

CURSUL 5

FORAREA GĂURILOR DE SONDĂ

Criterii de clasificare a metodelor de forare a găurilor de sondă

- a) După modul de dislocare a rocilor
- b) După modul de utilizare a fluidului de foraj

a) Clasificarea după modul de dislocare a rocilor

- a1. Foraj cu dislocare prin percuție - foraj percutant
- a2. Foraj cu dislocare prin apăsare și rotație – foraj rotativ
- a3. Foraj cu dislocare prin rotație și percuție – foraj roto – percutant

b) Clasificarea după modul de utilizare a fluidului de foraj

- b1. Foraj în sistem uscat
- b2. Foraj în sistem hidraulic

b1. Forajul în sistem uscat poate fi:

- b1.1. Foraj în sistem uscat percutant
- b1.2. Foraj în sistem uscat rotativ
- b1.3. forajul în sistem uscat Benoto

b2. Forajul în sistem hidraulic poate fi:

- b2.1. Foraj în sistem hidraulic percutant
- b2.2. Foraj în sistem hidraulic roto – percutant
- b2.3 Foraj în sistem hidraulic rotativ (foraj rotary)

În funcție de de tipul de fluid de foraj în procesul de dislocare a rocilor forajul în sistem hidraulic poate fi:

- Foraj în care fluidul utilizat este aerul – denumit foraj cu aer
- Foraj în care fluidul utilizat este reprezentat de diferite gaze – denumit foraj cu gaze
- Foraj în care fluidul utilizat este reprezentat de vapori – denumit foraj cu ceață
- Foraj în care fluidul utilizat este reprezentat de produse spumante – denumit foraj cu spumă
- Foraj în care fluidul utilizat este apa – denumit foraj cu fluid pe bază de apă
- Foraj în care fluidul utilizat este fluid de foraj clasic (noroi de foraj care se bazează pe amestecul de apă și argilă – denumit foraj hidraulic propriu zis
- Foraj în care fluidul utilizat este reprezentat de fluide speciale – denumit foraj cu fluide speciale

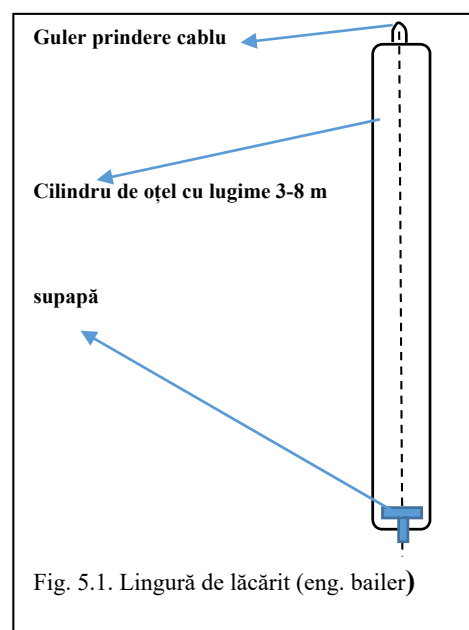


Fig. 5.1. Lingură de lăcărit (eng. bailer)

b1. Forajul în sistem uscat

b1.1. Foraj în sistem uscat percutant

b1.1.1. Forajul în sistem uscat de tip percutant cu cablu – Forajul Pensilvanian

Caracteristici de execuție:

Sapa de foraj este antrenată prin intermediul unui cablu

Dislocarea rocilor se realizează prin percuție

Detritusul se evacuează prin turnare de apă în gaura de sodă pe o înălțime de la talpa găurii de sondă de 10 – 15 m. Amestecul de material sfărmat și apă se evacuează cu o lingură de lăcărit (fig. 5.1).

b1.1.2. Forajul în sistem uscat de tip percutant cu prăjini

Caracteristici de execuție:

Săparea găurii de sondă se execută după același principiu ca în cazul forajului cu cablu, numai că garnitura de foraj este formată din prăjini, în loc de cablu

Limitele de execuție ale acestui sistem de foraj:

- Este dificil de traversat strate sau formațiuni geologice care înmagazinează fluide
- Este imposibil de forat în formațiuni instabile și sub presiune

b1.2. Forajul în sistem uscat de tip rotativ

b1.2.1. Forajul în sistem uscat de tip rotativ cu borsapă (eng. bucket) și lingură de lăcărit (eng. bailer)

Garnitura de foraj este constituită din prăjini

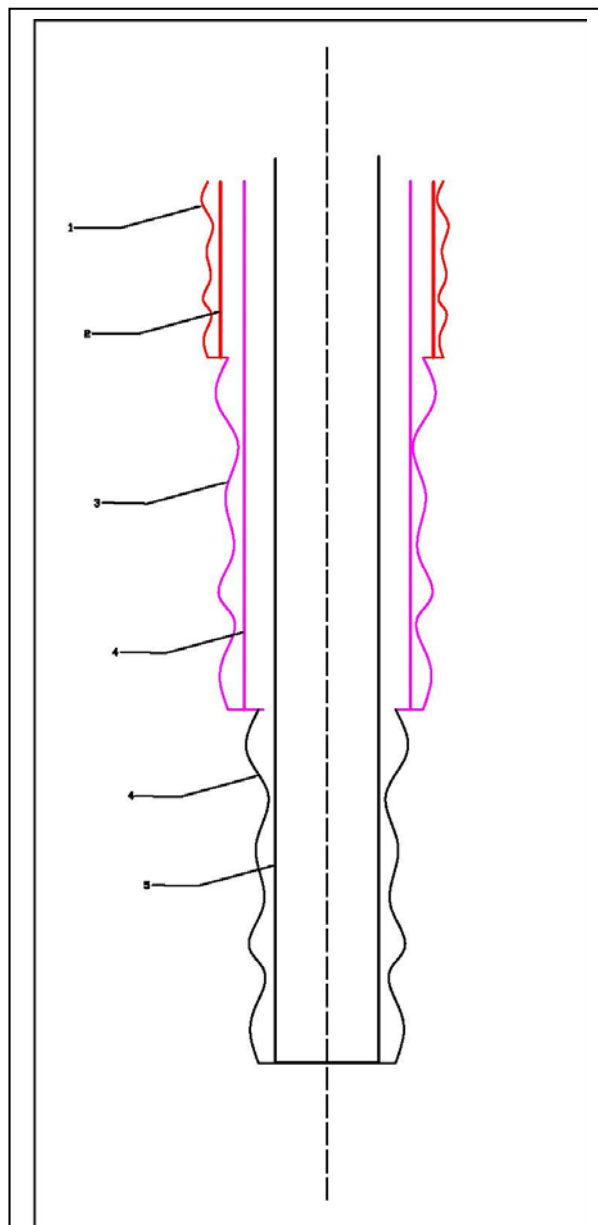


Fig. 5.2. Modul de execuție a forajului uscat cu borsapă și lingură de lăcărit

1. Saprea gurii de sonda cu cel mai mare diametru 2. Instalarea coloanei temporare 1 3. Saprea gaurii de sonda cu următorul diametru 4. Instalarea coloanei temporare pentru 3 4. Saprea uscata a ultimului tronson 5. Tubarea coloanei definitive 6. Extragerea coloanei temporare 3, concomitent cu umplerea spațiului inelar cu material 7. Extagerea coloanei temporare 2, evident cu umplerea spațiului inelar

Pentru stabilitatea pereților găurii de sondă se folosesc coloane tubate temporar și succesiv. După instalarea coloanei definitive coloanele temporare se extrag și se reutilizează.

Procedeele constă în săparea găurii cu diametre diferite, cele mai mari diametre fiind spre suprafața terenului și cele mai mici în adâncime.

Spre exemplu (fig. 5.2), după săparea cu diametrul cel mai mare a unui tronson de la suprafață până la o anumită adâncime, se oprește procesul de săpare și se instalează o coloană temporară care să susțină pereții găurii de sondă. În interiorul acestei coloane se sapă gaura de sondă de la adâncimea rămasă până la o nouă adâncime. Se oprește procesul de forare și în interiorul coloanei anterioare de la suprafață până la noua adâncime se instalează o nouă



Fig. 5.3. Borsapă (eng. bucket rock bit)



Fig. 5.4. Tip de sapă șneac (eng. auger)

coloană temporară și așa mai departe până la atingerea obiectivului. În interiorul ultimei coloane se tubează coloana definitivă și se extrag în ordinea inversă a instalării lor coloanele temporare.

În rocile argiloase și coezive se folosește pentru dislocarea rocilor borsapa (fig. 5.3), iar în rocile necoezive și în special cele cu apă se folosește lingura de lăcărit (fig. 5.1)

Aceste tipuri de foraje sunt specifice construcției puțurilor de apă cu adâncimi mai mici de 100 – 120 m.

Avantaje:

Sunt ușor de dezvoltat și de pus în producție

Dezavantaje:

Nu pot fi forate la adâncimi mai mari de 120 m.

Necesită foarte multe marșuri pentru descărcarea borsapei

Cu lingura de lăcărit operațiunile au viteză mai mare întrucât se folosește cablul de lăcărit

b1.2.2. Forajul în sistem uscat de tip rotativ cu șneac (eng. auger)

Metodologia de lucru este asemănătoare cu cea din cazul forajului în sistem uscat cu borsapă, numai că se utilizează șneacul (fig. 5.4) ca sculă tăietoare și de evacuare a detritusului. Se execută de regulă pentru construcția pilonilor în domeniul construcțiilor.

Nu se ating adâncimi foarte mari cu acest tip de foraje

b.1.3. Forajul în sistem uscat Benoto

Se execută pentru construcția pilonilor, cu precădere în cazurile traversării rocilor detritice neconsolidate de tipul bolovănișurilor și pietrișurilor grosiere.

Se utilizează un burlan premergător prevăzut cu un cuțit care avansează dinspre suprafață în adâncime prin vibrație (fig. 5. 5).

Cu un graifer cu cablu se extrage (fig. 5. 5) materialul din interior

b2. FORAJUL ÎN SISTEM HIDRAULIC

b2.1. Forajul în sistem hidraulic percutant cu ciocan de fund

Sapa se numește ciocan de fund (eng. hammer) are o construcție specială și este acționat hidraulic prin percuție cu o garnitură de foraj constituită din prăjini.

Se execută pentru săparea găurilor de sondă în roci tari și extratari

Detritusul este evacuat prin circulația directă a fluidului de foraj. Circulația directă constă în injectarea fluidului de foraj prin interiorul prăjinilor și evacuarea sa împreună cu detritusul prin spațiul inelar.

În cazul diametrelor găurii de sondă mai mici de 8 in., poate fi utilizat ca fluid de foraj aerul. La diametre cuprinse între 8 și 16 in., poate fi utilizată spuma ca fluid de foraj sau alte tipuri de fluide.

În multe dintre situații presiunile de lucru sunt cuprinse între 7.03 și 14 bari.

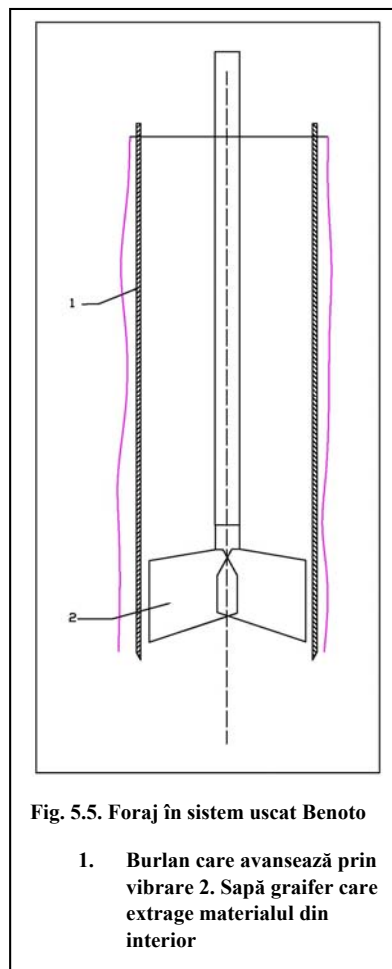
b2.2. Forajul în sistem hidraulic roto - percutant cu ciocan de fund

Este asemănător cu forajul hidraulic percutant numai că garnitura de foraj și ciocanul de fund sunt rotite cu o turație de 10 – 30 rot/min. (rpm)

În săparea găurilor de sondă poate fi utilizat sistemul mixt. Ciocanul de fund este acționat cu aer, iar circulația și evacuarea detritusului se realizează cu apă sau alt fluid de foraj.

B2.3. Forajul în sistem hidraulic rotativ (Rotary)

Este cea mai utilizată metodă în săparea găurilor de sondă. Prezintă două sisteme de lucru:



b.2.3.1. Forajul hidraulic rotativ cu circulație directă (eng. Rotary direct circulation sau Direct circulation Rotary)

b.2.3.2. Forajul hidraulic rotativ cu circulație inversă (eng. Rotary reverse circulation sau Reverse circulation Rotary)

b.2.3.1. Forajul hidraulic rotativ cu circulație directă (eng. Rotary direct circulation sau Direct circulation Rotary)

Principiul metodei constă în:

- Dislocarea rocilor se realizează prin rotirea și apăsarea sapei de către garnitura de foraj
- Circulația fluidului se realizează prin injectarea sa de către pompele de noroi prin interiorul prăjinilor de foraj și evacuarea prin spațiul inelar a fluidului din gaura de sondă împreună cu detritusul rezultat în urma forării

Rotirea prăjinilor este antrenată de:

- masa rotativă care învârtă prăjina de antrenare
- capul hidraulic care rotește prăjina de antrenare
- utilizarea unui motor de fund antrenat de circulația fluidului de foraj
- utilizarea unei turbine de fund antrenată de circulația fluidului de foraj

Regimul de foraj este caracterizat de:

- apăsarea pe sapă;
- viteza de rotire;
- debitul fluidului de foraj.

Apăsarea pe sapă

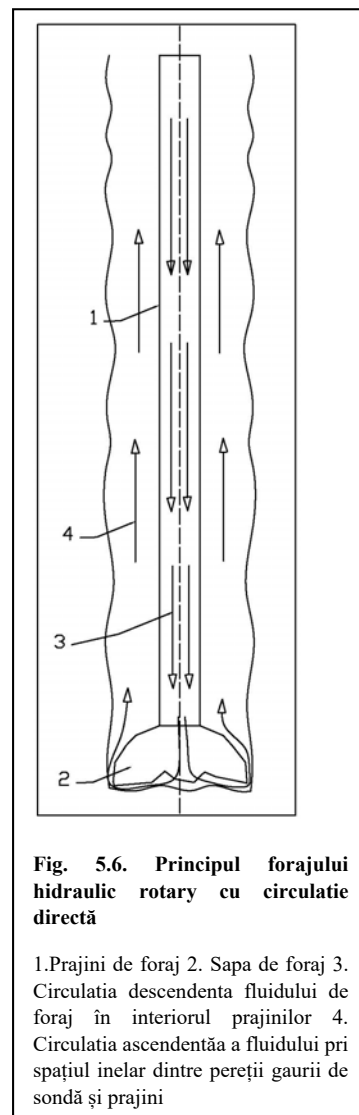
Este cauzată de greutatea prăjinilor de foraj (eng. drill string), inclusiv a aprăjinilor grele (eng. drill collars) și a stabilizatorilor (eng. stabilizers)

Eforturile în garnitura de foraj datorate apăsării pe sapă sunt:

- eforturi axiale;
- eforturi tangențiale la torsiune;
- momentul de torsiune;
- tracțiunea admisibilă.

Garnitura de foraj se alege în funcție de:

- diametrul găurii de sondă;
- adâncimea găurii de sondă;
- tăria rocilor.



Lungimea prăjinilor grele (drill collars) este aleasă potrivit formulei (5. 1)

$$l = K \frac{P}{q} \quad (5. 1)$$

În care

K – coeficient care ține seamă de condițiile geologice ($K = 1.25 - 1.75$)

P – apăsarea pe sapă în Kgf.

q – greutatea pe metru liniar a prăjinilor grele în kgf.

Eforturile axiale:

Tensiunea în prăjini la întindere și la gura sondei (tensiunea la tracțiune) este în conformitate cu realția 5.2.

$$\sigma_{int} = \frac{(L-l_1)(\gamma_{prj}-\gamma_{ff})}{10} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5. 2)$$

În care s-au folosit notațiile:

L - adâncimea găurii de sondă (m);

l_1 – lungimea părții întinse a prăjinilor de foraj

γ_{prj} – greutatea specifică a prăjinilor de foraj (Kgf./dm³)

γ_{ff} – greutatea specifică a fluidului de foraj (Kgf./dm³)

La talpa găurii de sondă efortul unitar normal este produs de însumarea efortului la compresiune σ_{cp} și a efortului la încovoiere a prăjinilor de foraj σ_{incv} conform cu:

$$\sigma_T = \sigma_{cp} + \sigma_{incv} \quad (5. 3)$$

Unde

$$\sigma_{cp} = \frac{P}{A} \quad (5. 4)$$

Și unde A este aria secțiunii prăjinilor grele (cm²), adică:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \quad (5. 5)$$

În care D_e și D_i sunt diametrele exterioare și respectiv interioare(cm) ale prăjinilor grele

Efortul la încovoiere este dat următoarea relație de calcul:

$$\sigma_{incv} = \frac{\alpha d E}{115L} \quad (5. 6)$$

α - unghiul de înclinare al găurii de sondă (°);

d – diametrul exterior al prăjinilor curbate

E – modulul de elasticitate $E = 2\ 100\ 000$ kgf/cm²

L – lungimea prăjinilor încovoiate

Eforturile tangențiale la torsiune

Rezistența la torsiune se manifestă pe întreaga lungime a garnituri, datorită efortului de rotire a garnituri imprimat de motorul instalației de foraj și al rezistenței opuse de roci și de pereții găurii de sondă în procesul de foraj

$$\sigma_{tr} = \frac{71\,620 P_m \lambda \eta}{n W_o} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5.7)$$

unde

P_m – puterea motorului în CP (1CP = 0.736 KW)

λ – coeficient de suprasarcină $\lambda = 1 - 1.1$

η - randamentul instalației $\eta = 0.8$

W_o – modulul polar de rezistență al secțiunii prăjinilor de foraj (cm³)

$$W_o = \frac{D_e^4 - D_i^4}{16 D_e} \quad (5.8)$$

Si în care D_e și D_i sunt diametrele exterioare și respectiv interioare ale prăjinilor

Momentul de torsiune din garnitura de foraj

$$M_{tr} = W_p \tau_a \text{ (Kgf xcm)} \quad (5.9)$$

unde

W_p – modulul polar de rezistență $W_p = 3.14 W_o$

τ_a – efortul tangențial admisibil (Kg f/cm²) și unde $\tau_a = \frac{\sigma_c}{3}$

σ_c – rezistența prăjinilor de foraj la curgere, depinde de caracteristicile materialului din care sunt construite prăjinile

Tracțiunea admisibilă

$$Q_{tr} = A_{ef} \sigma_c = 0.785 (D_e^2 - D_i^2) \sigma_c \quad (5.10)$$

Atunci când în timpul procesului de forare al găurii de sondă crește apăsarea pe sapă și mărește și debitul de circulație al fluidului de foraj.

Viteza de rotire

În cursul operațiunii de forare a găurii de sondă, viteza de rotire depinde de diametrul sapei și numărul de rotații imprimat de la masa rotary. Această viteză de rotație este denumită pe scurt turația sapei. Prin urmare viteza periferică de rotire este în concordanță cu formula 5.11.

$$v_p = \frac{D_{sp}n}{6 \cdot 10^4} \quad (5.11)$$

D_{sp} – diametrul sapei (mm)

n – turația sapei (rpm)

Debitul de circulație al fluidului de foraj

Debitul de circulație al fluidului de foraj depinde de ceilalți parametri ai regimului de foraj cum ar fi apăsarea pe sapă, viteza de rotire, căderea de presiune, etc.

În gaura de sondă curgerea fluidului de foraj poate fi laminară sau turbulentă. Tipul de curgere depinde de numărul lui Reynolds scris cu relația:

$$Re = \frac{\rho v D_i}{\mu} \quad (5.12)$$

ρ – densitatea fluidului de foraj (kg/dm³);

v – viteza medie de circulație a fluidului de foraj (m/s)

D_i – diametrul interior al prăjinilor de foraj

μ – vâscozitatea dinamică a fluidului de foraj

Dacă $Re < 2\,000$ atunci curgerea fluidului de foraj în gaura de sondă este laminară, dacă $Re > 2\,000$, atunci curgerea este turbulentă

În timpul procesului de forare a găurilor de sondă căderea de presiune Δp în cazul circulației fluidului de foraj, de la pompe pe întregul circuit depinde de căderile de presiune de la:

- De la suprafață cum ar fi căderi de presiune pe pompe, furtune, cap hidraulic
- Cădere de presiune în prăjinile de foraj, prăjinile grele și stabilizatori
- Cădere de presiune pe canalele din interiorul sabelor de foraj
- Cădere de presiune din spațiul inelar dintre prăjini și peretele găurii de sondă
- Cădere de presiune pe conductele de descărcare de la suprafață

În timpul forării găurii de sondă, căderea de presiune se determină cu formula:

$$\Delta p = \frac{32 \mu_d L v}{d^3} \text{ (Kg/m}^2\text{s)} \quad (5.13)$$

în care s-au folosit notațiile

L – lungimea prăjinilor (m)

v – viteza medie de circulație a fluidului de foraj (m/s)

d – diametrul de curgere al fluidului de foraj (m)

μ_d – vâscozitatea dinamică echivalentă a fluidelor newtoniene (kg/m*s)

$$\mu_d = \mu_p + \frac{Y_p d}{6v} \quad (5.14)$$

μ_p – vâscozitatea plastică (Kg/m*s)

Y_p – punctul de curgere pentru fluide binghamiene ($\text{Kg/m}^2\text{s}$)

În cazul cugerii turbulente a fluidului de foraj în gaura de sondă căderea de presiune se calculează cu formula:

$$\Delta p = \frac{\gamma f L v^2}{2gd} \quad (\text{Kg/m}^2\text{s}) \quad (5.15)$$

unde:

γ – greutatea volumetrică a fluidului de foraj (Kg/dm^3)

f – factor de frecare Darcy - Weisbach

g – accelerația gravitațională (m/s^2)

În final, debitul de circulație al fluidului de foraj în gaura de sondă în timpul de procesului de forare se scrie potrivit ecuației:

$$Q_{\text{circulație}} = \frac{c_o P_{pp}}{\Delta p} \quad (\text{l/s}) \quad (5.16)$$

P_{pp} – puterea pompei

c_o – coeficient de transformare

b.2.3.2. Forajul hidraulic rotativ cu circulație inversă (eng. Rotary reverse circulation sau Reverse circulation Rotary)

Principiul execuției forajului hidraulic cu circulație inversă

Forarea găurilor de sondă prin metoda forajului hidraulic cu circulație inversă constă în dislocarea rocilor prin rotirea sabelor, iar circulația fluidului de foraj se realizează în mod descendent în spațiul inelar dintre prăjini și pereții găurii de sondă și este evacuat împreună cu detritusul prin interiorul prăjinilor de foraj. Evacuarea detritusului și a fluidului prin interiorul prăjinilor de foraj se produce folosind sistemul aer – lift de pompare.

Sistemul aer – lift constă dintr-o pompă aer – lift, care are o țevă de evacuare, în cazul concret sunt prăjinile de foraj și o țevă alăturată prăjinilor sau cu poziție concentrică în interiorul acestora numită țevă de aer sau injector. Țeava de aer este conectată la un compresor care injectează aer sub presiune. În interiorul prăjinilor de foraj se formează amestecul fluid de foraj cu aer. Emulsia aer, fluid de foraj și detritus este evacuată sub energia aerului la suprafață. Din cele expuse, rezultă că în cazul forajului

hidraulic cu circulație inversă prezența unui compresor cu putere și capacitate adecvată este obligatorie. De asemenea este necesar ca gaura de sondă să fie întodeauna plină cu fluid de foraj.

Metoda forajului hidraulic cu circulație inversă are aplicabilitate foarte mare în execuția puțurilor de apă, întrucât utilizează fluide foarte ușoare, uneori apă, care formează turte subțiri ușor detașabile în procesul de dezvoltare, fapt ce permite funcționarea cu randament ridicat a acestor lucrări.

De asemenea găurile de sondă cu diametre foarte mari (mai mari de 1.5 m, uneori până la 3 - 6 m) se forează numai prin metoda forajului hidraulic cu circulație inversă.

În cazul forajului hidraulic cu circulație inversă viteza de circulație a fluidului în interiorul prăjinilor trebuie să fie $v_{circ} = 0.38 - 1.01 \text{ m/s}$

Transportul detritusului la suprafață implică asigurarea unui debit de aer potrivit formulei:

$$Q_{aer} = \frac{W_a}{p_o \ln\left(\frac{p_d}{p_o}\right)} \text{ (m}^3\text{/min.)} \quad (5.17)$$

W_a – rata de energie pentru debitul de aer ($\text{m}^2/\text{Kg}\cdot\text{s}^3$)

p_o – presiunea atmosferică (Kg/cm^2)

p_d – presiunea la nivelul scufundării în fluidul de foraj a țevii de aer (Kg/cm^2)

$$p_d = \gamma H \quad (5.18)$$

H – submergența totală (coeficient de imersie sau de scufundare în fluid)

$$H = \frac{\text{lungimea țevii de aer scufundate în fluid}}{\text{lungimea totală a țevii de aer}} \quad (5.19)$$

Dacă se notează cu W_{ff} energia din interiorul prăjinilor pentru ridicarea la suprafață a fluidului de foraj cu detritus, aceasta depinde de debitul pompat din gaura de sondă, greutatea specifică a fluidului și căderea de sarcină cauzată de frecarea aerului conform ecuației:

$$W_{ff} = Q_{ff} \gamma h \quad (5.20)$$

Q_{ff} - debitul evacuat și implicit cel de circulație a fluidului de foraj

h – căderea de sarcină hidraulică din cauza frecării pe întregul sistem de circulație al aerului

$$h = \varphi H \quad (5.21)$$

În care φ – reprezintă coeficientul de frecare al aerului

Și prin urmare debitul fluidului de foraj și al detritusului evacuat din gaura de sondă este:

$$Q_{ff} = \frac{\eta Q_{aer} p_o}{\gamma \varphi H \ln\left(\frac{\gamma H}{p_o}\right)} \text{ (l/s)} \quad (5.22)$$

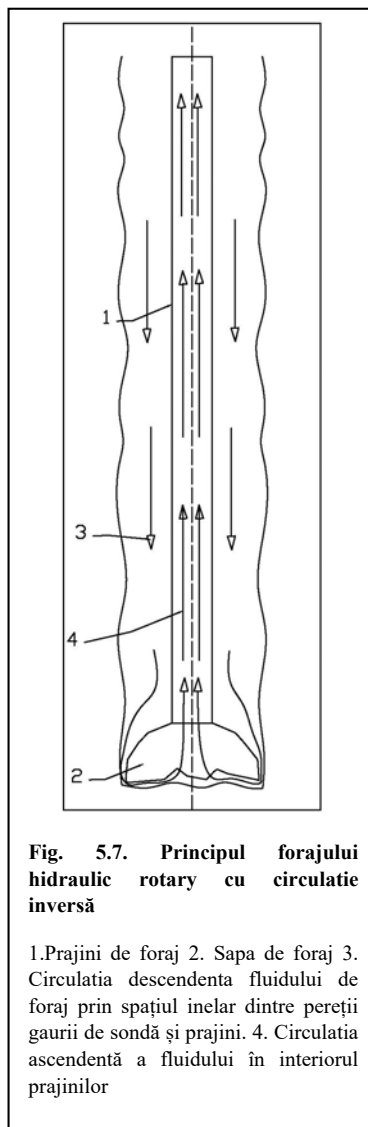


Fig. 5.7. Principul forajului hidraulic rotary cu circulație inversă

1.Prajini de foraj 2. Sapa de foraj 3. Circulatia descendenta fluidului de foraj prin spațiul inelar dintre pereții gaurii de sondă și prajini. 4. Circulatia ascendentă a fluidului în interiorul prajinilor

În care η reprezintă eficiența pompei aer – lift care asigură circulația în timpul procesului de forare al găurii de sondă.

Se poate remarca faptul că (fig. 5.8) pe măsura creșterii submergenței, adică a scufundării țevi de aer crește randamentul pompei aer – lift. Îmbunătățirea randamentului sistemului de pompare pe măsura creșterii submergenței are implicații în reducerea cantității de aer furnizate de compresor și implicit obținerea unor rezultate superioare cu consum redus de energie.

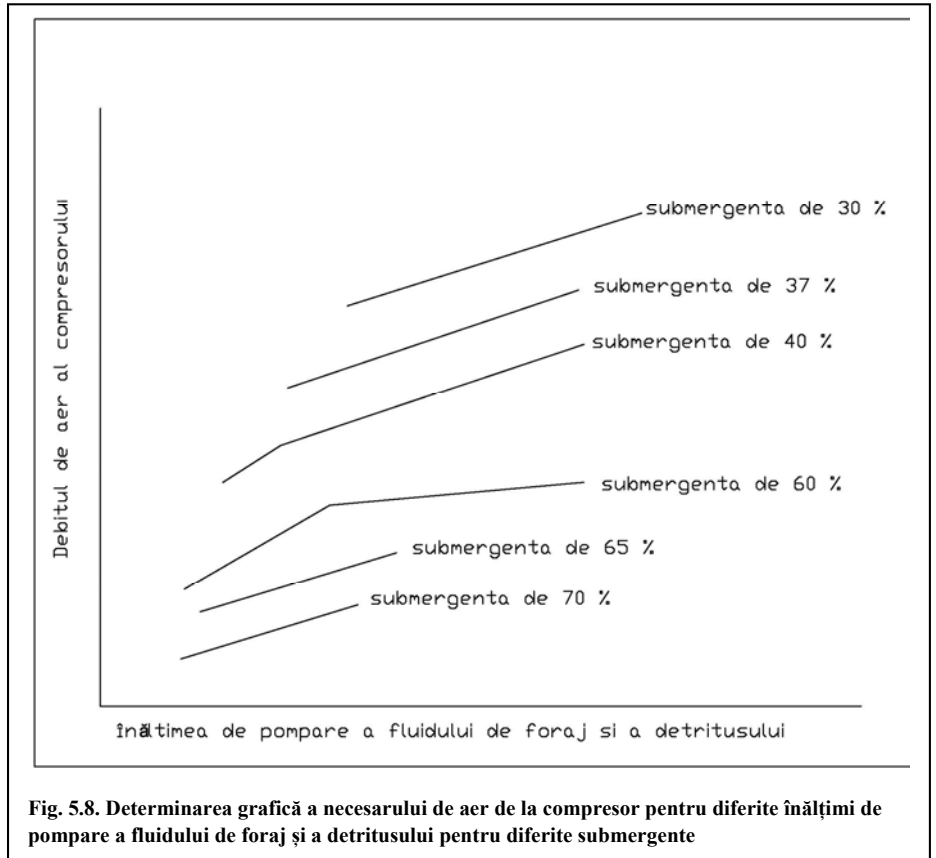


Fig. 5.8. Determinarea grafică a necesarului de aer de la compresor pentru diferite înălțimi de pompare a fluidului de foraj și a detritusului pentru diferite submergente