relația moment – curbura	10
III.2.1.4. Diagrama $M - (N) - k$ la Starea Limită de Ultimă (SLU)	10
III.2.1.5. Diagrama $M - (N) - k$ la Starea Limită de Serviciu (SLS).....	10
III.2.2. Transformarea măsurătorilor in situ	10
III.3. Monitorizarea Tunelului Turdaș	10
III.3.1. Stații de monitorizare.....	11
III.3.2. Determinarea eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, pe baza măsurătorilor in situ ..	12
III.3.3. Date obținute pe parcursul monitorizării tunelului Turdaș	12

III.3.4. Analiza rezultatelor monitorizării	12
III.3.4.1. Analiză structură provizorie – pereți mulați.....	12
III.3.4.2. Analiză structura definitivă - căptușeală interioară	16
III.3.5. Concluzii.....	19
CAPITOLUL IV. Calibrarea modelelor pe baza rezultatelor monitorizării	21
IV.1. Introducere	21
IV.2. Analiza numerică ținând cont de situația reală	22
IV.2.1. Modelul I.....	22
IV.2.1.1. Modelul IA	22
IV.2.1.2. Modelul IB	23
IV.2.2. Modelul II.....	24
IV.2.3. Modelul III	25
IV.3. Concluzii	27
CAPITOLUL V. Concluzii, contribuții și direcții viitoare de cercetare.....	27
V.1. Concluzii.....	27
V.2. Contribuții personale.....	28
V.3. Direcții viitoare de cercetare	29
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	29

CAPITOLUL I. TUNELE EXECUTATE DE LA SUPRAFAȚĂ

I.1. Introducere

Tehnologia de execuție a lucrărilor de tuneluri poate fi grupată în două categorii: execuție în procedeu deschis – săpătură deschisă executată de la suprafața terenului sau execuție în procedeu închis – săpătură închisă, utilizând metode de execuție specifice tunelurilor realizate în rocă.^[1]

Alegerea tehnologiei de execuție, în subteran sau în procedeu deschis se face în baza unei analize multicriteriale care ia în considerare următorii factori: natura terenului și acoperirea; amplasamentul tunelului, în zona urbană sau extraurbană; impuneri legate de mediu prin nederanjarea unor zone protejate cu faună, floră sau animale; situația juridică (exproprii) a terenului.

Tunelurile realizate prin metode de la suprafață pot fi tuneluri executate în săpătură parțial deschisă și săpătură complet deschisă care se compară cu soluția de realizare a căi de comunicație în tranșee deschise. O analiză comparativă asupra celor trei soluții, cu trăsăturile specifice, este prezentată în continuare.^[3]

Tranșee deschise (fig. I.1A) – realizarea unei căi de comunicație în tranșee deschise prezintă următoarele trăsături specifice: ampriză mai mare – datorită pantelor taluzurilor; mediul înconjurător – este deranjat definitiv; costuri destul de ridicate pentru realizarea excavației, transportarea și depozitarea unei cantități însemnate de pământ; probleme de întreținere și siguranță apărute în timpul exploatării (alunecări, înzăpeziri).^[3]

Tunel în săpătură complet deschisă - prezintă următoarele trăsături specifice: ampriză mai redusă și provizorie decât în cazul utilizării tranșei deschise; mediul înconjurător este deranjat provizoriu, fiind refăcut la starea inițială la finalizarea lucrărilor; costuri ridicate date de realizarea sistemului de sprijinire provizoriu sau definitiv, dar reducerea zonei deranjate de la suprafață; oferă siguranță pe parcursul execuției, cât și în exploatare deoarece nu necesită întreținere pe timp de iarnă.^[3]

Câteva variante constructive ale tunelului executat în săpătură complet deschisă sunt: polată (fig. I.1B) - construcție de protecție împotriva căderilor de stânci; varianta I (fig. I.1C) – execuția presupune excavarea până la cota de fundare cu pereți taluzați sau sprijiniți, construirea tunelului și aducerea la starea inițială a terenului; variantele II.D1 și II.D2 – execuția presupune excavarea până nivelul platformei de realizare a sistemului de sprijinire, execuția sistemului de sprijinire, excavarea în interiorul incintei până la cota de fundare în trepte și realizarea structurii interioare care poate fi de formă dreptunghiulară (fig. I.1.D1) sau circulară (fig. I.1.D2).

Tunel în săpătură parțial deschisă – se realizează pretranșea până la cota de execuție a sistemului de sprijinire, se realizează un sistem de sprijinire definitiv, care este alcătuit din pereți de sprijin verticali și o protecție superioară, care poate fi planșeu sau boltă, apoi sub protecția sistemului de sprijinire realizat se excavează pământul până la cota de fundare în subteran și se execută structura interioară care poate fi circulară (fig. I.1.E1) sau dreptunghiulară (fig. I.1.E2).

Realizarea unui tunel în săpătură parțial deschisă prezintă trăsături specifice similare cu tunelul realizat în săpătură complet deschisă cu următoarele diferențe: refacerea mai rapidă a terenului la suprafață; reducerea costurilor prin redarea terenului de la suprafață într-un timp mai redus.^[3]

Schema ilustrativă a tehnologiei de execuție a tunelurilor de la suprafață, în comparație cu varianta tranșei deschise este prezentată în fig. I.1.

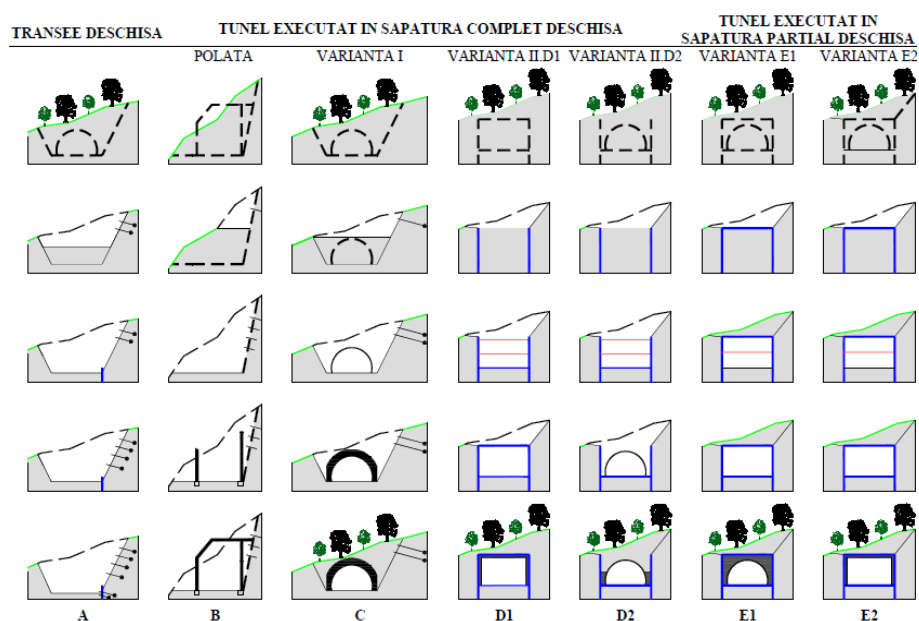


Fig. I.1. Tehnologie de execuție a tunelurilor de la suprafață comparativ cu varianta tranșee deschise

I.2. Execuția tunelurilor de la suprafață în România

I.2.1. Tuneluri de metrou

Realizarea metroului din București a fost decisă în anul 1972, iar în anul 1975 au debutat lucrările, ritmul de lucru fiind de aproximativ 2km/an, ulterior fiind accelerat la 4km/an.

În prezent sunt în curs de finalizare stațiile și tunelurile aflate pe magistrala V de metrou din București – Râul Doamnei – Pantelimon. Stațiile și secțiunea de tunel dintre stația Romancierilor și depoul Valea Ialomiței au fost executate prin procedeul de la suprafață – tunel executat în săpătură parțial deschisă.

I.2.2. Tuneluri de cale ferată

Prima lucrare de tunel de cale ferată realizată în România prin metoda de execuție de la suprafață, tunel executat în săpătură parțial deschisă, este tunelul feroviar de pe linia de cale ferată Albeni – Alunu, cu o lungime de 45.00m, care subtraversează Drumul Cărbunelui.^[7]

Pe linia Bumbesti – Livezeni, în perioada 1970 - 1973, pe zonele cu căderi de stânci s-au executat polate și semipolate, parțial sau total prefabricate. Au fost executate 14 polate în lungime totală de 1664 m și 2 semipolate de 68m.

Pe linia Piatra Olt – Podul Olt în zona Râul Vadului s-a executat în anul 2006 o construcție de protecție contra căderilor de stânci, cu o soluție structurală nouă, total prefabricată, ca urmare a prăbușirii unei cantități mari de stânci.^[8]

În cadrul reabilitării linie de cale ferată a Coridorului IV Pan-European Feroviar, în România, între Brașov și Simeria s-au executat două tuneluri, Sighișoara (fig. I.2A) și Daneș, ce cuprind la capete zone cu execuție de la suprafață. Metoda de execuție de la suprafață utilizată în cazul ambelor tuneluri este cu săpătură complet deschisă.

I.2.3. Tuneluri rutiere

Cel mai nou tunel rutier dat în exploatare este tunelul de la Săcel (fig. I.2C), pe lotul patru al autostrăzii Sibiu – Orăștie, având o lungime de 340.00m, fiind executat în săpătură parțial deschisă.^[10]

În categoria tunelurilor rutiere pot fi încadrate și ecodeuctele prevăzute pentru trecerea animalelor. Pe lotul patru al autostrăzii Lugoj – Deva, este executat ecodeuctul de la km 85+775, fiind o structură executată de la suprafață, parțial prefabricată – tunel executat în tranșee deschisă. ^[11]

Sunt încadrate în categoria tuneluri – cu execuție de la suprafață având lungimi cuprinse între 22.00m și 562.00m, cele 10 polatele realizate pe Transfăgărășan cu rol de protecție împotriva căderilor de stânci. ^[12]

În București s-au realizat prin metode de execuție de la suprafață – în săpătură complet deschisă sau parțial deschisă o serie de pasaje subterane, dintre care două dintre ele după anul 1990. ^[12]

I.3. Perspectivile realizării tunelurilor cu metode de execuție de la suprafață

I.3.1. Tunele de cale ferată

În cadrul proiectului de reabilitare a linie de cale ferată Brașov – Simeria sunt cuprinse o serie de tuneluri, Beia I și II, Archita I și II, Ormeniș I și II, Homorod I și II, care au în alcătuirea lor secțiuni executate de la suprafață în săpătură complet deschisă sau parțial deschisă.

În cadrul proiectului de reabilitare a linie de cale ferată Frontieră – Simeria, este prevăzut tunelul Polată – Tunelul 0, prevăzut cu execuție de la suprafață în trei zone.

I.3.2. Tunele rutiere

Pe autostrada A1, tronsonul Lugoj – Deva este prevăzut tunelul Urșilor (fig. I.2B), având o lungime totală de 1880m, conține mai multe zone cu execuție de la suprafață - prin metoda tunel executat în săpătură complet deschisă, însumând o lungime totală de execuție în subteran de 1358.80 m și trei zone de execuție la zi, însumând 521.20m. ^[17]

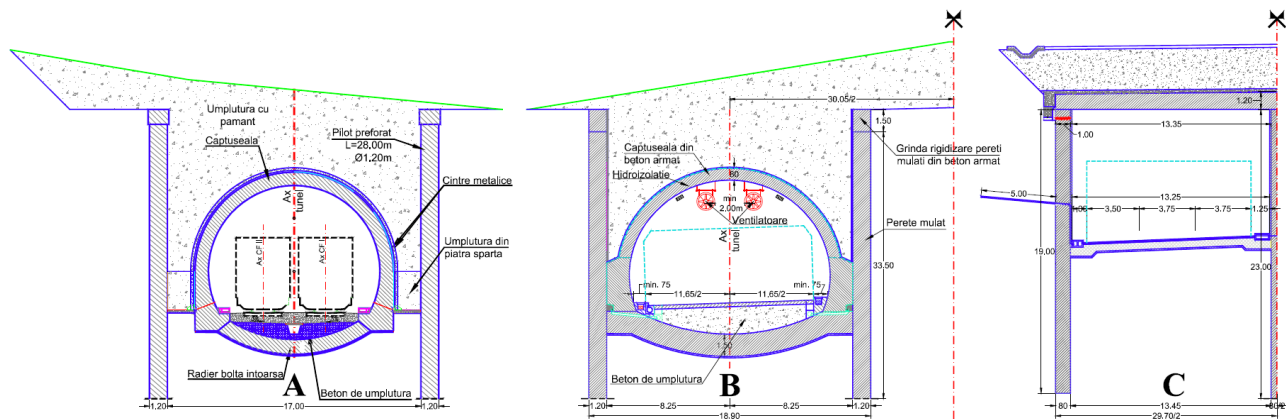


Fig. I.2. Secțiune transversală tunel: A – Sighișoara^[9], B - Urșilor^[17] - Săcel^[10]

I.4. Obiectivele lucrării

Numărul considerabil de tuneluri cu execuție de la suprafață ce urmează a fi puse în operă pe toate căile de comunicații de la noi din țară, importanța acestora și diversitatea de soluții, conduc la necesitatea realizării unor studii și cercetării științifice din partea specialiștilor în domeniu care să asigure execuția unor lucrări la nivelul de performanță actual.

Prezenta lucrare se înscrie în cadrul acestui efort comun de îmbogățire a cunoașterii în cadrul acestui domeniu.

Principalele obiective ale prezentei lucrări sunt:

- ✓ Studierea comparativă a metodelor de execuție și a secțiunilor transversale specifice care pot fi utilizate în concepția și realizarea tunelurilor de la suprafață;

- ✓ Prezentarea principalelor lucrări de acest tip realizate la noi în țară și perspectivele acestui domeniu;
- ✓ Studiul modelelor de calcul și analiza metodelor de calcul utilizate în cadrul practicii curente de proiectare a tunelurilor executate la zi și exemplificarea utilizării metodelor mai performante pentru un caz concret;
- ✓ Studiarea metodelor și aparaturii utilizate la monitorizarea tunelurilor executate de la suprafață, urmărirea concretă a comportării unui astfel de tunel în timpul execuției și valorificarea rezultatelor prin comparare cu datele inițiale de proiectare;
- ✓ Calibrarea modelelor de calcul și a parametrilor utilizați pe baza rezultatelor monitorizării și îmbunătățirea cunoașterii comportării sistemelor structurale utilizate pentru tunelurile executate de la suprafață și eficientizarea proiectării acestora.

CAPITOLUL II. CALCULUL STRUCTURAL AL TUNELURILOR EXECUTATE LA ZI

II.1. Introducere

Realizarea unei lucrări de tuneluri executate de la suprafață într-un masiv are consecință înlocuirea stării de eforturi naturale cu o stare nouă de eforturi, a noului corp realizat din masivul cu gol și structura nou executată.^[18]

Tunelele executate la zi pot fi alcătuite din structură provizorie și structură definitivă sau structură definitivă. Calculul unei structuri compuse dintr-o structură provizorie și una definitivă necesită analiza structurii în ansamblul ei, pentru a ține cont de conlucrarea dintre cele două structuri.

În fig. II.1 este prezentată o schemă generală a metodelor de calcul pentru tunelurile executate de la suprafață, iar împărțirea generală corespunde celor două domenii ale mecanicii mediilor deformabile, rezistența materialelor – modelul unidimensional și teoria elasticității – modelul mediului continuu bidimensional sau tridimensional.

Modelele de calcul structural pentru tuneluri executate de la suprafață pot fi împărțite în: model unidimensional și modelul mediului continuu - bidimensional sau tridimensional.

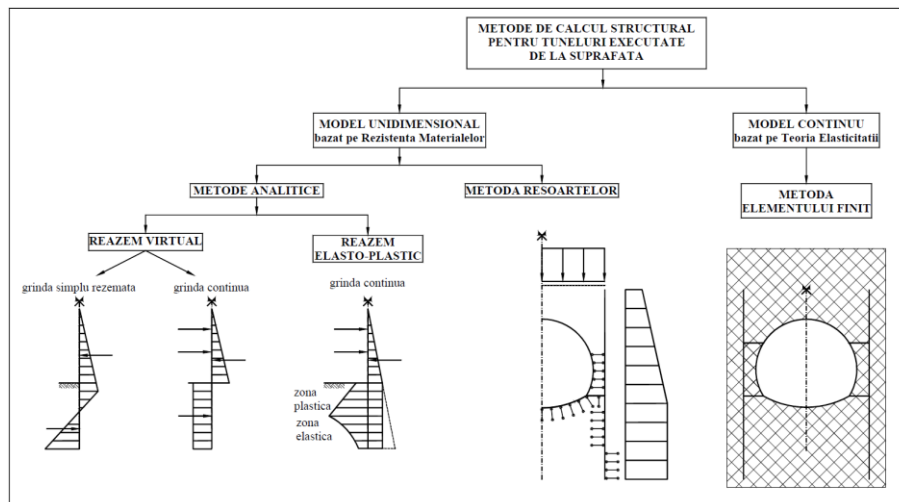


Fig. II.1. Schemă de calcul structural pentru tuneluri executate de la suprafață

II.2. Modelul unidimensional

Modelul unidimensional este bazat pe rezistența materialelor și consideră elementele componente care alcătuiesc structura tunelului compuse din bare, iar încărcările se determină separat. În funcție de modul de interacțiune considerat se adoptă metoda de calcul care poate fi metoda analitică sau metoda resoartelor.

Pentru tunelele executate la zi adoptarea metodei de calcul conform modelului unidimensional este determinată de alcătuirea acestora și de tehnologia de execuție (fig. I.1).

Pentru structurile compuse alcătuite din structuri provizorii (exterioare) și structuri definitive (interioare) pot fi utilizate următoarele metode: metode analitice pentru structura provizorie și metoda resoartelor pentru structura definitivă; metoda resoartelor pentru structura compusă.

Pentru structurile definitive realizate în săpătură complet deschisă (fig. I.D) sau parțial deschisă (fig. I.E) se utilizează metoda resoartelor.

II.2.1. Metode analitice – structura provizorie

Metodele analitice, utilizate pentru pereții mulați, stabilesc modelele de calcul în funcție de sistemul de sprijinire care poate include șpraițuri sau ancore. Peretele sprijină simplu rezemat pe fiecare ancoră sau șpraiț, iar în teren, aproape de cota inferioară a peretelui este introdus un suport virtual. Deplasările orizontale și deformațiile sunt cumulate după fiecare etapă de calcul.

Metodele analitice de determinare a eforturilor și deformațiilor pentru o structură provizorie a unui tunel executat în săpătură complet deschisă sprijinită cu șpraițuri poate adopta următoarele modele: modelul grinzii simplu rezemate – acest model presupune că peretele este sprijinit în două puncte – primul fiind șpraițul și cel de-al doilea fiind reprezentat de un reazem virtual introdus ca punct de sprijin al rezistenței pasive a pământului ^[19]; modelul grinzii continue – modelul consideră mai multe puncte de sprijinire reprezentând numărul de șpraițuri și un reazem virtual introdus ca punct de sprijin al rezistenței pasive a pământului. ^{[20], [21]}

II.2.2. Acțiuni asupra tunelurilor executate de la suprafață

Forțele care acționează asupra unui tunel executat de la suprafață pot apare atât în timpul execuției cât și în exploatare și pot proveni din convoaie rutiere sau feroviare, seism sau din efecte de lungă durată date de încărcarea din pământ.

În cadrul etapelor de proiectare se aplică o serie de coeficienți cu rol de asigurare, având în vedere gradul de necunoaștere al stării reala a pământului din amplasament.

II.3. Metoda grinzii poligonale sau metoda resoartelor

Metoda grinzii poligonale sau metoda resoartelor este o metodă a modelului unidimensional. Această metodă presupune aplicarea încărcării active din spatele peretelui și simularea rezistenței pasive cu ajutorul unor reazeme elastice care pot prelua doar forțe de compresiune, modelul fiind realizat iterativ prin eliminarea reazemelor unde rezultă întindere și adăugarea de reazeme unde rezultă o forță de comprimare mare. ^[18]

Tunelurile executate de la suprafață în săpătură complet deschisă se consideră ca fiind formate din: o structură provizorie alcătuită din sistemul proiectat să preia încărcările date de teren – presiuni active; o structură definitivă proiectată să preia încărcările date de structura provizorie și de teren.

Realizarea unui model de calcul pentru structura provizorie utilizând metoda resoartelor presupune urmărirea fazei de execuție – excavație până la cota inferioară, unde se consideră structura provizorie, pe jumătate – fiind simetrică, idealizată la axa mediană pe care vom aplica forțele rezultate din presiunea pământului.

Pentru realizarea calcului cu modelul unidimensional s-a utilizat programul Csi Bridge 2019. Rezultatele eforturilor secționale moment încovoietor și forță axială obținute în cadrul programului sunt prezentate sub formă de diagrame în fig. II.5.

Realizarea modelului și introducerea datelor în cadrul programului constituie o acțiune facilă și rapidă. Rezultatele se obțin rapid și metoda poate constitui o opțiune bună pentru calculele preliminare, de estimare.

Comparativ cu metoda analitică de calcul cu un suport virtual, metoda resoartelor are avantajul utilizării unui număr considerabil mai mare de puncte de sprijin – reazeme elastice, simulând mai aproape de realitate comportarea structurii provizorii.

II.4. Modelul mediului continuu

Modelul mediului continuu poate fi bidimensional sau tridimensional și starea de eforturi și deformații în ansamblul teren – căptușeală se determină cu ajutorul metodelor teoriei elasticității, analitice sau numerice. Dintre metodele numerice, metoda elementului finit este cea mai utilizată.^[18]

Pentru un tunel a cărui execuție este realizată prin metode de suprafață care presupune realizarea unei tranșei, deci înlocuirea stării de eforturi naturale din teren cu o stare de eforturi dată de sistemul de sprijinire provizoriu și tunel este recomandat a se realiza un model continuu de calcul utilizând metoda elementului finit. Prin utilizarea programelor de calcul care folosesc metoda elementelor finite se pot surprinde etapele de execuție și pot fi luate în considerare un număr mai mare de ipoteze de lucru.

II.4.1. Programul cu element finit Plaxis 3D Tunnel

Plaxis 3D Tunnel este un program special de calcul bazat pe metoda elementului finit utilizat pentru analiza deformării și stabilității tunelurilor în soluri și roci.^[29]

II.4.2. Modelarea cu Plaxis 3D Tunnel a Tunelului Turdaș

Tunelul Turdaș este amplasat pe varianta locală de traseu, din tronsonul de cale ferată Coșlariu – Simeria, parte componentă a liniei de cale ferată Brașov – Simeria, adoptată pentru a realiza viteza de 160 km/h pentru trenurile de călători și 120 km/h pentru trenurile de marfă, în cadrul reabilitării coridorului IV Pan European Feroviar.^[30]

Tunelul Turdaș are o lungime de 780m, fiind amplasat între km. 456+295 – 457+075 și este executat integral de la suprafață în terenuri slabe (argilă prăfoasă, pietriș – nisip, argile mărunoase și marne) cu existența unor minerale argiloase care se umflă, nivelul apei ridicat și acoperirea terenului cuprinsă între 2.00 – 14.00m.^[30]

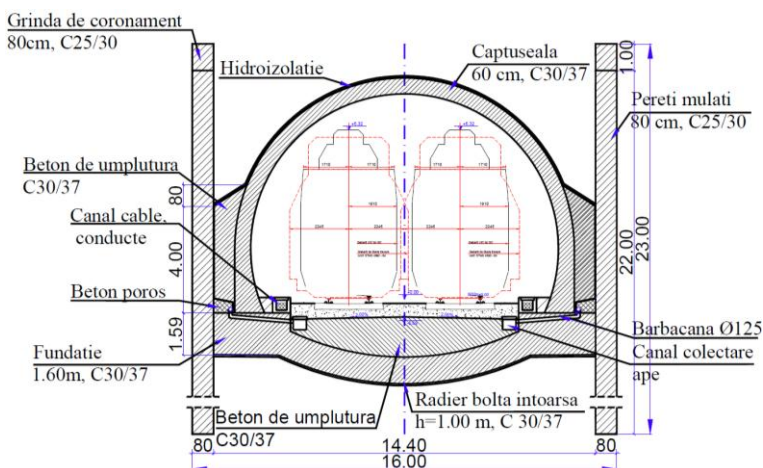
În plan, tunelul este în curba, cu raza, $R=3000\text{m}$ (456+295 – 456+900, $L=605\text{m}$), CR (456+900 - 456+980, $L=80\text{m}$), aliniament (456+980 - 457+075, $L=95\text{m}$). În profil în lung panta este $i=5\%$.^[30]

În lucrare a fost exemplificată secțiunea cea mai defavorabilă (tip IV cu acoperire 14.00m) pentru care au fost simulate 14 faze de execuție și două de încărcare cu seism și presiune de umflare.

Secțiunea transversală este caracterizată de: pereți mulați beton C25/30, grosime 80cm, înălțime 23.00m; căptușeala beton C30/37, grosime 60cm, $R_i = 5.80\text{m}$, $R_e = 6.40\text{m}$; radierul boltă întoarsă beton C30/37, grosime 1.00m, $R_i = 10.03\text{m}$, $R_e = 11.03\text{m}$; fundație beton C30/37, grosime 1.60m; beton de umplutură C30/37, grosime 80cm; distanța dintre pereții mulați $L=14.40\text{m}$. Pentru a ține seama de presiunea de umflare s-a aplicat o forță de 200kN/m^2 .^[30]

În cadrul procesului de proiectare al Tunelului Turdaș a fost utilizat și programul de calcul cu element finit Plaxis 3D Tunnel, care permite simularea fazelor de execuție specifice unui tunel, cu ajutorul cărora au fost modelate fazele de execuție, acestea fiind: etapa 1 - excavație până la nivelul de realizare a platformei de execuție a pereților mulați; etapa 2 - se execută pereții mulați și se activează încărcarea dată de utilajele care vor circula pe drumurile tehnologice; etapa 3 - se excavează între pereții mulați până sub nivelul șpraițului superior – SP I; etapa 4 - se montează primul rând de șpraițuri, la distanță interax de 6m; etapa 5 - se excavează până la nivelul doi de șpraițuri; etapa 6 - se montează rândul doi de șpraițuri, dispuse în șah față de

cele de pe rândul unu; etapa 7 - se continuă excavația până la nivelul radierului boltă întoarsă; etapa 8 - se execută radierul boltă întoarsă; etapa 9 - se scoate șpraițul inferior; etapa 10 - se realizează căptușeala tunelului și betonul de umplutură dintre piciorul drept și peretele mulat; etapa 11 - se execută umplutura până sub șpraițul superior; etapa 12 - se scoate șpraițul superior; etapa 13 - se realizează umplutura până la nivelul grinzii de coronament; etapa 14 - se realizează umplutura până la nivelul inițial al terenului, în trepte; etapa 15 - se aplică presiunea de umflare pe suprafața radierului boltă întoarsă și încărcarea din umplutura radierului; etapa 16 - se aplică încărcarea din seism pe suprafața căptușelii și a radierului.

Fig. II.2. Secțiune transversală Tunel Turdaș ^[30]

Modelul structural inițial din programul Plaxis 3D Tunnel:

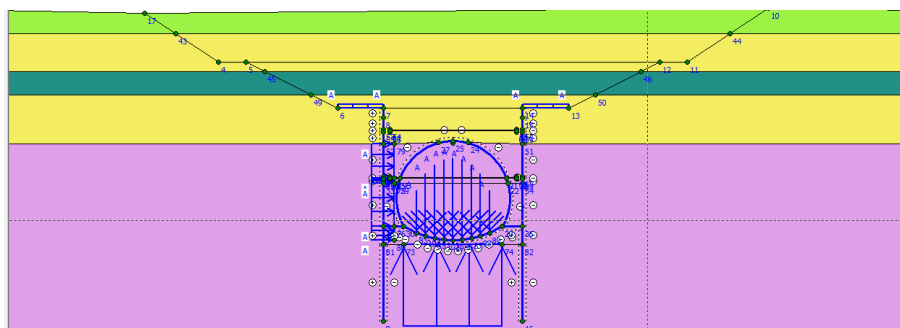
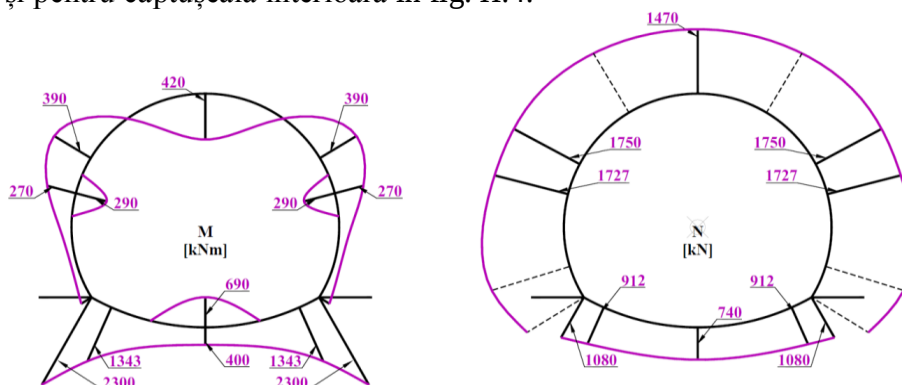


Fig. II.3. Vedere generală a modelului structurii în Plaxis 2D

Pentru sintetizarea rezultatelor, în urma obținerii diagramelor de moment încovoietor și forță axială, am realizat înfășurătorile pentru pereții mulati – prezentate în cadrul fig. II.5 pe diagrama comparativă cu metoda resoartelor și pentru căptușeala interioară în fig. II.4.

Fig. II.4. Înfășurători proiect în căptușeala interioară ^[30]

II.4.3. Comparație între metoda resoartelor și MEF

Rezultatele calculului cu metoda resoartelor, pentru faza de execuție – excavație până la cota inferioară, au fost comparate cu cele din etapa corespunzătoare din metoda elementului finit și sunt prezentate comparativ sub formă de diagrame de moment încovoietor și forță axială în fig. II.5.

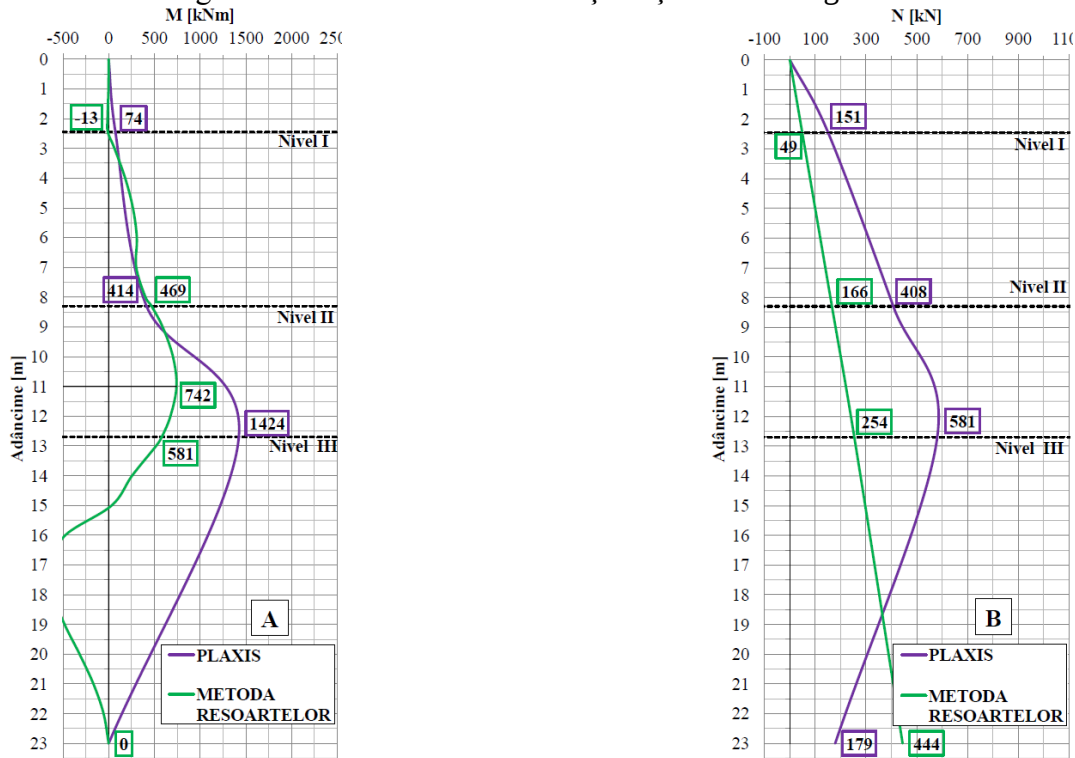


Fig. II.5. Diagrame comparative metoda resoartelor – metoda elementului finit în etapa 7: A - moment încovoietor; B - forță axială

Comparând valorile rezultate din programul Plaxis 3D Tunnel și din metoda grinzii poligonale sau metoda resoartelor se poate observa un parcurs asemănător pentru momentul încovoietor în zona nivelului unu și nivelului doi în timp ce în zona bazei excavației se constată diferențe.

Momentul încovoietor de la nivelul trei prezintă diferențe semnificative deoarece în cadrul programului cu element finit se consideră fazele anterioare și starea de eforturi inițială din teren.

Forța axială determinată prin metoda grinzii poligonale consideră doar greutatea proprie a structurii în timp ce în cadrul programului cu element finit sunt luați în considerare toți factorii.

II.5. Concluzii

Secțiunea transversală adoptată la tunelul Turdaș și analizată în prezenta lucrare este o structură complexă, compusă dintr-o structură exterioară sau provizorie (pereții mulați) și o structură interioară sau definitivă (căptușeală interioară), executate în etape succesive, care trebuie să preia încărcările date de teren în funcție de etapa de execuție și să conlucreze pentru atingerea echilibrului final.

Alegerea metodei de calcul, pentru o astfel de structură, trebuie să țină cont de aceste caracteristici și să surprindă cât mai aproape de realitate comportamentul și conlucrarea structurilor componente.

Metodele analitice pot analiza doar comportarea structurii exterioare (pereții mulați) până la intrarea în lucru a primului element al structurii interioare (radierul).

Metoda grinzii poligonale sau metoda resoartelor poate analiza întreg ansamblul structura provizorie – structură definitivă, fiind capabilă să ia în considerare conlucrarea dintre cele două structuri și iterativ putând fi simulate și fazele de execuție, dar prezintă dificultăți în evaluarea încărcărilor pe faze.

Metoda elementului finit poate analiza comportarea structurii studiate cel mai aproape de realitate, prin simularea corectă a stratificației terenului, a alcătuirii structurilor componente și a fazelor de execuție, pe baza unor parametri bine determinați.

Având în vedere complexitatea alcătuirii și comportării structurii studiate se impune ca rezultatele calculului să fie verificate și validate prin monitorizarea unei astfel de structuri în situ, acțiune ce a fost realizată pentru tunelul Turdaș și care va fi prezentată în capitolul următor.

CAPITOLUL III. MONITORIZAREA TUNELELOR EXECUTATE DE LA SUPRAFAȚĂ

III.1. Introducere

Monitorizarea tunelurilor oferă o perspectivă reală asupra unei lucrări aflate în execuție, obținându-se date ce pot fi utilizate pentru a se asigura siguranța execuției și pentru a fi comparate cu datele prevăzute în proiectare sau a unei lucrări date în exploatare pentru care pot fi monitorizate efectele traficului, seismului sau alte efecte ce pot interveni după execuția lucrării.

Parametrii geotehnici utilizați la proiectare sunt determinați aproximativ și pe un eșantion limitat de probe, ceea ce conduce la stabilirea unor zone caracterizate de același comportament al terenului, dar și acestea fiind predictive. Prin intermediul monitorizării se pot adapta în timp real părțile componente ale unui tunel sau ale sprijinirii provizorii sau definitive, ceea ce conduce la optimizarea (structurală și economică) și adaptarea soluției alese la condițiile reale întâlnite în teren.

Monitorizarea tunelurilor pe timpul exploatării oferă siguranță și posibilitatea de a interveni înainte de producerea unui eveniment.

Principalele obiective ale monitorizării sunt: obținerea de informații asupra terenului pe parcursul execuției unui tunel; asigurarea controlului construcției; verificarea parametrilor de proiectare și a modelării cu element finit; măsurarea performanței căptușelii în timpul construcției și în exploatare; monitorizarea impactului asupra mediului înconjurător (deplasări ale masivului și regimul apelor subterane); optimizarea proiectării și realizarea execuției în siguranță.^[31]

III.2. Monitorizarea tunelurilor executate la zi

Monitorizarea tunelurilor executate de la suprafață este o acțiune obligatorie pentru o bună desfășurare a execuției lucrărilor și mai târziu, în perioada de exploatare, pentru a observa efectele de lungă durată asupra structurii tunelului cât și a structurilor din zonele adiacente.

Proiectarea tunelurilor executate de la suprafață care cuprind, de obicei, zone cu excavații adânci, se realizează cu ajutorul programelor cu element finit care pot simula etapele de execuție. Prin simularea etapelor de execuție se pot obține rezultate care pot fi comparate cu datele obținute din monitorizare cum ar fi: deformații/deplasări, eforturi secționale și/sau unitare sau forțe.

Gradul de aproximare utilizat în determinarea parametrilor de proiectare și a programelor cu element finit conduce la apariția unor rezultate care nu reflectă realitatea din teren, astfel cu ajutorul instrumentelor de monitorizare amplasate în situ se poate face o comparație și o calibrare a rezultatelor obținute din proiectare cu cele obținute prin monitorizare în situ și astfel o calibrare a parametrilor de proiectare introduși în calcul.

III.2.1. Aparat de monitorizare a tunelurilor

Pentru monitorizarea tunelurilor executate de la suprafață se poate utiliza o întreagă gamă de echipamente și sisteme de achiziție pentru preluarea datelor.

Aparatele utilizate pentru monitorizarea tunelului Turdaș sunt: înclinometru, mărci tensometrice cu coardă vibrantă, celule de presiune și aparat de preluarea a datelor CRD400.

III.2.1.1. Introducere

O structură de tunel executat de la suprafață trebuie să fie asigurată din punct de vedere al eforturilor și al deformațiilor care pot apărea atât în timpul execuției cât și pe parcursul duratei de viață proiectate, acestea putând fi exprimate prin rezistență și rigiditate.

Realizarea diagramelor M-(N)-k se bazează pe ipoteze diferite: pentru Starea Limită de Serviciu – sunt suficiente, de obicei, două faze de încărcare și pentru Starea Limită Ultimă este bazată pe patru faze de încărcare, un rol important îl joacă materialul și coeficienții de încărcare. ^[37]

III.2.1.2. Stadiile betonului

Transformarea valorilor măsurate în situ necesită cunoașterea comportamentului elementelor încovoiate care au la baza ipoteza secțiunilor plane sau Navier – Bernoulli. ^{[38],[39]}

III.2.1.3. Relația moment – curbura

Se știe că raportul dintre moment încovoietor (M) și rigiditatea la încovoiere (EI) este egal cu curbura (k), iar curbura este egală cu inversul razei curburii (ρ).

III.2.1.4. Diagrama M – (N) – k la Starea Limită de Ultimă (SLU)

În cazul unei structuri static nedeterminate din beton armat, mai importantă decât rigiditatea la încovoiere a fiecărui element este raportul rigidităților dintre elementele care intră în conexiune, adică betonul și oțelul. Într-o structură din beton armat încărcat treptat până la rupere se pot deosebi următoarele părți componente: părți nefisurate, părți fisurate, părți unde oțelul a ajuns la curgere, părți unde betonul cedează și părți care au cedat. Totuși părțile care interacționează au o rigiditatea la încovoiere care variază. ^[37]

Pentru trasarea diagramelor M-N-k sunt luate în calcul 4 faze de încărcare, pornind de la faza inițială – încărcarea inițială și apoi, treptat până la momentul cedării structurii. Cele patru faze de încărcare corespunzătoare momentelor specifice diagramelor M-N-k sunt: P_1 - momentul de fisurare (M_f) - curbura (k_f); P_2 - momentul de curgere (M_e) - curbura (k_e); P_3 - momentul cedării (M_{pl}) - curbura (k_{pl}); P_4 - momentul ruperii – ultim (M_u) - curbura (k_u). ^[37]

III.2.1.5. Diagrama M – (N) – k la Starea Limită de Serviciu (SLS)

În diagramele efort - deformație (σ - ϵ) pentru SLS se face distincție pentru încărcări de scurtă durată și încărcări de lungă durată. ^[37]

Acțiunile asupra tunelului executat de la suprafață sunt de lungă durată și sunt calculate conform Eurocodului 1992-1-1, unde sunt luate în considerare efectele curgerii lente prin utilizarea unui modul de elasticitate efectiv al betonului ($E_{c,eff}$), definit în funcție de numărul de zile scurs de la încărcare și până la momentul realizării măsurătorii în elementul structural monitorizat. ^[40]

Pentru trasarea diagramelor la SLS sunt suficiente două puncte corespunzătoare M_f și M_e . ^[37]

III.2.2. Transformarea măsurătorilor în situ

Citirile realizate cu ajutorul aparatului de achiziție date manual sunt transformate în unități ingineresti cu ajutorul fișei tehnice a aparatelor utilizate – mărci tensometrice și celule de presiune.

În cazul înclinometrelor se realizează citirea inițială după montarea tubulaturii înclinometrice în peretele monitorizat și ulterior se fac citiri succesive, deplasarea peretelui rezultând din diferența față de citirea inițială.

III.3. Monitorizarea Tunelului Turdaș

Monitorizarea tunelului Turdaș a fost prevăzută atât în timpul execuției cât și în exploatare prin aparatele montate atât în structura provizorie, cât și în cea definitivă. Aparatele montate în structura

provizorie au fost scoase din uz odată cu realizarea structurii definitive, rămând aparatele montate în radierul boltă întoarsă, picioarele drepte și boltă utilizabile atât în timpul realizării tunelului cât și în exploatare.

Prezenta lucrare studiază fenomenele ce au loc în timpul execuției, deoarece până la momentul scrierii acestei lucrări nu a fost finalizat tunelul, deci nu se pot surprinde date din timpul exploatării. Prin aparatele de monitorizare prevăzute în structura definitivă, se poate continua observarea fenomenelor, ceea ce este recomandat datorită prezenței pământurilor cu umflări mari care pot deveni active după un timp destul de îndelungat conform literaturii de specialitate acestea putând apărea și după câțiva ani.^{[41] [42] [43]}

III.3.1. Stații de monitorizare

Soluția adoptată la realizarea tunelului Turdaș, executat în săpătură complet deschisă, cu o structură provizorie (pereți mulați) și una definitivă (căptușeală interioară), a impus monitorizarea ambelor structuri pentru a surprinde atât comportarea cât și conlucrarea acestora.

Amplasarea în cadrul tunelului a stațiilor de monitorizare, s-a realizat în inelul 43 – stația I – pentru structura provizorie și în inelul 45 – stația II – pentru structura definitivă (fig. III.1), unde acoperirea și solicitările sunt maxime.^[30]

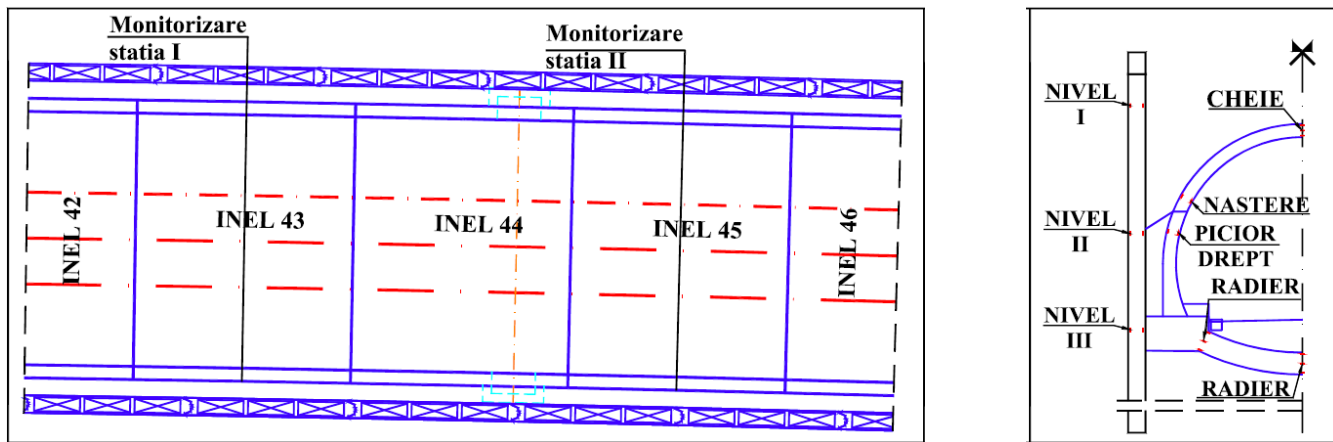


Fig. III.1. Vedere în plan a stațiilor de monitorizare și schemă de amplasare a mărcilor tensometrice

Stația unu de monitorizare destinată urmăririi comportării structurii provizorii a constat din: mărci tensometrice cu coardă vibrantă amplasate în pereții mulați (PM), pe ambele părți, în zonele momentelor încovoietoare maxime, câte două în secțiune; celule de presiune amplasate la nivelul celor două șpraițuri (SP I și SP II) cu considerarea nivelului maxim de compresiune proiectat; înclinometre amplasate în pereții mulați, pe ambele părți, pentru determinarea deplasărilor.

Stația doi de monitorizare, destinată urmăririi comportării structurii definitive alcătuită din radierul boltă întoarsă, fundații, picioare drepte și boltă, a necesitat de asemenea corelarea poziției de montare a aparatelor (mărci tensometrice) cu înfășurătoarea de momente încovoietoare.

Realizarea structurii definitive a necesitat o adaptare a tehnologiei de execuție la tipul cofrajului existent in situ, care a constat în realizarea în trei etape a structurii interne (1- radier boltă întoarsă și beton de umplură, 2 - picioare drepte și umplură, 3 - boltă), față de două etape prevăzute în proiect (1- radier boltă întoarsă, 2 - picioare drepte + umplură + boltă). Această adaptare a condus la o comportare diferită a structurii interne și a conlucrării dintre cele două structuri, față de proiect, cu influență asupra eforturilor secționale.

Secțiunile alese pentru monitorizare iau în considerare efectele cele mai importante care pot apărea în timpul execuție pentru secțiunea cu acoperirea și solicitările maxime.

III.3.2. Determinarea eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, pe baza măsurătorilor in situ

Determinarea eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, necesită parcurgerea următorilor pași comuni: stabilirea caracteristicilor secțiunilor transversale, a betonului, a armăturii și a șpraițurilor utilizate; trasarea diagramei de deformare specifică; determinarea deformății specifice la extremitatea betonului cu identificarea zonelor pozitive și negative; determinarea variației modulului de elasticitate efectiv al betonului; determinarea efortului secțional moment încovoietor - M [kNm].

Determinarea efortului secțional, forță axială, a necesitat continuarea pașilor cu: determinarea efortului unitar și trasarea diagramei; compararea efortului unitar în funcție de situație și intrarea în lucru a armăturii de la partea întinsă; calcularea forțelor de compresiune din beton și a celor două forțe din armătură; aplicarea unui coeficient care ține cont de conlucrarea armăturii cu betonul din zona întinsă; determinarea efortului secțional, forță axială - N [kN].

Trasarea diagramei ține cont de numărul de mărci amplasate pe secțiune, în cazul pereților mulați, picioarelor drepte și a nașterilor fiind câte două mărci, iar în cazul radierului boltă întoarsă și la cheie sunt câte trei mărci tensometrice.

Din cauza lipsei unui aparat de monitorizare amplasat în mijlocul secțiunii studiate atât la nivelul doi cât și la nivelul trei din pereții mulați, care ar fi oferit o imagine reală asupra diagramei de efort unitar, la determinarea forței axiale s-au aplicat coeficienți de corecție pentru obținerea unor valori cât mai apropiate de realitate.

III.3.3. Date obținute pe parcursul monitorizării tunelului Turdaș

Din datele monitorizate pe parcursul execuției tunelului am ales etapele semnificative care generează eforturile secționale cele mai importante pentru execuția unui tunel de la suprafață. Având în vedere faptul că tehnologia de execuție a fost adaptată la condițiile de teren și la utilajele disponibile, apar noi etape de execuție față de cele proiectate și dintre acestea vor fi prezentate cele semnificative.

Datele preluate din mărcile tensometrice amplasate la nivelul unu, prezintă date care nu pot fi luate în considerare în cercetarea de față, acestea fiind perturbate pe parcursul execuției.

Monitorizarea s-a realizat în nouă etape, primele trei etape cuprind structura provizorie cu rezultate în pereții mulați pentru deplasări, momente încovoietoare și forță axială (și în șpraițuri). În etapele IV – VII s-a monitorizat atât structura provizorie – pereții mulați, cât și structura definitivă – căptușeala interioară pentru care s-au realizat diagrame de moment încovoietor și forță axială, respectiv deplasări pentru pereții mulați și s-a analizat conlucrarea. Ultimele două etape sunt dedicate structurii definitive pentru care s-au realizat diagrame de moment încovoietor și forță axială.

III.3.4. Analiza rezultatelor monitorizării

Pentru interpretarea rezultatelor monitorizării, în scopul evaluării mai exacte a comportării structurii studiate și valorificarea acestora la lucrări viitoare a fost necesară o analiză mai aprofundată. În acest scop au fost realizate diagrame reprezentative și analize corespunzătoare, pentru cele două componente ale structurii analizate (III.3.4.1 pereți mulați și III.3.4.2 – căptușeală interioară).

III.3.4.1. Analiză structură provizorie – pereți mulați

A. Diagrame înfășurătoare pentru eforturi secționale, moment încovoietor maxim – M [kNm] – forță axială corespunzătoare – N [kN] (cu eforturi în șpraițuri și deplasări maxime pentru pereții mulați), comparative monitorizat – proiectat (fig. III.2).

Analiza acestor diagrame conduce la următoarele concluzii: eforturile secționale (M și N) și forțele în șpraițuri sunt mult mai mari în proiect, față de cele monitorizate, în principal datorită neconsiderării efectului

curgerii lente (încărcări de scurtă durată); diferențele dintre deplasările monitorizate fir unu și fir doi se datorează excavării diferențiate la suprafață și în interior pe fir unu și fir doi; diferențele mari înregistrate între monitorizare și proiect necesită o acțiune de calibrare a modelului de calcul pe baza datelor obținute prin monitorizare in situ.

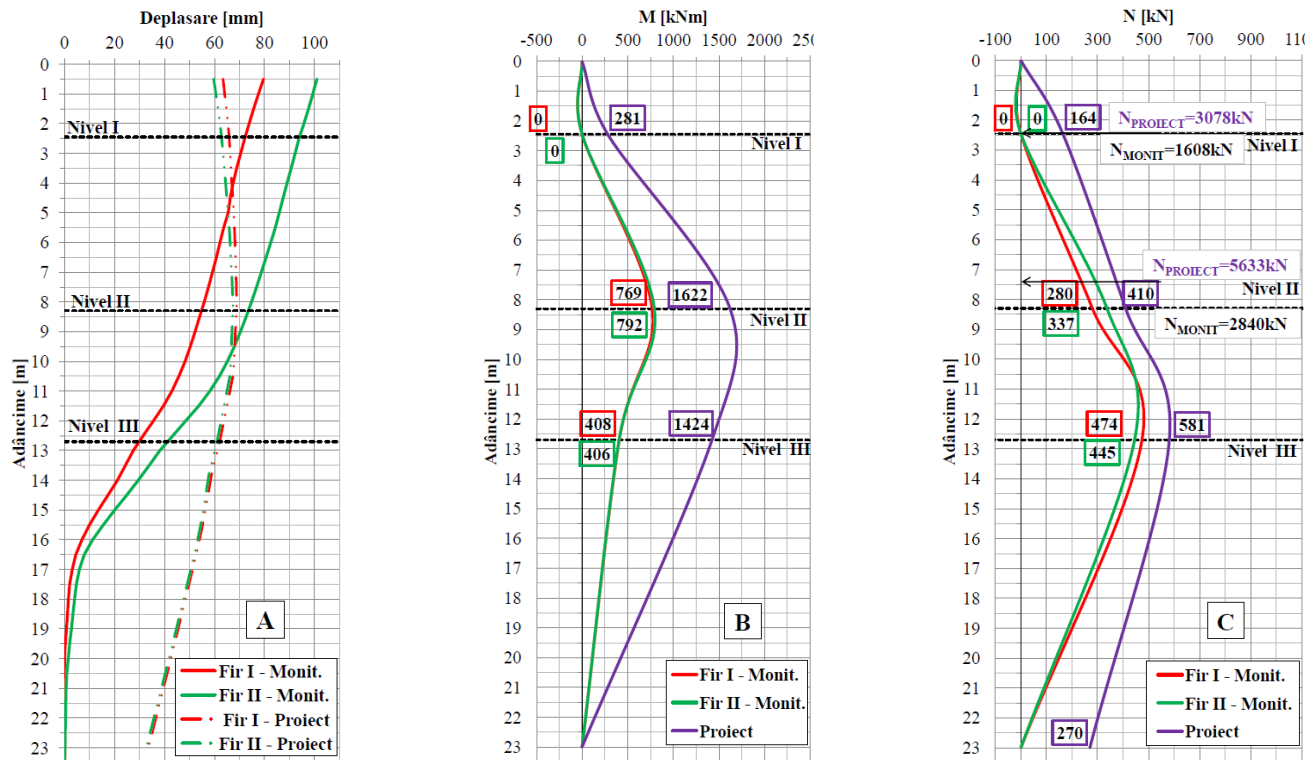


Fig. III.2. Infășurători comparative (proiectat – monitorizat) pereți mulați pentru: A - deplasare, B - moment încovoietor, C - forță axială și forțe în șpraițuri

B. Curbe de interacțiune limită $M - N$ în secțiunea cea mai solicitată (nivelul doi de mărci tensometrice).

Modul de comportare al unei secțiuni supuse la încovoiere cu forță axială depinde de corelația care există între cele două eforturi secționale, transpusă grafic prin curba de interacțiune limită $M - N$. Tipul de solicitare al secțiunii depinde de poziția axei neutre care este dată de raportul $M - N$.

În fig. III.3 este prezentată curba de interacțiune $M - N$ limită pentru acțiuni de scurtă durată corespunzătoare proiectului și pentru acțiuni de lungă durată, corespunzătoare monitorizării și valorile $M - N$ obținute în etapele monitorizate și în proiect care sunt prezentate și în detaliu în fig. III.4.

Curba de interacțiune $M - N$ permite definirea modului de comportare în care se află pereții mulați, după modul de cedare, care este încovoiere ($\hat{I}NC^{[45]}$), atât pentru încărcări de scurtă durată, cât și pentru încărcări de lungă durată, caracterizată de încovoiere preponderentă cu axa neutră în secțiune și forțe axiale foarte mici.

Caracteristic pentru comportarea pereților mulați în secțiunea cea mai solicitată sunt excentricitățile, $e_o = M/N$, foarte mari, (1.99m – 2.35m între etapele I – VI și 1.38m în etapa VII și 3.95m pentru proiect), dar sub excentricitatea de cedare de 6.30m, care încadrează comportarea structurii în zona de siguranță.

Momentul maxim monitorizat (792kNm) înregistrat în etapa VI este mult sub momentul limită, coeficient de siguranță de 3.15, iar pentru momentul încovoietor minim (253kNm) înregistrat în etapa finală coeficientul de siguranță este 9, dovedind o comportare sigură a pereților mulați atât în timpul execuției cât și în viitor în exploatare.

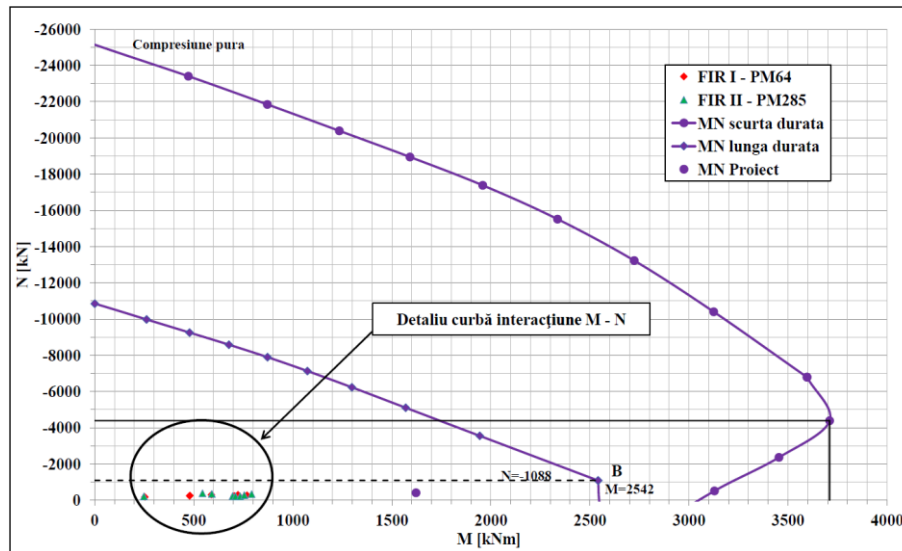


Fig. III.3. Curbe de interacțiune limită M-N pereți mulați

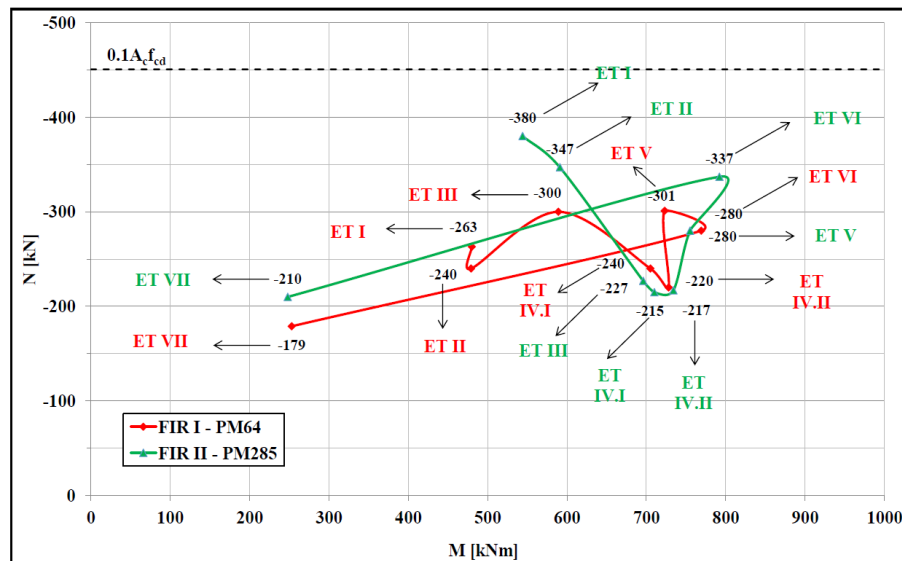


Fig. III.4. Detaliu curbe de interacțiune M-N pereți mulați

Forțele axiale obținute din monitorizare (380 – 179kN) sunt între cele două limite, superioară definită de $0.1A_c f_{cd}$ ($N=450\text{kN}$) și inferioară care definește încovoiera pură ($N=0\text{kN}$), confirmând previziunile privind valorile reduse ale acestora pentru pereții mulați.

Diagramele de evoluție (fig. III.5) ale eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, scot în evidență trei zone comportamentale ale pereților mulați generate de tehnologia de execuție și conlucrarea cu structura interioară: zona 1 cuprinsă între etapele I – IV prezintă momente încovoietoare mai mari pe firul doi față de firul unu datorită excavării diferențiate la suprafață și în interior pe fir unu și fir doi; zona 2 cuprinsă între etapele IV – VI prezintă o uniformizare și o creștere ușoară a eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, datorată conlucrării progresive, în etape, cu structura interioară (radier, picioare drepte); zona 3 cuprinsă între etapele VI – VII prezintă o scădere semnificativă a eforturilor secționale, moment încovoietor și forță axială, datorită executării bolții, a umpluturii parțial și în special a scoaterii șpraițului superior.

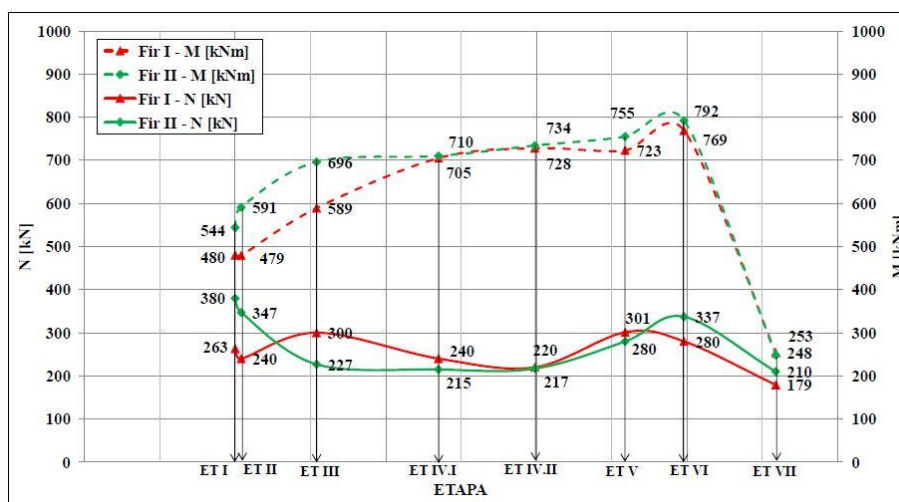


Fig. III.5. Diagrame de evoluție M și N în pereții mulați

C. Diagrame M – (N) – k – nivelul doi de mărci tensometrice

Diagrama M – (N) – k, explicată în detaliu în cap. III, este reprezentarea simplificată a variației rigidității la încovoiere a structurii din beton armat sau rezistența secțiunii transversale la deformare, punând în evidență fazele de comportare (nefisurată, fisurată, plastică) și punctele critice (P1, P2, P3, P4) în diferite faze de încărcare.

Starea de eforturi și deformări determinate pentru structura tunelului studiat, în urma măsurătorilor realizate in situ, justifică realizarea diagramei M – (N) – k la SLS, cu două zone de comportare (nefisurată, fisurată) și două puncte critice (P1, P2), pentru încărcări de scurtă durată și încărcări de lungă durată.

Având în vedere modul de comportare al pereților mulați, caracterizați de încovoiere preponderentă și forțe axiale foarte mici, punctele P1 și P2 au fost definite ca pentru încovoiere pură.

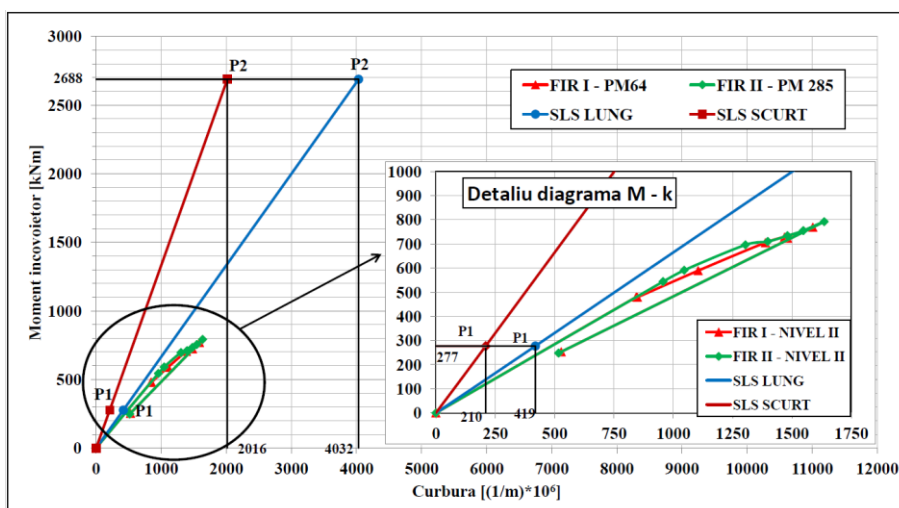


Fig. III.6. Diagrame M – (N) – k în pereții mulați

Din analiza diagramelor realizate, cu evidențierea în detaliu a valorilor M – (N) – k înregistrate în pereții mulați la nivelul doi, în cele 7 etape monitorizate (fig. III.6), rezultă următoarele concluzii: valorile

înregistrate în toate etapele situează comportarea secțiunii analizate în zona fisurată, mult mai apropiat de P1 și foarte departe de P2 ($M_{\max}=792\text{kNm}$, față de $M_e=2688\text{kNm}$), reconfirmând comportarea sigură a structurii; valorile din etapa finală sunt la limita punctului de fisurare marcând o revenire a comportării pereților mulați aproape de starea nefisurată datorită reechilibrării încărcărilor prin contribuția bolții și a umpluturii.

III.3.4.2. Analiză structura definitivă - căpușeală interioară

Eforturile secționale (moment încovoietor – $M[\text{kNm}]$ și forță axială – $N[\text{kN}]$) în toate elementele componente ale căpușelii interioare (radier, picioare drepte, boltă) prezintă o evoluție corespunzătoare solicitărilor specifice din etapele monitorizate.

A. Diagrame de eforturi secționale maxime, moment încovoietor (M) – forță axială (N), comparative monitorizat - proiectat, pentru structura definitivă - căpușeală interioară sunt prezentate în trei etape semnificative IV, VII (cu subetape VII.I și VII.II) și IX în care se înregistrează eforturi secționale semnificative în elementele componente (radier, picioare drepte, boltă).

A.1. Etapa IV de monitorizare cuprinde turnarea radierului, deci primele valori obținute în radier;

Eforturile secționale (M și N) prezintă valori diferite față de cele din proiect datorită modului de punere în operă a radierului boltă întoarsă, cu realizarea și a betonului de umplură de 1.00m grosime în ax, conducând la o comportare diferită a noii structuri compuse, care se va resimți și în celelalte etape de monitorizare.

A.2. Etapa VII de monitorizare cu subetapa VII.I - monitorizarea cuprinde executarea bolții și umplerea parțială sub șpraițul superior - SP I, deci primele valori obținute în boltă și subetapa VII.II - monitorizarea cuprinde scoaterea șpraițului superior - SP I.

Eforturile secționale (M și N) prezintă valori diferite față de cele din proiect datorită: neconsiderării efectului curgerii lente și a influenței umpluturii din spatele picioarelor drepte în proiect; schimbarea tehnologiei de execuție, prin realizarea radierului boltă întoarsă cu umplură și realizarea picioarelor drepte și boltă în două etape.

A.3. Etapa IX de monitorizare cuprinde faza de execuție când terenul de deasupra tunelului este adus aproximativ la starea inițială și pot fi analizate eforturile secționale (moment încovoietor și forță axială) monitorizate comparativ cu cele proiectate - fig. III.7.

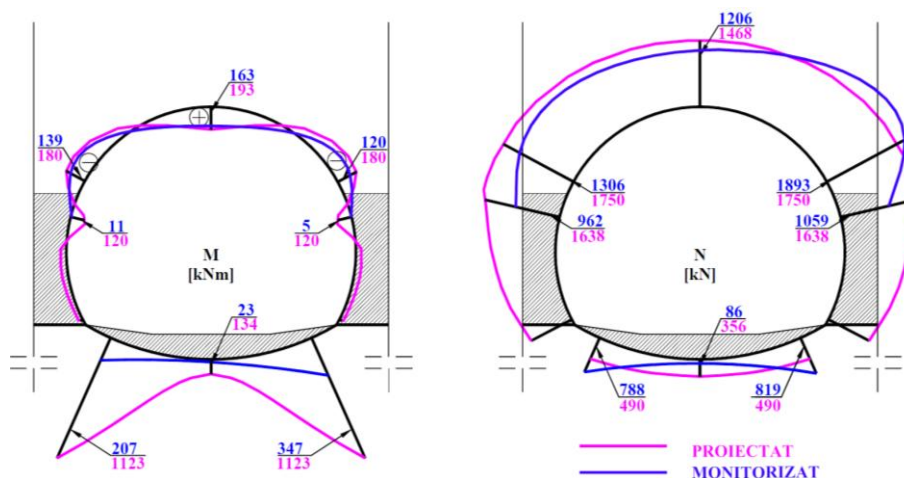


Fig. III.7. Diagrame comparative moment încovoietor (M) și forță axială (N) (proiectat – monitorizat) în căpușeală etapa IX

Diagramele de evoluție (fig. III.8) ale eforturilor secționale (moment încovoietor și forță axială) în radier scot în evidență trei zone comportamentale generate de fazele de execuție și conlucrarea cu structura

exterioară: zona 1 cuprinsă între etapele IV (realizare radier) și V (scoatere șpraiț inferior) prezintă creșteri foarte mari pentru forțele axiale și mari pentru momentele încovoietoare pe părțile laterale datorită preluării împingerii date de pereții mulați doar de radier; zona 2 cuprinsă între etapele V – VII (subetapa VII.I) prezintă o creștere mai mică a eforturilor secționale cu o valoare mai pronunțată pentru firul doi datorită prezenței șpraițului superior, picioarelor drepte și a bolții care preiau din împingerea pereților mulați; zona 3 cuprinsă între etapele VII (subetapa VII.I) – IX prezintă o scădere semnificativă a forțelor axiale, mai pronunțată pentru firul doi cu o scădere a momentului încovoietor pe firul doi și creșteri pe firul unu, datorită executării bolții și a umpluturii parțial până sub primul șpraiț, urmată de o uniformizare a eforturilor secționale cu creșteri ușoare până în etapa finală.

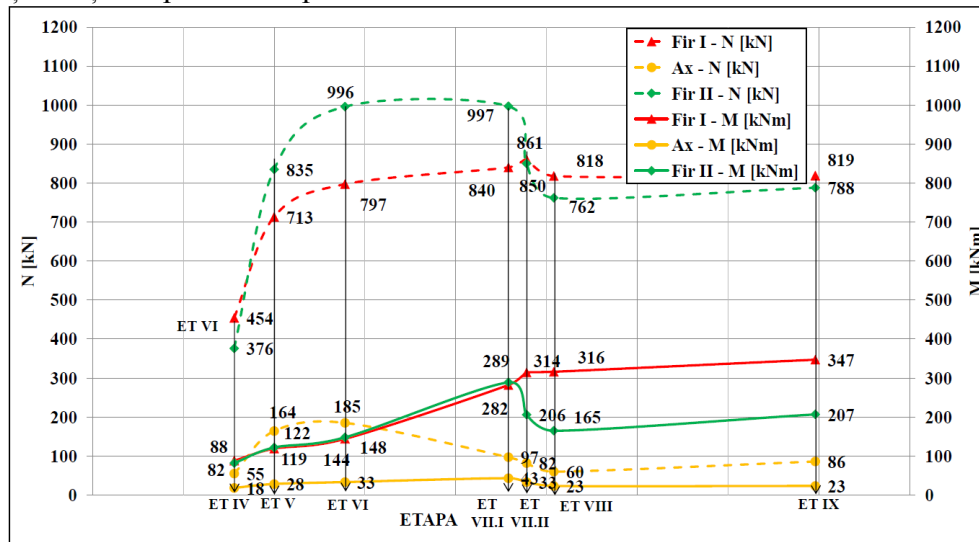


Fig. III.8. Diagramă de evoluție moment încovoietor (M) și forță axială (N) radier

Diagramele de evoluție (fig. III.9) ale eforturilor secționale (moment încovoietor și forță axială) în boltă scot în evidență două zone comportamentale generate de fazele de execuție și conlucrarea cu structura exterioară: zona 1 cuprinsă între etapele VII (subetapele VII.I - realizare boltă și subetapa VII.II - scoatere șpraiț superior) și etapa VIII (realizare parțială umplutură) prezintă creșteri mari pentru forțele axiale și momentul încovoietor de la cheie și creșteri mici pentru momentele încovoietoare de la nașteri, datorită preluării împingerii date de pereții mulați în special de boltă care se deformează spre interior la nașteri și spre exterior la cheie;

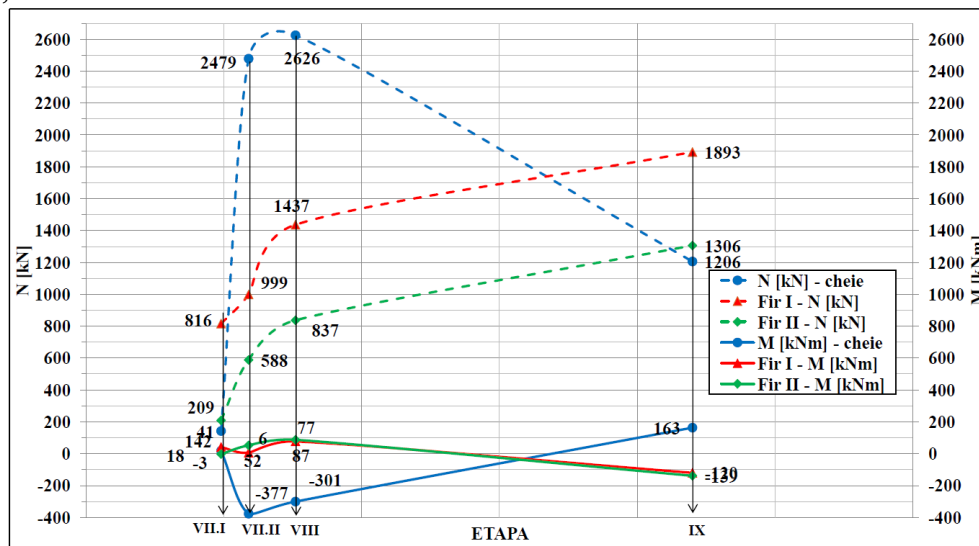


Fig. III.9. Diagramă de evoluție moment încovoietor (M) și forță axială (N) boltă

Și zona 2 cuprinsă între etapele VIII (realizarea umpluturii până la grinda de coronament) și etapa IX (realizare umplutură finală) prezintă creșteri pentru forțele axiale de la nașteri și scădere pentru cheie cu schimbări de semn pentru momentele încovoietoare datorită preluării încărcării date de umplutură către boltă care se deformează spre exterior la nașteri și spre interior la cheie, rezultând astfel eforturile secționale în faza finală.

B. Curbe de interacțiune M – N în secțiunea de la cheie

Pentru structura interioară a fost aleasă secțiunea de la cheie pentru reprezentarea curbelor de interacțiune M – N, deoarece este secțiunea cu eforturile unitare cele mai mari.

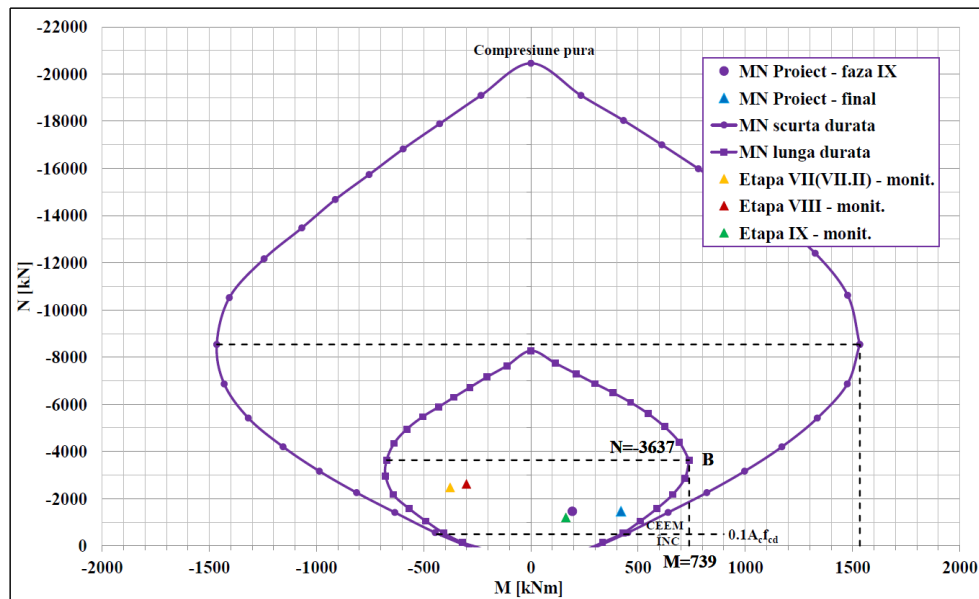


Fig. III.10. Diagramă M - N cheie

În fig. III.10 este prezentată curba de interacțiune M - N limită pentru acțiuni de scurtă durată corespunzătoare proiectului și pentru acțiuni de lungă durată, corespunzătoare monitorizării și valorile M - N obținute în etapele monitorizate și proiect (etapa IX și etapa finală cu aplicarea presiunii de umflare).

Eforturile secționale (moment încovoietor și forță axială) monitorizate și proiectate din secțiunea de la cheie se încadrează, după modul de cedare, în zona comportamentală compresie excentrică cu excentricitate mare ($CEEM^{[45]}$), caracterizată de încovoiere preponderentă cu axa neutră în secțiune și forțe axiale importante.

Forțele axiale obținute din monitorizare (2479 – 1206kN) și cele din proiect sunt între cele două limite, superioară definită de forța axială limită de balans ($N=3637kN$) și inferioară definită de $0.1A_c f_{cd}$ ($N=510kN$).

Caracteristic pentru secțiunea de la cheie în cele două etape monitorizate - VII (subetapa VII.II) și IX și proiect este excentricitatea, $e_o=M/N$, mică, (0.15m pentru subetapa VII.II, 0.135m pentru etapa IX și 0.13m pentru proiect, mai mici decât $0.3h_o=0.166m$), sub excentricitatea de cedare de 0.44m, care încadrează comportarea structurii în zona de siguranță.

Momentul din etapa VII (subetapa VII.II) monitorizat (377kNm) conduce la un coeficient de siguranță 1.72 care este în limitele admisibile, iar etapa este una tranzitorie.

Momentul din etapa IX (etapa finală) monitorizat (163kNm) conduce la un coeficient de siguranță 3.25, similar cu cel proiectat în aceeași fază și mai mare decât cel corespunzător fazei finale de proiectare ($M=420\text{kNm}$) care este în limitele admisibile de 1.55.

C. Diagrame M – (N) - k – în secțiunea de la cheie

În realizarea diagramei M – (N) – k pentru secțiunea de la cheie este deosebit de importantă considerarea forței axiale, deoarece aceasta este solicitarea dominantă. Pentru prezentarea valorilor monitorizate din etapele VII (subetapa VII.II) și VIII s-au reprezentat momentele încovoietoare la fel întrucât secțiunea este simetrică și armată simetric.

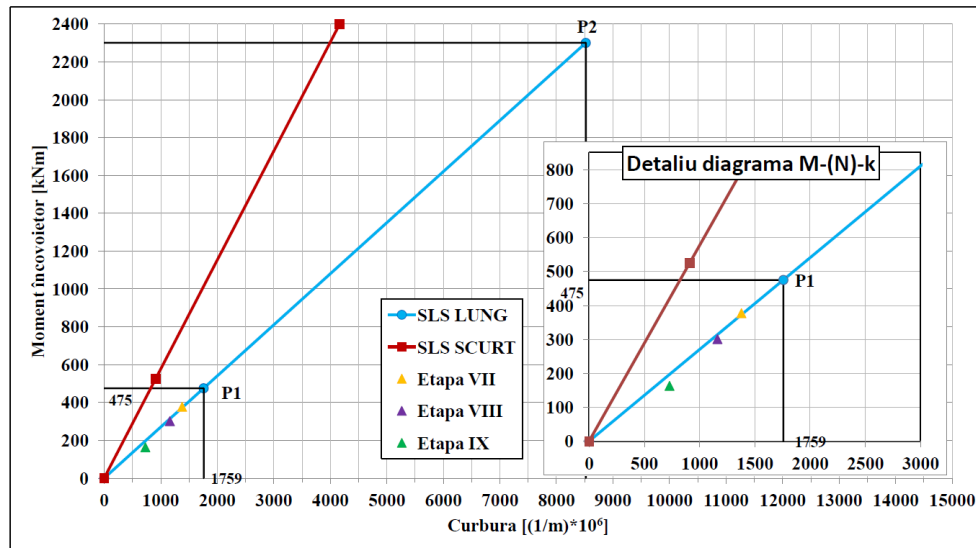


Fig. III.11. Diagramă M – (N) – k cheie

Din analiza diagramei M – (N) – k realizate, cu evidențierea în detaliu a valorilor M – (N) – k înregistrate la cheie, în cele 3 etape monitorizate (fig. III.11), rezultă următoarele concluzii: valoarea înregistrată în etapa finală situează comportarea secțiunii analizate în zona nefisurată (stadiul I și domeniul elastic) dovedind o comportare foarte bună a căptușelii interioare; căptușeala interioară prezintă rezerve de rigiditate și siguranță pentru a prelua în exploatare și presiunea de umflare.

III.3.5. Concluzii

Tunelul Turdaș constituie primul tunel de la noi realizat integral de la suprafață cu o structură compusă (structură provizorie – pereți mulați și structură definitivă – căptușeală interioară), la care proiectarea, execuția și monitorizarea au fost în totalitate românești.

Realizarea monitorizării tunelului Turdaș a parcurs următoarele etape:

- ❖ Prevederea aparaturii (înclinometre, mărci tensometrice, celule de presiune) necesare urmăririi comportării și conlucrării celor două structuri în timpul execuției și comportării structurii definitive în exploatare.
- ❖ Amplasarea mărcilor tensometrice în zonele cele mai solicitate (momente încovoietoare maxime), câte două în secțiune în pereții mulați și câte două sau trei în căptușeala interioară, pentru a surprinde starea de deformații și eforturi în cele mai importante etape ale execuției.
- ❖ Determinarea pe baza măsurătorilor realizate a deplasărilor în pereții mulați, eforturilor secționale (moment încovoietor și forță axială) în pereții mulați și căptușeala interioară și forțelor în șpraițuri și

realizarea de diagrame în toate etapele de execuție, cu evidențierea evoluției și a conlucrării celor două structuri.

❖ Interpretarea rezultatelor monitorizării, pentru cele două componente ale structurii analizate, prin realizarea unor diagrame reprezentative și analize corespunzătoare: diagrame înfășurătoare de eforturi secționale, moment încovoietor maxim – forță axială corespunzătoare (cu eforturi în șpraițuri și deplasări maxime pentru pereții mulați), comparative monitorizat - proiectat; curbe de interacțiune limită $M - N$ în secțiunile cele mai solicitate (nivelul doi de mărci tensometrice pentru pereții mulați și cheie pentru căptușeala interioară); diagrame $M - (N) - k$ în secțiunile cele mai solicitate; diagrame de evoluție a eforturilor secționale în pereții mulați, radier și boltă).

Analiza rezultatelor monitorizării a permis evaluarea în premieră a comportării unei astfel de structuri compuse, a comportării și conlucrării celor două structuri componente (pereți mulați și căptușeală interioară), constatarea unor diferențe cu proiectul sau a unor lipsuri și formularea unor recomandări.

Din interpretarea rezultatelor monitorizării rezultă că tipul de solicitare la care sunt supuse cele două structuri componente este încovoiere cu forță axială cu diferențe date de trăsăturile specifice de alcătuire, realizare și conlucrare dintre ele.

Modul de comportare al pereților mulați este încovoiere preponderentă cu axa neutră în secțiune și forțe axiale foarte mici, cu încadrare în zona fisurată în timpul execuției și revenire în zona elastică în exploatare.

Modul de comportare al căptușelii interioare este, după modul de cedare, compresiune excentrică cu excentricitate mare ($CEEM^{[45]}$), caracterizată de încovoiere preponderentă cu axa neutră în secțiune și forțe axiale importante, cu încadrare în zona nefisurată în timpul execuției și în exploatare.

Pe parcursul execuției anumite adaptări tehnologice au influențat comportarea și starea de eforturi în unele elemente:

1. Excavarea diferită în exterior și interior a condus la deplasări și eforturi secționale diferite în pereții mulați, fir unu și fir doi;
2. Realizarea concomitentă a radierului boltă întoarsă și a umpluturii de deasupra a influențat comportarea și eforturile secționale în radier;
3. Realizarea în etape diferite a picioarelor drepte și a bolții a condus la eforturi secționale diferite între proiect și monitorizare în special la nașterea bolții.

Utilizarea a două mărci tensometrice în secțiune la pereții mulați a creat dificultăți la determinarea eforturilor secționale, în special a forțelor axiale, conducând la concluzia utilizării a trei mărci în secțiune, măsură utilizată cu succes la căptușeala interioară.

Compararea rezultatelor monitorizării (deplasări, eforturi secționale, moment încovoietor și forță axială) cu cele din proiect a evidențiat diferențe importante pentru toate elementele monitorizate, cauzate de neconsiderarea efectului curgerii lente și a influenței umpluturii din spatele picioarelor drepte, modului de punere în operă a radierului și parametrilor de proiectare sau modelării cu element finit, ceea ce impune realizarea unei calibrări a modelului de calcul și a parametrilor de proiectare.

Comportamentul general al structurii studiate poate fi caracterizat ca fiind bun, cu o conlucrare bună între cele două structuri componente și valori ale eforturilor secționale în limitele admisibile, deci acest tip de structură poate fi recomandat pentru condiții similare, oferind siguranță pe parcursul execuției, simplitate în cazul punerii în operă și predictibilitate.

CAPITOLUL IV. CALIBRAREA MODELELOR PE BAZA REZULTATELOR MONITORIZĂRII

IV.1. Introducere

Realizarea monitorizării unei lucrări de tunel este necesară și obligatorie, aceasta conducând la siguranță pe parcursul execuției și ulterior în exploatare, dar și la asigurarea unui nou set de date care permite studiul și dezvoltarea de noi metode de proiectare, execuție, investigare și cercetare.

Setul de date rezultate din acțiunea de monitorizare trebuie prelucrat și comparat cu datele considerate la proiectare, putând indica necesitatea realizării unor noi modele de calcul și calibrarea modelului de calcul realizat în faza de proiectare.

Etapele premergătoare proiectării unui tunel cuprind în primul rând informații asupra terenului străbătut, obținute în cadrul unui studiu geologic și geotehnic și materializate în profilul longitudinal geologic.

Pe parcursul execuției se realizează cartarea terenului real întâlnit, deci și actualizarea profilului longitudinal geologic care poate aduce o serie de informații noi, astfel fiind necesară adaptarea modelului de calcul la noile informații, acesta fiind și cazul de față. În funcție de tipul de teren întâlnit, de utilajele utilizate și disponibile pe parcursul execuției pot apărea adaptări ale tehnologiei de execuție care conduc la necesitatea actualizării modelului de calcul.

Toate aceste informații coroborate cu datele obținute cu ajutorul monitorizării conduc la necesitatea realizării unor noi modele de calcul structural care confirmă și valorifică rezultatele monitorizării și pot oferi o nouă perspectivă asupra structurii studiate.

Adaptarea tehnologiei de execuție la condițiile de teren și la disponibilitatea utilajelor utilizate pentru punerea în operă conduce la modificări din punct de vedere al eforturilor unitare și eforturi secționale (moment încovoietor și forță axială), deci necesitatea de a calibra modelul de calcul utilizat cu noile condiții dezvoltate in situ, cât și cu rezultatele obținute pe parcursul execuției.

Pentru calibrarea modelului de calcul cu element finit s-au realizat o serie de îmbunătățiri pe baza experienței proprii, a experienței altor utilizatori ai programului cu element finit Plaxis prin intermediul lucrărilor scrise și pe baza datelor obținute din teren. Au rezultat o serie de modele de calcul cu element finit dintre care vor fi prezentate cele mai reprezentative.

Limitările programelor cu element finit pot fi depășite sau pot fi luate considerare în evaluarea eforturilor dacă sunt cunoscute și studiate suficient, iar pentru programul utilizat s-au observat o serie de probleme care au fost descrise într-un articol publicat în anul 2014. Câteva aspecte semnalate în cadrul articolului tratează: legea de comportare a pământului Mohr – Coulomb; legea de comportare a pământului Hardening Soil; comportamentul pământului în funcție de fazele excavației; greutatea unui element de tip placă (*plate*).^[46]

Adoptarea unui model cu element finit pentru un tunel executat de la suprafață este o provocare având în vedere gradul de aproximare al datelor introduse, începând cu incertitudinile studiului geologic, prin numărul și poziția forajelor, până la cele ale parametrilor necesari în realizarea modelului cu element finit, dar și acceptarea simplificărilor utilizate pentru realizarea modelului de calcul.

Cu cât modelul de calcul este mai complicat cu atât gradul de aproximare este mai mare datorită numărului de parametri implicați în calcul, astfel pe cât de util și ușor este de introdus date într-un astfel de program pe atât de complex și vast este modul de analizare a datelor emise.

În cazul tunelului studiat, tunel Turdaș, s-a păstrat modelul de calcul inițial, dar au fost necesare o serie de modificări, care reflectă adaptările in situ, care vor fi detaliate pentru fiecare model de calcul realizat în cele ce urmează.

IV.2. Analiza numerică ținând cont de situația reală

Calibrarea modelului^[47] de calcul inițial este un proces complex prin care se dorește înglobarea tuturor modificărilor și adaptărilor survenite în timpul execuției cu scopul de a ne apropia de rezultate obținute prin măsurătorile in situ.

Calibrarea modelului de calcul inițial pe baza datelor obținute in situ, prin monitorizare, se realizează prin: identificarea tuturor datelor de calcul care au suferit modificări față de modelul inițial (schimbări tehnologice, stratificație, parametrii materiale) și a unor deficiențe ale programului de calcul utilizat sau a unor legi de comportare utilizate; realizarea unor modele de calcul noi cu introducerea modificărilor și verificarea influenței acestora, eliminarea deficiențelor, testarea unor legi de comportare noi și compararea cu rezultatele monitorizării.

În cele ce urmează sunt prezentate modelele care au oferit rezultatele cele mai apropiate și care au surprins parametrii care conduc la modificările semnificative ale valorilor eforturilor secționale (M și N) și ale deplasărilor, numărul total de modele realizate fiind foarte mare.

IV.2.1. Modelul I

Realizarea calibrării modelului de calcul inițial s-a efectuat urmărind modificările tehnologice (modelul IA) și ulterior, s-a continuat prin aplicarea modulului de elasticitate efectiv al betonului (model IB).

IV.2.1.1. Modelul IA

Calibrarea modelului de calcul inițial, prezentat în capitolul II, pe baza execuției realizate implică: utilizarea stratificație reale; utilizarea tehnologiei de execuție adaptate (cnf. cap. III.3); realizarea căptușelii interioare în două etape – picior drept și boltă, în loc de o singură etapă; introducerea unui element care să simuleze turnarea betonului de umplură din radierul boltă întoarsă; eliminarea coeficientului de siguranță aplicat modulului de elasticitate al pământului (cnf cap. II).

În proiectul inițial radierul boltă întoarsă a fost modelat cu un element de tip *plate* curb de grosime constantă. Prin turnarea betonului de umplură a rezultat o structură de grosime variabilă. Lipsa posibilității utilizării unui element de grosime variabilă în cadrul programului cu element finit utilizat este una dintre deficiențele acestuia. Pentru simularea influenței betonului de umplură s-a utilizat un element de tip *plate* de grosime constantă.

Analiza numerică realizată în cadrul modelului IA este sintetizată cu ajutorul diagramelor comparative pentru etapa IX – realizarea umpluturii deasupra tunelului până la cota inițială.

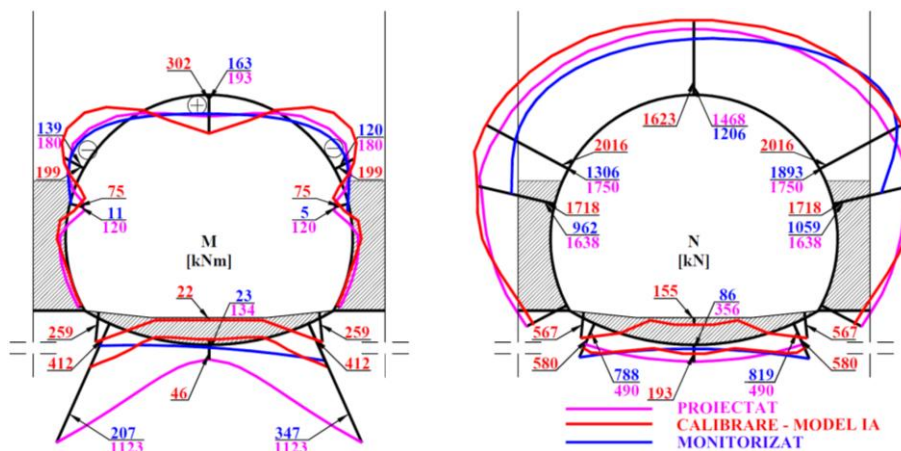


Fig. IV.1. Diagrame comparative moment încovoietor și forță axială – etapa IX căptușeală interioară: proiectat – monitorizat – model IA

Modelul IA prezintă valori mai mari ale eforturilor secționale în zona boltii față de valorile proiectate și monitorizate datorită modificării tehnologiei de execuție, prin turnarea în două etape a căptușelii interioare, în loc de una, definită în faza de proiectare.

În cazul radierului boltă întoarsă, introducerea elementului de grosime constantă care să simuleze efectele turnării betonului de umplutură odată cu radierul boltă întoarsă, conduce la reducerea momentelor încovoietoare față de proiect și apropierea față de cele monitorizate și creșterea forței axiale față de proiect și apropierea față de cele monitorizate.

Adaptările tehnologice utilizate în cadrul modelului realizat conduc la creșteri ale eforturilor secționale în boltă și picioare drepte față de monitorizare și apropiere în radier, datorită modelului adoptat pentru simularea betonului de umplutură.

IV.2.1.2. Modelul IB

Completarea modelului IA constă în aplicarea modului de elasticitate efectiv al betonului și analiza numerică realizată în cadrul modelului IB este sintetizată cu ajutorul diagramelor comparative realizate în cele ce urmează pentru:

a. Structura provizorie – pereții mulați s-au trasat diagrame înfășurătoare de deplasare, moment încovoietor, forță axială corespunzătoare și valorile eforturilor maxime din șpraițuri care sunt comparate cu rezultatele monitorizării in situ (cnf. cap. III) și cele proiectate (cnf. cap. II).

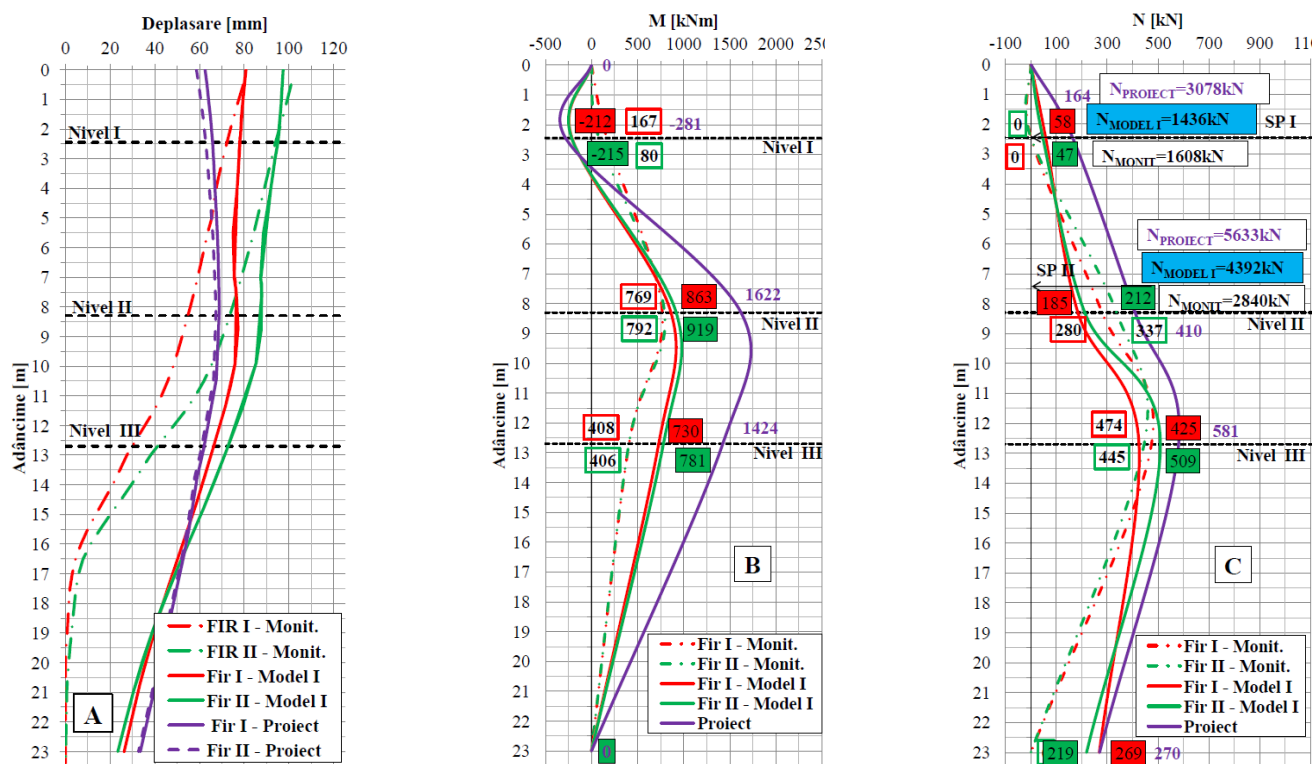


Fig. IV.2. Înfășurători comparative pereți mulați: proiectat – monitorizat – model I pentru: A- deplasare, B - moment încovoietor, C - forță axială

Rezultatele obținute în cadrul modelului IB de calcul indică un comportament comparativ cu datele obținute la monitorizare, dar se impune continuarea calibrării prin realizarea unui nou model de calcul – modelul numărul II, în care se vor ajusta parametrii terenului.

b. Structura definitivă – căptușeala interioară este necesară prezentarea etapei IX – realizarea umpluturii deasupra tunelului până la cota inițială

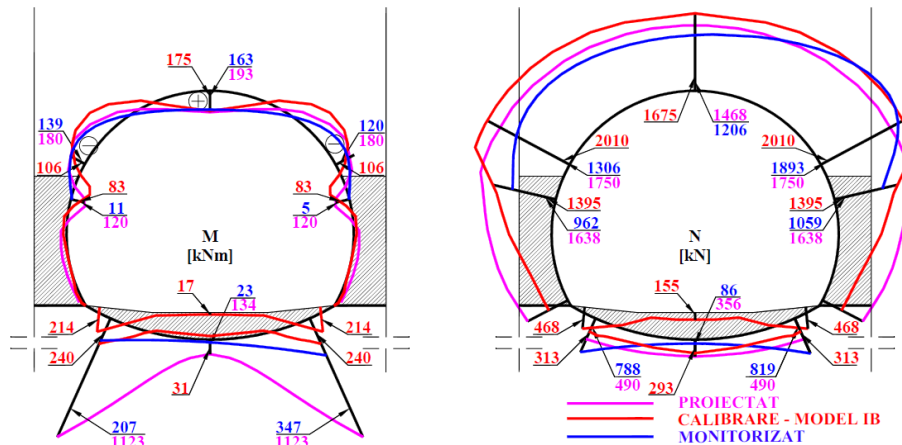


Fig. IV.3. Diagrame comparative moment încovoietor și forță axială – etapa IX căptușeală interioară: proiectat – monitorizat – model IB

În cadrul modelului IB se poate observa reducerea semnificativă a valorii momentului încovoietor față de valorile determinate în cadrul proiectării, astfel putem concluziona că unul dintre cei mai importanți parametri care afectează valoarea eforturilor secționale este modulul de elasticitate al betonului considerat.

Aplicarea modificărilor survenite în cadrul modelului I (IA – modificări tehnologice și IB – aplicarea modulului de elasticitate al betonului redus) au condus la eforturi secționale mai apropiate de monitorizare cu diferențe încă importante care justifică continuarea calibrării.

IV.2.2. Modelul II

Una dintre problemele semnalate de-a lungul timpului în utilizarea programelor cu element finit și a legii de comportare Mohr-Coulomb este supraestimarea deplasărilor și totodată și a eforturilor secționale (moment încovoietor și forță axială). [46] [49], [50]

Ținând cont de faptul că structura provizorie trece prin diferite etape de comportare se recomandă realizarea unor modele de calcul în care terenul din zona excavației poate fi luat în considerare cu un modul de elasticitate amplificat, cu un coeficient de multiplicare recomandat cuprins între 2 și 5. [46]

În acest model am aplicat coeficientul de multiplicare doi pentru stratul de bază – marnă.

Rezultatele obținute în cadrul modelului de calcul cu element finit numărul doi sunt prezentate în cele ce urmează pentru:

a. Structura definitivă – căptușeala interioară cu prezentarea comparativă a etapei IX – realizarea umpluturii deasupra tunelului până la cota inițială:

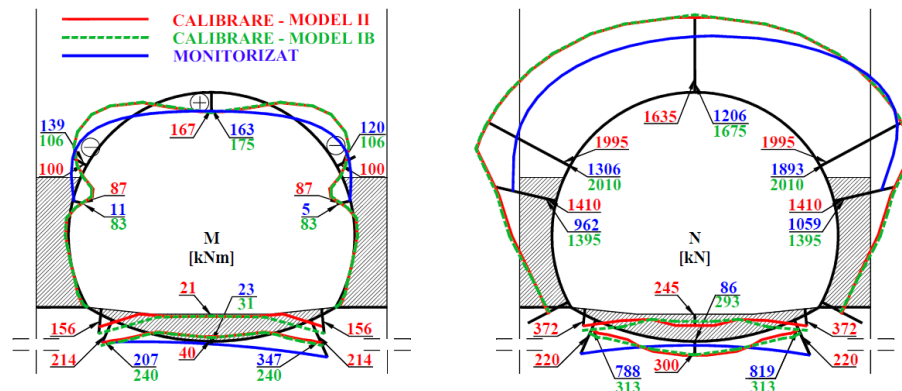


Fig. IV.4. Diagrame comparative moment încovoietor și forță axială – etapa IX căptușeală interioară: proiectat – monitorizat – model II

Utilizarea modulului de elasticitate al pământului mărit în modelul doi a condus la valori ale eforturilor secționale mai mici față de modelul anterior și mai apropiate de monitorizare, care se poate constitui într-o opțiune finală.

b. Structura provizorie – pereții mulați - s-au realizat diagrame înfășurătoare de deplasare, moment încovoietor, forță axială și eforturile din șpraițuri prezentate comparativ cu valorile monitorizate

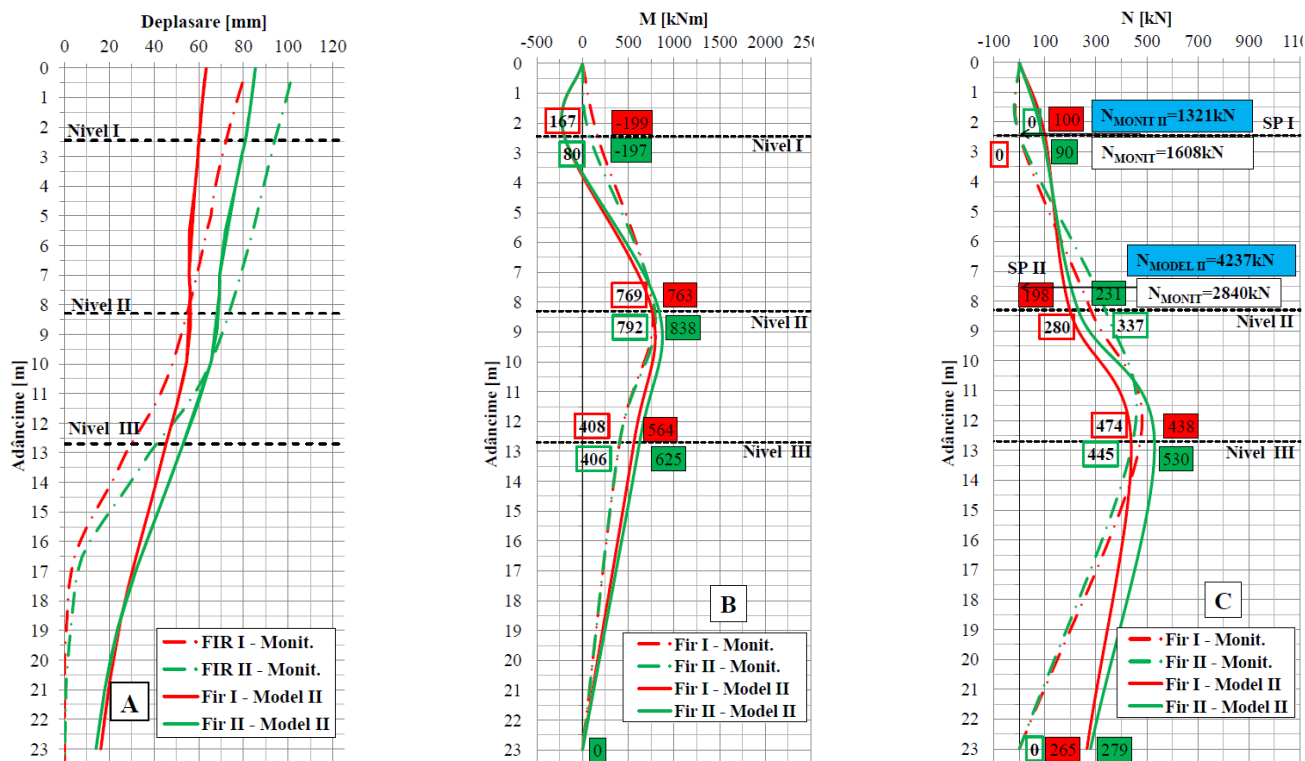


Fig. IV.5. Înfășurători comparative pereți mulați: monitorizat – model II: A- deplasare, B - moment încovoietor, C - forță axială

Comparația dintre valorile monitorizate și valorile rezultate din modelul doi ne conduc la necesitatea realizării următorului model de calcul cu adoptarea legii de comportare a pământului Hardening Soil.

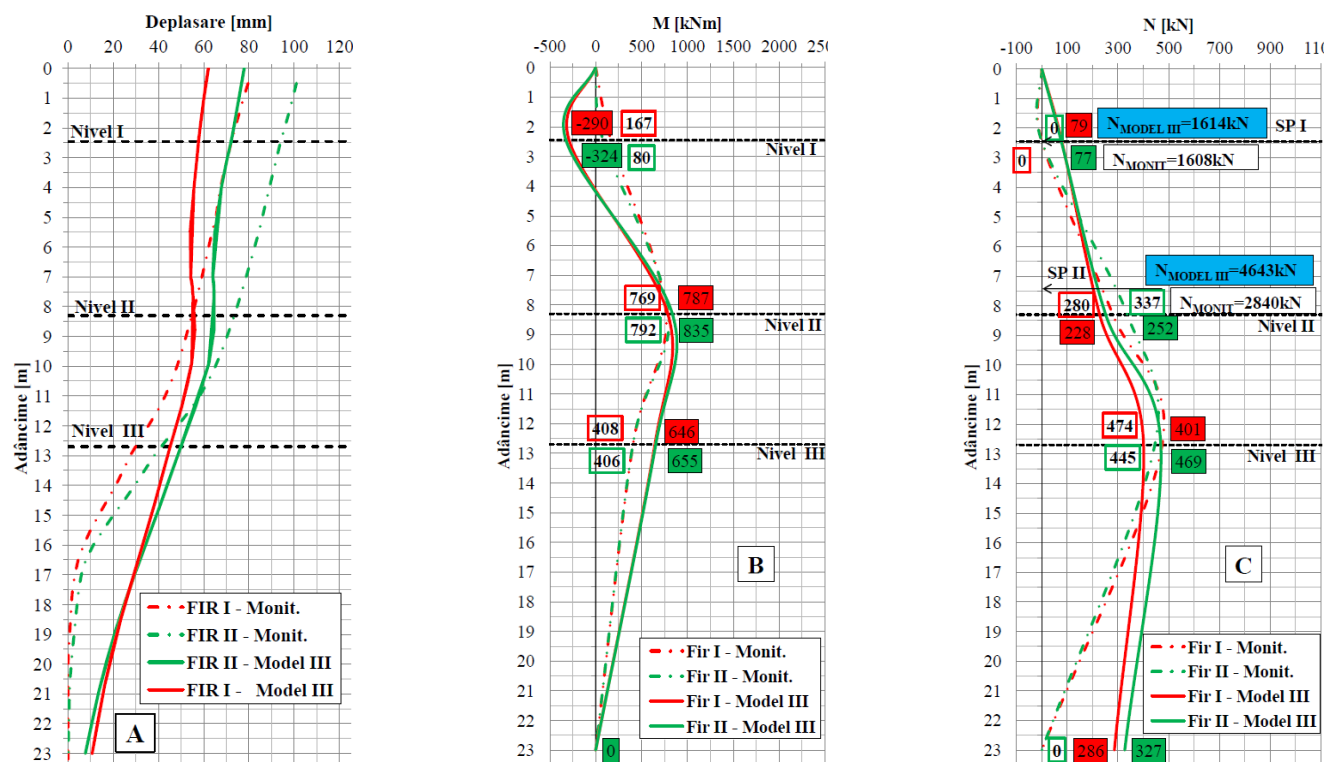
IV.2.3. Modelul III

Utilizarea unui coeficient de multiplicare al modulului de elasticitate al pământului utilizat în cadrul modelului de calcul numărul doi se poate considera un artificiu de modelare, acesta fiind recomandat în cadrul bibliografiei studiate.^[46]

Introducerea legii de comportare a pământului Hardening Soil a apărut ca o necesitate pentru simularea cât mai fidelă a comportării pământului, având în vedere caracterul nelinier al acestuia și multitudinea de etape (cicluri încărcare - descărcare) parcurse în cadrul unei lucrări de excavație.

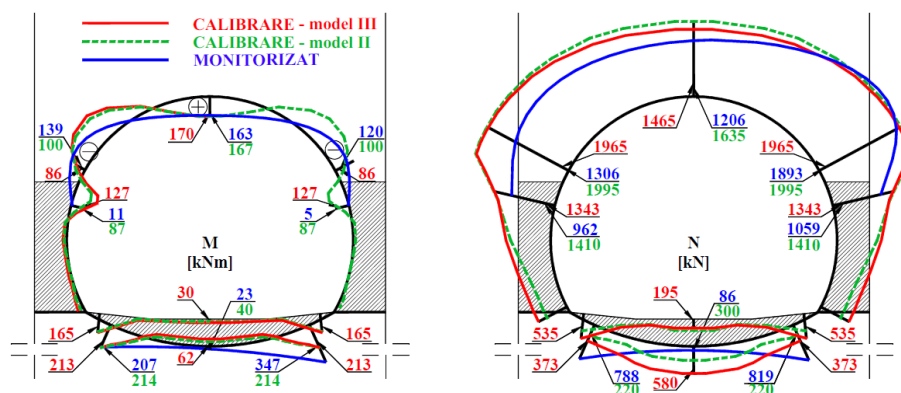
Valorile determinate în cadrul modelului III sunt prezentate comparativ cu monitorizarea pentru:

a. Structura provizorie – pereții mulați cu ajutorul diagramei înfășurătoare de deplasare, moment încovoietor, forță axială corespunzătoare și valorile eforturilor în șpraițuri în fig. IV.7



Comparând valorile obținute în modelul trei și monitorizare se constată o apropiere satisfăcătoare, astfel se poate trage concluzia că legea de comportare a pământului Hardening Soil oferă rezultate mai bune față de legea de comportare a pământului Mohr – Coulomb și adaptările aplicate modelului de calcul inițial alături de ajustarea parametrilor utilizați conduc la un rezultat al calibrării bun, luând în considerare deficiențele și limitările programului utilizat și studiat în cazul pereților mulați.

b. Structura definitivă – căptușeala interioară cu prezentarea comparativă a etapei IX – realizarea umpluturii deasupra tunelului până la cota inițială:



Legea de comportare a pământului Hardening Soil conduce la valori în general mai mari față de modelul anterior, deci o îndepărtare față de valorile monitorizate, dar rezultatele se încadrează în limite comparabile pentru toate secțiunile monitorizate.

Acțiunea de calibrare poate fi continuată și aprofundată cu analiza influenței unor parametrii individuali.

Studiile realizate conduc la necesitatea utilizării unor legi de comportare mai apropiate de comportarea reală a terenului străbătut de tunel, care să fie testate și validate prin acțiuni de monitorizare.

IV.3. Concluzii

Realizarea calibrării modelului de calcul este o acțiune necesară care susținută de măsurători realizate in situ poate conduce la rezultate ce pot fi valorificate în timpul execuției, în exploatare sau pentru viitoarele proiecte.

Utilitatea și necesitatea acestui demers este confirmată de rezultatele obținute cu ajutorul modelelor de calcul cu element finit.

Considerarea modulului de elasticitate efectiv al betonului este unul dintre cei mai importanți parametri care influențează eforturile secționale, moment încovoietor și forță axială.

Se poate observa încă din primul model de calcul realizat reducerea eforturilor secționale din radier până la valori comparative cu valorile înregistrate în cadrul monitorizării, prin aplicarea modulului de elasticitate efectiv al betonului.

De asemenea, legea de comportare și modulul de elasticitate al pământului sunt elemente esențiale în obținerea unor rezultate ale modelării cât mai apropiate de măsurătorile in situ.

Tehnologia de execuție este un factor determinat și adaptarea la posibilitățile și necesitățile utilajelor disponibile trebuie însoțită de noi modele de calcul care să simuleze noua tehnologie.

Unul dintre cei mai importanți factori în realizarea calibrării este programul cu element finit utilizat care conține o serie de deficiențe cum ar fi:

- imposibilitatea realizării unei secțiuni variabile;
- subestimarea efortului secțional forță axială în cazul unui perete excavat pe o parte;
- legea de comportare a pământului poate conduce la supraestimarea deplasărilor;
- lipsa cunoașterii și a experienței în utilizarea programului poate conduce la rezultate nerealiste.

CAPITOLUL V. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

V.1. Concluzii

Realizarea prezentei teze de doctorat a apărut ca o necesitate în urma lipsei de date și a cunoștințelor limitate în ceea ce privește comportamentul acestui tip de structură, care deși nu este nou, după cum se poate vedea în capitolul I, nu a fost suficient studiat.

Ținând cont de numărul considerabil de lucrări în perspectivă ce urmează să înceapă sau deja au început în România, această lucrare aduce o contribuție însemnată la determinarea comportamentului unui tunel executat de la suprafață, în săpătură complet deschisă cu o structură compusă.

Modelul unidimensional se poate utiliza în cazul unor calcule preliminare, simpliste, calculul realizat neputând urmări fazele de execuție in situ sau implicând un volum de muncă foarte mare cu un grad de aproximare pe măsură, conducând la valori ale eforturilor acoperitoare.

Metoda elementelor finite oferă posibilitatea realizării unui calcul pe faze de execuție, care ține cont de eforturile apărute pe parcurs având avantajul rapidității și odată cu studierea suficientă a comportamentului structurii posibilitatea de calibrare a modelului.

Monitorizarea tunelelor executate de la suprafață oferă date concrete privind comportarea structurilor specifice pe baza cărora pot fi realizate calibrări ale modelelor inițiale, contribuind astfel la optimizarea proiectării.

Datele obținute cu ajutorul aparatelor de monitorizare in situ pe parcursul execuției, comparate cu valorile proiectate prezintă următoarele particularități:

- ✓ Realizarea radierului boltă întoarsă împreună cu betonul de umplutură conduce la o mai bună preluare a forței axiale rezultată din împingerea pereților mulați;
- ✓ Fragmentarea execuției căptușelii interioare în picioare drepte și boltă determină momente încovoietoare mari în boltă și picioarele drepte;
- ✓ Necesitatea utilizării a trei aparate în secțiune.

Calibrarea modelelor pe baza rezultatelor monitorizării constituie o operațiune utilă și necesară cu rezultate benefice asupra eficienței proiectării, sporind considerabil credibilitatea și eficacitatea acestora și înțelegerea comportării unei astfel de structuri de către proiectantul obișnuit.

V.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale în cadrul lucrării de doctorat sunt:

- ✓ Prezentarea comparativă a metodelor de execuție și a soluțiilor constructive utilizate în concepția și realizarea tunelurilor de la suprafață și evidențierea trăsăturilor specifice;
- ✓ Prezentarea principalelor construcții subterane și tuneluri executate de la suprafață realizate, în curs de realizare cât și cele aflate în perspectivă;
- ✓ Studiul metodelor de calcul utilizate la proiectarea tunelurilor executate de la suprafață, realizarea unei clasificări și analiza trăsăturilor specifice a acestora;
- ✓ Realizarea unei analize structurale pentru structura provizorie (pereți mulați), utilizând metoda resoartelor cu evidențierea avantajelor și limitelor acestei metode;
- ✓ Realizarea unei analize structurale complete pe faze de execuție, pentru un caz concret (Tunel Turdaș - alcătuit din structură provizorie formată din pereți mulați sprijiniți cu șpraițuri și structură definitivă formată din radier boltă întoarsă, picioare drepte și boltă), utilizând metoda elementelor finite și programul Plaxis 3D Tunnel;
- ✓ Studiarea metodelor și aparaturii utilizate la monitorizarea tunelelor executate de la suprafață și a metodelor de interpretare și determinare a eforturilor secționale și a deplasărilor;
- ✓ Realizarea monitorizării tunelului Turdaș în două stații reprezentative, pentru urmărirea comportării în toate etapele de execuție, cu determinarea eforturilor secționale (moment încovoietor și forță axială) în fiecare secțiune monitorizată (3 în pereții mulați, 3 în radier, 2 în picioare drepte și 3 în boltă) cu mărci tensometrice, a deplasărilor în pereții mulați cu înclinometre și a eforturilor în cele 2 șpraițuri;
- ✓ Realizarea unor diagrame înfășurătoare (deplasări, moment încovoietor și forță axială) comparative (proiectat – monitorizat) și a unor diagrame de interacțiune M-N și M-(N)-k pentru elementele structurale ale tunelului (pereți mulați, căptușeală interioară) și stabilirea unor concluzii privind comportarea structurilor analizate;
- ✓ Analiza rezultatelor monitorizării și evaluarea în premieră a comportării unei astfel de structuri compuse, a comportării și conlucrării celor două structuri componente (pereți mulați și căptușeală interioară), constatarea unor diferențe cu proiectul sau a unor lipsuri și formularea unor recomandări;
- ✓ Realizarea calibrării modelului de calcul proiectat pe baza monitorizării in situ, luând în considerare tehnologia de execuție actualizată, stratificația reală, modulul de elasticitate efectiv al betonului, modulul de elasticitate fără coeficienți de siguranță ai terenului, legea de comportare a terenului, deficiențele programului de calcul și analiza influenței acestora asupra comportării structurilor studiate în vederea optimizării proiectării;

✓Lucrarea se bazează pe participarea efectivă la activitățile de proiectare, urmărire a execuției și monitorizare a tunelului Turdaș, pe prelucrarea și interpretarea unei cantități vaste de date și pe realizarea unei calibrări cu rezultatele măsurătorilor in situ, constituind un exemplu deosebit de util pentru înțelegerea comportării unei astfel de structuri, pentru calibrarea și îmbunătățirea modelelor de calcul;

✓Rezultatele și concluziile interesante obținute în lucrare au o aplicabilitate practică certă, putând servi la realizarea unor recomandări pentru proiectarea și calculul tipului de tunel analizat, utile proiectanților, dar și la întocmirea unor caiete de sarcini sau instrucțiuni tehnologice necesare executanților.

V.3. Direcții viitoare de cercetare

- Una dintre cele mai importante direcții ar fi continuarea monitorizării tunelului și în exploatare, având în vedere avantajul reprezentat de existența aparatelor amplasate în structură.
- Realizarea unui normativ care să trateze lucrările de tuneluri executate de la suprafață.
- Realizarea unui îndrumător/normativ de monitorizare a tunelurilor.
- Studiul comparativ al mai multor legi de comportare susținute și de acțiuni de monitorizare.
- Studiarea efectului adaptării tehnologiei de execuție asupra stării de eforturi și deformații la tuneluri executate de la suprafață.
- Studiarea impactului asupra mediului al unui tunel executat de la suprafață, comparativ cu un tunel executat în subteran.
- Realizarea unui studiu comparativ în ceea ce privește costurile de execuție, comparativ cu un tunel executat în subteran.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Radu Sârghiută, *Curs de construcții subterane, an III ACH*, Facultatea de Hidrotehnică, Universitatea Tehnică de Construcții București, România, 2012.
- [3] Flaviu Ioan Nică, *Raport de cercetare numărul 1: Studiul tunelelor executate de la suprafață, 23 pagini*, Facultatea de Căi Ferate, Drumuri și Poduri, Universitatea Tehnică de Construcții București, România, 2017.
- [7] Teodor Iftimie, *Structuri neclasice utilizate la subtraversarea unor căi de comunicații*, Simpozion Institutul de Construcții București, România, 1989.
- [8] Teodor Iftimie, Nicolae Ungurean, Liliana Balanean, Doru Zdrengea, *A new structural solution for protection against rocks falling*, World Tunnel Congress – Underground Facilities for Better Environment and Safety, India, 2008.
- [9] Consis Proiect, *Reabilitarea liniei de cale ferată Brașov – Simeria, parte componentă a coridorului IV Pan European, pentru circulația trenurilor cu viteză maximă de 160km/h, tronson Sighișoara - Coșlariu, Lot I Sighișoara – Ațel*, România, 2017.
- [10] *Proiect și execuție – Lucrări de tunel - Tunel artificial – Secțiuni galerie tip A și A1, Lotul 4, Autostrada Orăștie – Sibiu*, Compania Națională de Autostrăzi și Drumuri Naționale din România S.A., România, 2016.
- [11] *Proiectare și execuție – Ecoduct km 85+775 - Autostrada Lugoj – Deva, Lot 4, Sector Ilia – Deva, km 77+361 – km 99+500*, Asocieria Tehnostrade & Spedition UMB, România, 2014.
- [12] Mihai Zaharia – *Teză de doctorat Contribuții la concepția și calculul tunelelor rutiere executate în roci cu Noua Metodă Austriacă, 153 pagini*, Facultatea de Căi Ferate, Drumuri și Poduri, Universitatea Tehnică de Construcții București, România, 2012.
- [17] *Raport tehnic – Proiectare și execuție Autostrada Lugoj – Deva, Lot 2, Secțiunea E2, km 52+880 – km 56+220*, Compania Națională de Autostrăzi și Drumuri Naționale din România S.A., România, 2016.
- [18] Teodor Iftimie, *Curs Construcții Subterane, Curs Tuneluri I, Curs Tuneluri II* Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Căi Ferate, Drumuri și Poduri, România, 2015.

- [19] Horațiu Popa, *Modelare numerică și în laborator a comportării pereților îngropați*, Editura Conspress București, 2003, 239p. ISBN 973-8165-76-8
- [20] M. Hanko, S. Nakagawa, *Design method of cantilever walls for deep excavations – A survey on Japanese codes*, Underground construction in Soft Ground - Proceedings of the international symposium on underground construction in soft ground, New Delhi, India, 3 January 1994, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 1995, ISBN 9054105364.
- [21] K. Ishizuka, N. Horiba, *Simplified design method of walls for deep excavations – A survey on Japanese codes*, Underground construction in Soft Ground - Proceedings of the international symposium on underground construction in soft ground, New Delhi, India, 3 January 1994, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 1995, ISBN 9054105364.
- [29] *Plaxis 3D Tunnel – version 2*, Delft University of Technology & Plaxis B.V., The Netherlands, 2004.
- [30] ISPCF, *Reabilitarea liniei de cale ferată Brașov – Simeria, tronson Coșlariu – Simeria, Lot I: Vințu de Jos – Simeria – Obiect Tunel Turdaș*, România, 2015.
- [31] AITES/ITA – Working Group 2 - *Research Monitoring and control in tunnel construction*, International Tunnelling Association Report no. 009/November 2011, no. ISBN: 978-2-9700776-3-3.
- [37] Ranjana Soekhoe, *Realistic bending stiffness on a diaphragm wall for structural analysis*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, December, 2015.
- [38] Radu Pascu, *Comportarea și calculul elementelor din beton armat*, Editura Conspress București, 2008, 281p. ISBN 978-973-100-043-5
- [39] Radu Pascu, Dan Georgescu, *Beton armat – curs – partea a II-a: Calculul la stări limită*, Editura Conspress București, 2013, 206p. ISBN 978-973-100-294-1
- [40] SR EN 1992-1-1:2006 Eurocod 2: Proiectarea structurilor de beton
- [41] Bert Schadlich, *A tunneling case study in swelling rock – Computational Geotechnics Group*, Institute for Soil Mechanics und Foundation Engineering, Graz University of Technology, Austria.
- [42] K. Kovari, Ch. Amstad, G. Anagnostou, *Design/construction methods – Tunneling in swelling rocks – Key Questions in Rock Mechanics*, Cundal et. All (eds) Balkema, Rotterdam, 1988, ISBN 90 6191 835 9
- [43] Dawei Mao – *Thesis for the degree of Philosophiae Doctor – Analysis of rock support performance for tunneling in weakness zones containing swelling clay*, Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.
- [45] Tamas Nagy-Gyorgy, *Note de curs - Beton armat I, 7. Încovoiere cu forță axială* - <https://www.ct.upt.ro/studenti/cursuri/index.htm>, Facultatea de Construcții, Universitatea Politehnică Timișoara, România, 2019.
- [46] Tjje Liong Gouw – *Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems* – International Journal of Applied Engineering Research, Number 21 (2014), pp. 8291 – 8311, India, 2014.
- [47] Arindam Dey, Giovanni Lanzano, Carlo Rainieri, michele Di Tullio, Carmine Laorenza, Filippo Santucci de Magistris, Giovanni Fabbrocino – *A full scale instrumented retaining wall: interpretation of the measurements using numerical tools* – 5th International Conference of Earthquake Geotechnical Engineering, 10-13 January, Santiago, Chile, 2011.
- [48] Wojciech Solowski, *Geo-E2020: Numerical methods in geotechnics*, Numerical methods in geoengineering, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Aalto University, Helsinki, Finlanda, 2017.
- [49] Helmut Schweiger, *Modelling issues for numerical analysis of deep excavations* – Computational Geotechnics Group, Institute for Soil Mechanics und Foundation Engineering, Graz University of Technology, Austria.
- [50] Horațiu Popa, Loretta Batali, Sanda Manea, *Calculul structurilor de susținere a unor excavații adânci*, Revista construcțiilor, nr. 91, România, 2013.