

# Optimizarea curgerii cu rotație la intrarea în tubul de aspirație al turbinelor hidraulice

**Conducător științific:** prof.dr.ing Romeo SUSAN-RESIGA

**Doctorand:** ing. Tiberiu CIOCAN

## **Rezumat:**

Scopul activității de cercetare din prezenta teză de doctorat este elaborarea unei metode de proiectare optimă a unui rotor de turbină hidraulică care să ofere performanțe bune pe un domeniu larg de exploatare al turbinei la cuplarea rotorului cu un tub de aspirație existent. Aceasta presupune parametrizarea curgerii cu rotație pe întreg domeniul de funcționare al turbinei. Parametrizarea profilelor de viteză de la intrarea în tubul de aspirație este efectuată utilizând un model matematic de calcul al curgerii aval de rotor. A fost utilizată ca și caz test, turbina hidraulică Francis GAMM pentru care datele experimentale au fost disponibile. Cei doi coeficienți, media și panta vitezei axiale fără rotație, ce descriu geometria paletelor rotorice la bordul de fugă sunt utilizați într-un algoritm de optimizare pentru a identifica configurația optimă a vitezei axiale fără rotație. Mai exact, a configurației optime a paletajului rotoric la bordul de fugă, pentru care media ponderată a pierderilor relative de energie este minimă la cuplarea rotor – tub aspirație. Analiza hidrodinamică a tubului de aspirație confirmă identificarea profilelor de viteză optime, cât și identificarea punctului de funcționare la care pierderea relativă de energie este minimă. În final proiectarea noului rotor a fost efectuată utilizând metoda inversă de proiectare la punctul de funcționare pentru care pierderile relative de energie sunt minime.

## **Cuvinte cheie:**

turbine hidraulice, tub de aspirație, modelarea matematică a curgerii, optimizarea curgerii, profile de viteză, simulare numerică 3D, proiectare inversă

# Cuprins

1. Introducere
2. Modelarea matematică a curgerii cu rotație aval de rotorul unei turbine hidraulice
3. Metodologia de simulare numerică și analiză a curgerii 3D în tubul de aspirație investigat
4. Optimizarea curgerii cu rotație
5. Hidrodinamica tubului de aspirație
6. Proiectarea cu metoda inversă a geometriei rotorice
7. Concluzii, Contribuții și Perspective

## 1. Introducere

Primul capitol al tezei prezintă o introducere în problematica turbinelor hidraulice, prezentând clar și succint principiile de funcționare. Atenția este focalizată asupra tubului de aspirație, care corespunde porțiunii din traseul hidraulic al turbinei din aval de rotor, ce are ca și scop conversia excesului de presiune dinamică la ieșire din rotor în presiune statică, recuperând corespunzător excesul de energie cinetică care ar fi altfel disipată în lacul aval. Este explicat în detaliu faptul că scăderea randamentului turbinei la regimuri diferite/depărtate de cel optim este practic asociată creșterii corespunzătoare a pierderilor din tubul de aspirație, și este formulată problema optimizării curgerii cu rotație la ieșire din rotor astfel încât să se minimizeze pierderea hidraulică mediu ponderată în tubul de aspirație pe o plajă largă de regimuri de funcționare. Identificarea unei configurații optime a curgerii la ieșire din rotor se înscrie în paradigma modernă de proiectare a turbomașinilor, conform căreia mai întâi este optimizată curgerea și apoi sunt proiectate paletajele care realizează configurația dorită a câmpului hidrodinamic. Acest capitol constituie un exemplu de identificare, argumentare și formulare a problematicii tezei de doctorat.

## 2. Modelarea matematică a curgerii cu rotație aval de rotorul unei turbine hidraulice

Acest capitol este concentrat asupra unei probleme fundamentale a hidrodinamicii turbomașinilor, corespunzătoare modelării curgerii axial-simetrice cu rotație. În particular, problema modelării curgerii cu rotație în aval de rotorul turbinei, cu determinarea profilului componentelor vitezei la regimuri de funcționare diferite, *fără a cunoaște geometria rotorului*, și implicit curgerea tridimensională în paletajele rotorice. Soluționarea acestei probleme permite optimizarea curgerii la ieșire din rotor înainte de a fi proiectat rotorul, în vederea realizării unui tandem optimizat rotor – tub de aspirație.

Astfel, sunt identificate cele două mărimi integrale care caracterizează curgerea aval de rotor, debitul volumic și fluxul de moment cinetic, și este prezentat modelul matematic ce corelează cele două mărimi cu regimul de funcționare al turbinei.

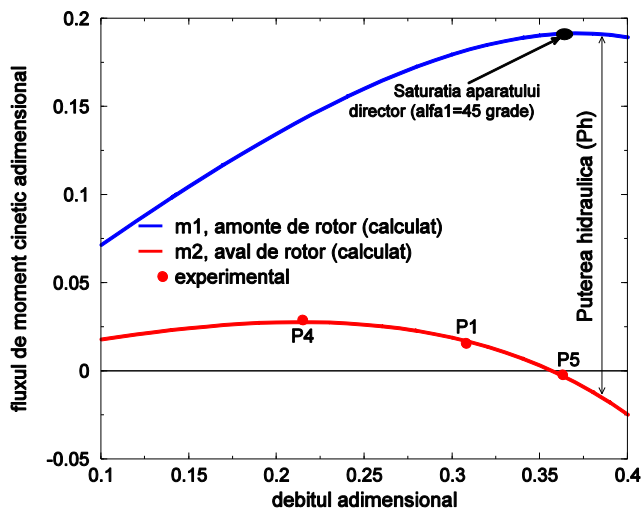


Fig. 2. 5 Distribuția fluxului de moment cinetic adimensional amonte și aval de rotor funcție de coeficientul de debit la cădere constantă corespunzător turbinei Francis GAMM

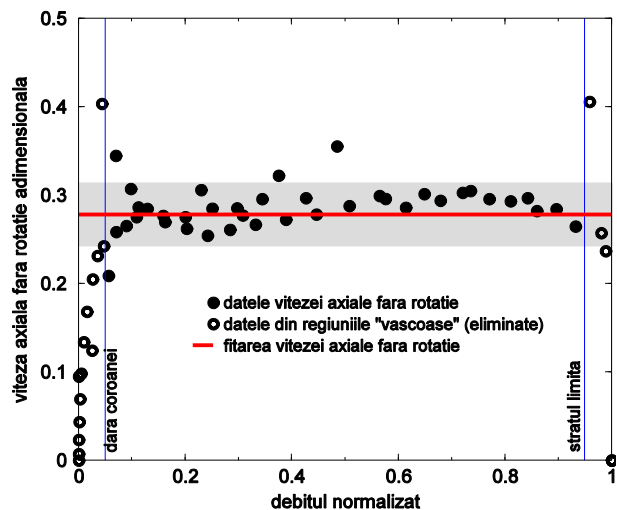


Fig. 2. 8 Profilul vitezei axiale fără rotație funcție de fracția de debit corespunzătoare celor 3 puncte de funcționare la cădere constantă a turbinei Francis GAMM în secțiunea de măsură  $S_2$

Figura 2.5 prezintă validarea modelului pentru turbine hidraulice Francis, pentru o plajă suficient de largă de debite turbinate, iar programul ce implementează algoritmul numeric corespunzător este prezentat în Anexa 1 a tezei de doctorat. Cinematica curentului relativ la ieșire din rotor este descrisă prin intermediul conceptului de viteză fără rotație. Profilul acestei viteze ipotetice, de la coroană până la inel, rămâne practic nemodificat odată cu modificarea punctului de

funcționare, conform Fig. 2.8. Aceste ingrediente sunt înglobate apoi într-o formulare variațională pentru funcția de curent, care presupune minimizarea unei funcționale cu o constrângere integrală corespunzătoare valorii fluxului de moment cinetic. Capitolul 2 este încheiat de un tablou sinoptic al metodologiei de modelare a curgerii aval de rotor, evidențiindu-se explicit datele de intrare (coeficientul de debit, coeficientul de moment cinetic, profilul vitezei fără rotație, și coordonata radială a peretelui conului în secțiunea de analiză) și mărimile de ieșire (profilele componentelor axială, circumferențială și radială ale vitezei) pentru programul „turboswirl1D” prezentat în Anexa 2.

### 3. Metodologia de simulare numerică și analiză a curgerii 3D în tubul de aspirație investigat

În capitolul 3 este prezentată în detaliu metodologia de simulare numerică și analiză a curgerii în tubul de aspirație. Astfel, în figura 3. 1 este prezentat domeniul tridimensional pentru un tub de aspirație, respectiv, în figura 3. 2 un set de secțiuni transversale care permit analiza evoluției curgerii și a conversiei energiei cinetice în presiune statică.

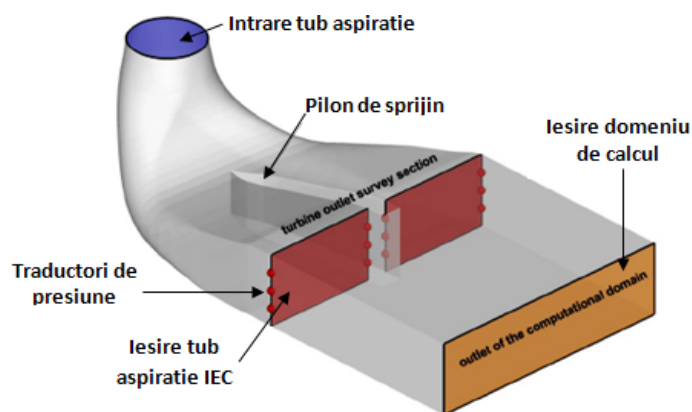


Fig. 3. 1 Geometria tubului de aspirație cu secțiunile de intrare (albastru), ieșire conform normelor IEC [139] (roșu), respectiv, ieșirea din domeniul de calcul (maro)

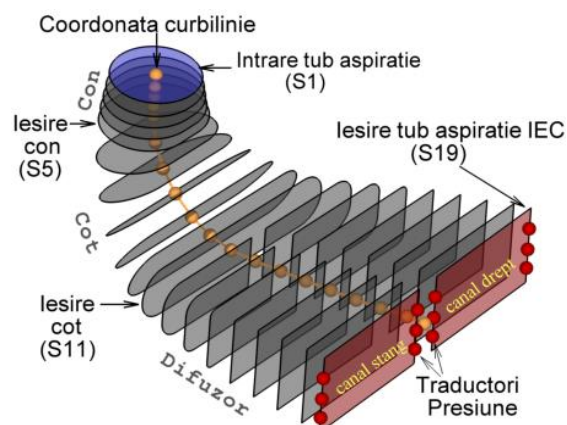


Fig. 3. 2 Secțiunile transversale a tubului de aspirație (gri) investigat, coordonata curbilinie (portocaliu) și traductorii de presiune (roșu)

Sunt detaliate deasemenea condițiile la intrare și ieșire din domeniu, precum și modelul matematic al curgerii turbulente utilizat în programul expert FLUENT. Este aleasă și plaja de funcționare ce va fi investigată la diferite configurații ale vitezei fără rotație, cu scopul de-a minimiza pierderile de energie.

În final, pentru analiza curgerii au fost stabilite cantitățile de interes și metoda de investigare a hidrodinamici tubului de aspirație la diferitele configurații a curgerii cu rotație (diferite profile de viteză) impuse la intrare în domeniul de analiză, conform ec. (3.9 – 3.15).

## 4. Optimizarea curgerii cu rotație

Capitolul 4 prezintă metodologia de optimizare a curgerii la ieșire din rotorul turbinei, precum și un exemplu complet de aplicare a ei. Astfel, funcția obiectiv este definită ca media ponderată a pierderilor hidraulice în tubul de aspirație corespunzătoare unui set prestabilit de puncte de funcționare ale turbinei, definit de valorile coeficientului de debit și ale coeficientului de flux al momentului cinetic. Ponderile alese pentru fiecare punct de funcționare sunt în practică precizate de utilizatorul turbinei, în concordanță cu durata estimată de funcționare la fiecare regim. Pe de altă parte, mărimea optimizată este profilul curgerii fără rotație, descris în cazul de față prin doi parametri ce corespund unei aproximații liniare. Figura 4.2 prezintă clar tabloul sinoptic al procedurii de optimizare, în care evaluarea funcției obiectiv pentru valori date ale celor doi parametri precizați mai sus este clar corelată cu modelul descris și validat în Capitolul 2.

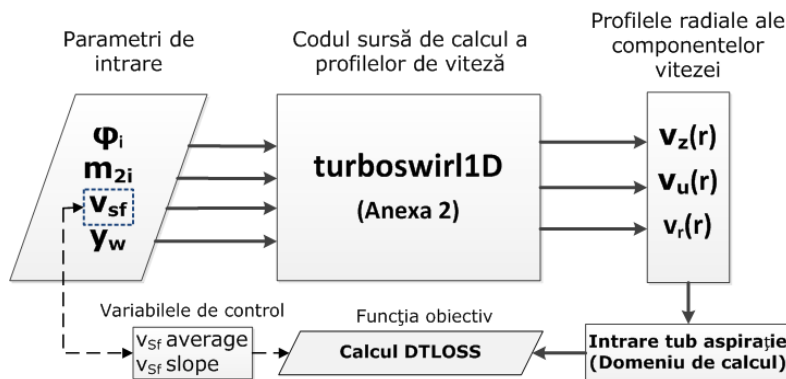


Fig. 4. 2 Schema principală de evaluare a funcției obiectiv la diferite configurații ale  $v_{sf}$

Metoda aleasă pentru minimizarea funcției obiectiv este „downhill simplex”, prezentată în detaliu în §4.3. Algoritmul de optimizare a cărui schemă logică se regăsește în Figura 4.4 este aplicat pas cu pas pentru exemplul din Figura 4.5. Se demonstrează clar că pornind de la o configurație inițială, generată de metodele quasi-empirice de proiectare utilizate în prezent, se ajunge la o configurație

optimizată a ieșirii din rotor (practic distribuția unghiului curgerii relative de la coroană până la inel).

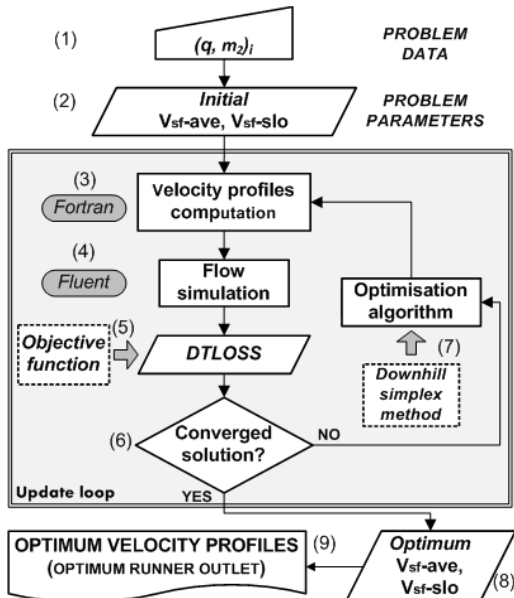


Fig. 4. 4 Schema logică de optimizare a profilelor de viteză de la intrarea în tubul de aspirație.

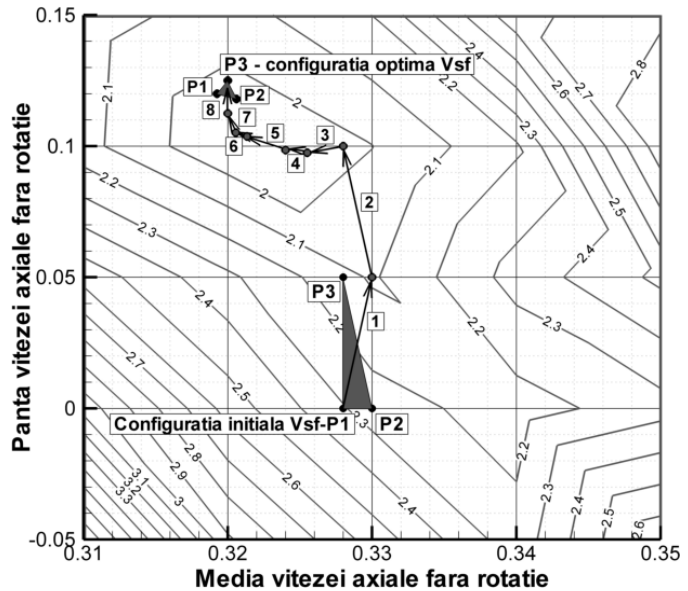
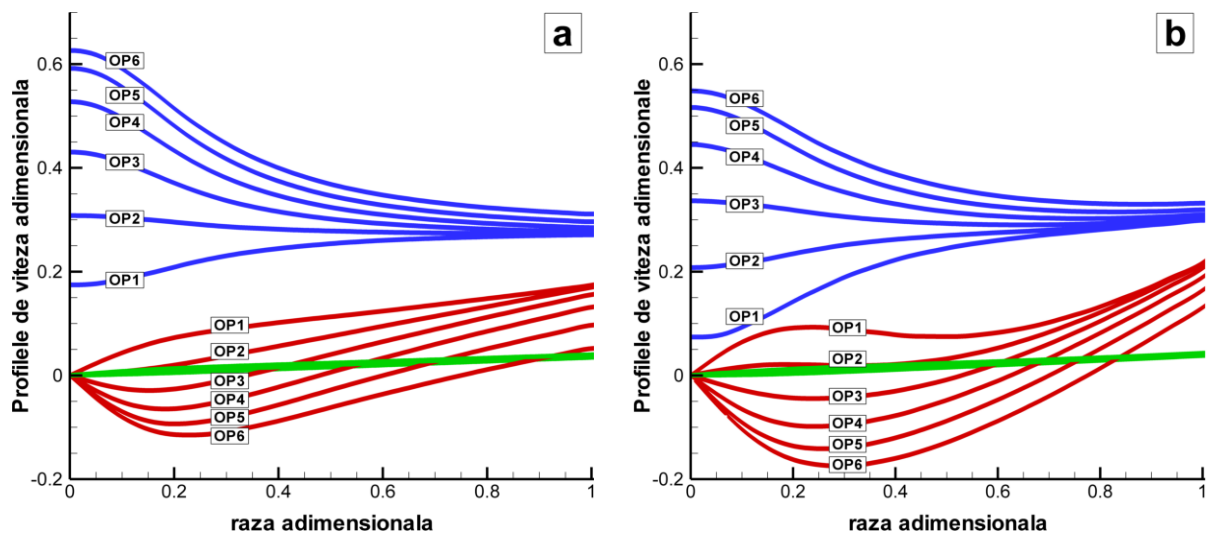


Fig. 4. 5 Metoda *Downhill Simplex*: Primul pas – Reflecție; Pasul 2 – Reflecție; Pasul 3 – Reflecție; Pasul 4 Reflecție și Expansiune; Pasul 5 – Reflecție; Pasul 6 – Reflecție; Pasul 7 – Contractie; Pasul Final – Reflecție.

Diferențele între profilele de viteză corespunzătoare punctelor de funcționare analizate, pentru rotorul inițial și pentru cel optimizat, Figura 4.7, sunt evidente. Este clar că fără o asemenea metodologie sistematică de optimizare, proiectarea și corectarea empirică a geometriei paletelor rotorice este nu numai extrem de costisitoare, dar și ineficientă din punct de vedere al calității rezultatelor.



a. Configurația inițială a vitezei axiale fără rotație

b. Configurația optimizată a vitezei axiale fără rotație

Fig. 4. 7 Profilele componentelor de viteză la intrarea în tubul de aspirație: Axial (albastru), Circumferențial (roșu), Radial (verde).

## 5. Hidrodinamica tubului de aspirație

În Capitolul 5, utilizând metodologia descrisă în Cap.3, este examinată în detaliu decelerarea curgerii în tubul de aspirație, respectiv evoluția pierderilor hidraulice. Această analiză a curgerii cu rotație optimizată este reprezentată comparativ cu varianta inițială în Figura 5.1. Este evidențiată decelerarea curgerii în cele trei segmente specifice tubului de aspirație (conul, cotul și difuzorul), diferențiindu-se componenta energiei cinetice provenită din viteza debitantă (normală pe secțiunile transversale) respectiv din mișcările secundare (viteza în planul secțiunii transversale). O asemenea analiză complexă reprezintă o premieră în literatura de specialitate, și permite o comparație relevantă între configurația de pornire și cea optimizată.

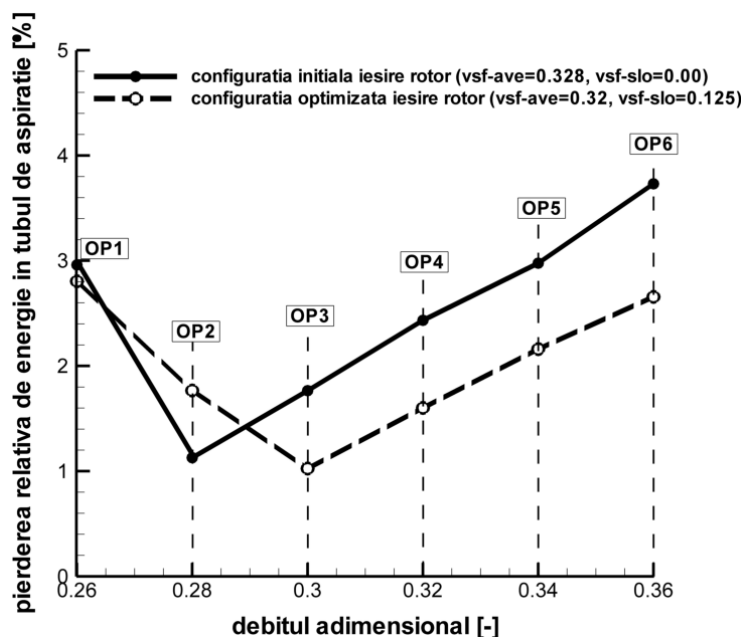


Fig. 5. 4 Pierderile relative de energie în tubul de aspirație funcție de debitul adimensional, corespunzătoare configurației inițiale a  $v_{sf}$  (linie continuă), respectiv, optimizate (linie întreruptă)

Figura 5.4 arată clar diminuarea pierderilor hidraulice pentru tubul de aspirație analizat și translatarea punctului optim de funcționare al turbinei în conformitate cu ponderile precizate de beneficiar. O asemenea metodă sistematică de optimizare nu era disponibilă în literatura de specialitate sau în practica industrială de proiectare a turbinelor hidraulice, dar necesitatea ei era recunoscută de comunitatea de experți.

## 6. Proiectarea cu metoda inversă a geometriei rotorice

În Capitolul 6 este prezentată și exemplificată metodologia de proiectare inversă a rotorului, utilizând un program expert. Sunt detaliate fundamentele teoretice ale proiectării inverse, respectiv, etapele de proiectare pentru un rotor de turbină Francis care să realizeze configurația optimă de curgere la ieșire. Studiul de caz prezentat în §6.4 menține traseul meridian, respectiv proiecția meridiană a muchiiilor de intrare și ieșire ale paletelor rotorice, dar introduce noile specificații de variație a încărcării paletelor de la coroană până la inel, Figura 6.16.

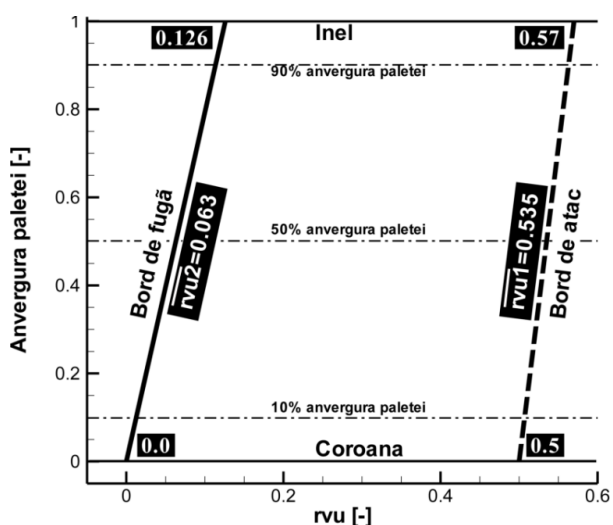


Fig. 6. 16 Variația momentului cinetic în direcția radială a paletelor rotorice

Rotorul astfel obținut diferă la bordul de fugă din punct de vedere geometric de rotorul inițial, după cum se poate observa în figura 6. 21. Acest lucru ce era de așteptat, deoarece prin optimizarea parametrului viteza fără rotație am optimizat bordul de fugă al paletelor rotorice.

În figura 6. 21 sunt reprezentate și suprapuse geometriile paletelor 3D corespondente rotorului inițial (gri), respectiv, noului rotor (mov). Diferențele dintre geometriile paletelor evidențiate în figura 6. 21 se pot observa mai bine în figura 6. 20. În această figură sunt reprezentate spre comparație profilele paletelor corespunzătoare rotorului inițial (gri), respectiv, a noului rotor (mov), pe trei secțiuni de la coroană la inel. Din analiza profilelor se poate observa că ambele paletelor au același bord de atac, iar diferențele apar la bordul de fugă, care este caracterizat de viteza fără rotație corespunzător fiecărei geometrii a paletelor rotorului la bordul de fugă.



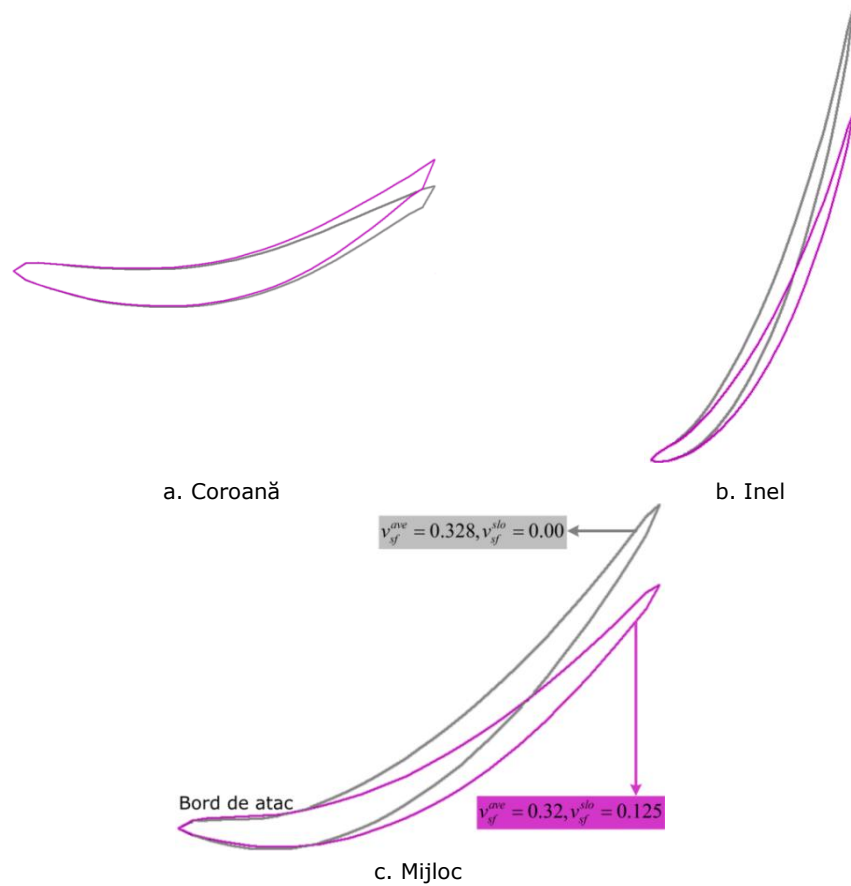


Fig. 6. 20 Comparare între profilele paletelor corespunzătoare rotorului inițial (gri), respectiv, a noului rotor (mov)

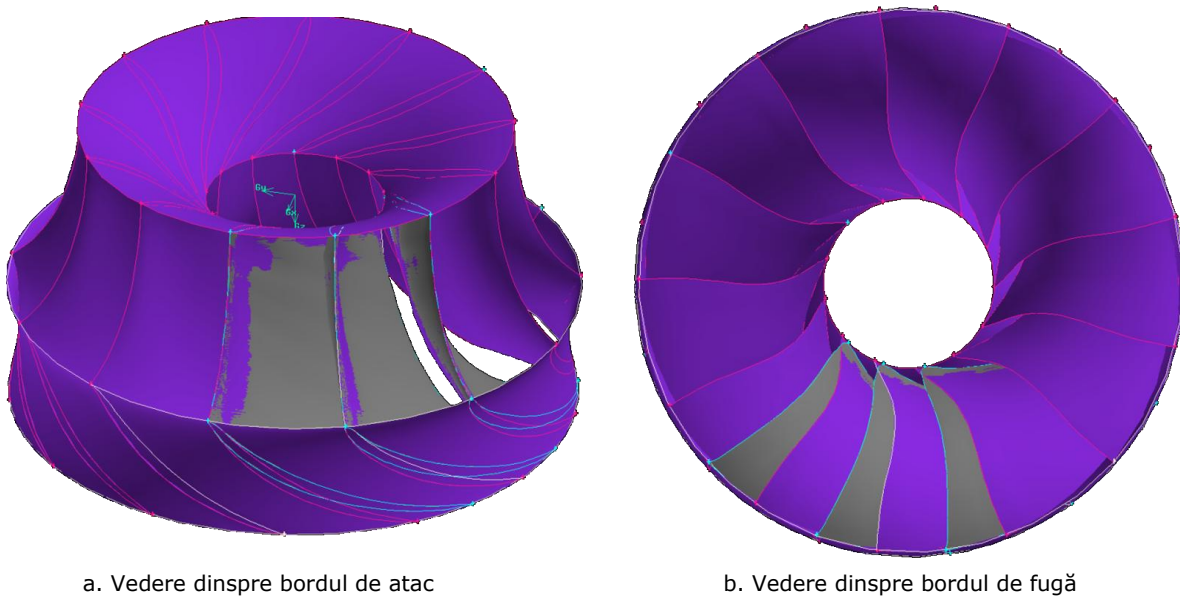


Fig. 6. 21 Geometria 3D a noului paletaj rotoric (mov) suprapusă peste geometria inițială (gri)

Principalul merit al tezei este de a fi dezvoltat și aplicat o metodologie sistematică de optimizare a rotorului turbinei pentru un tub de aspirație existent.

## **7. Concluzii, Contribuții și Perspective**

Capitolul 7 sumarizează principalele concluzii desprinse din capitolele tezei, și subliniază contribuțiile personale împreună cu câteva direcții de dezvoltare ale prezentului proiect.

Rezultatele obținute în teză sunt extrem de valoroase pentru procesul de re tehnologizare a turbinelor hidraulice, a căror proiectare a fost efectuată acum câteva decenii, când nici măcar tehnicile de simulare numerică a curgerilor tridimensionale nu erau utilizate în practica industrială. Chiar și astăzi, când experimentul numeric și experimentul fizic pe model furnizează rezultate remarcabil de apropiate, este dificil de optimizat direct rotorul turbinei utilizând parametri geometrici care descriu paleta. Prezenta teză oferă o alternativă practică, suficient de simplă, robustă și eficientă pentru a fi inclusă în practica curentă de proiectare a turbinelor hidraulice.