

Enunțul problemei

La sarcina lor nominală, trei cazane energetice, pentru a produce o cantitate orară de energie de 40 MWh, fiecare dintre ele consumă o anumită cantitate de combustibil, B (kg/h), fiecare dintre combustibilii arși în focar având puterea calorifică inferioară H_i (kJ/kg):

1. Păcura, $B_p = 3646$ kg/h , având puterea calorifică inferioară $H_{ip} = 39500$ kJ/kg;
2. Lignit, $B_l = 21493$ kg/h , având puterea calorifică inferioară $H_{il} = 6700$ kJ/kg;
3. Huilă, $B_h = 17778$ kg/h , având puterea calorifică inferioară $H_{ih} = 8100$ kJ/kg.

Fiecare dintre cei trei combustibili are un anumit conținut de sulf, notat cu S_c și măsurat în procente. În vederea efectuării unei analize parametrice, se va considera conținutul de sulf din combustibil cuprins între $S_c = 0,3$ % și $S_c = 5,0$ %, printr-un număr de cel puțin cinci valori din intervalul considerat.

În vederea reducerii emisiei de SO_2 din gazele de ardere, instalația de ardere este prevăzută cu o instalație de desulfurare bazată pe procedeul hibrid uscat LIFAC, a cărei schemă de principiu este dată în reprezentarea grafică de mai jos:

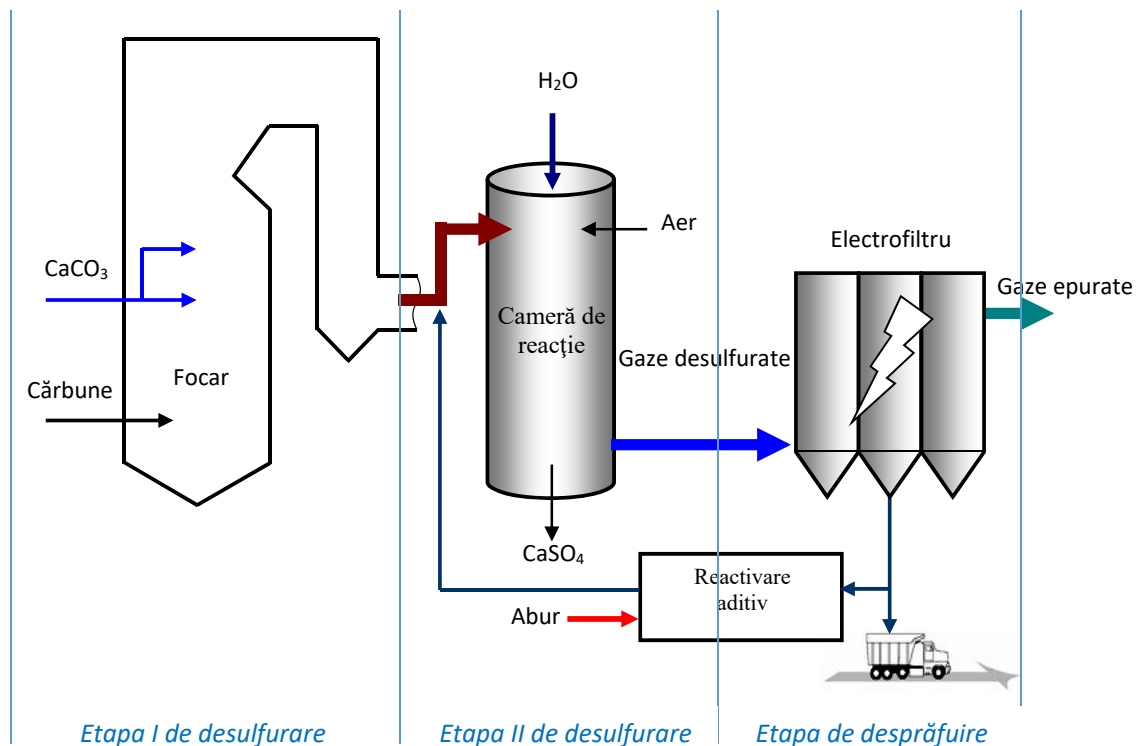


Fig.1. Schema de principiu a procedurii hibride de desulfurare de tip LIFAC

Desulfurarea implică două etape, și anume:

1. O etapă intracombustie, caracterizată de injectarea de calcar în focar. Această etapă este caracterizată printr-un grad relativ redus de desulfurare, notat η_1 , în majoritatea situațiilor reale eficiența desulfurării în prima etapă fiind de ordinul a 25 %, deoarece în această etapă se urmărește formarea unei cantități importante de CaO, ce urmează a fi activată în a doua etapă a tratării. Cu toate acestea, pentru a efectua o analiză parametrică, pentru eficiența desulfurării acestei etape se vor lua cel puțin două valori cuprinse între limitele $\eta_1 = 15 \% - 40 \%$.
2. O etapă postcombustie de tip cvasiuscat, în care se folosește excesul de CaO din prima etapă și care are gradul de desulfurare notat cu η_2 . Pentru a efectua o analiză parametrică și la nivelul acestei etape de desulfurare, pentru eficiența desulfurării acestei etape se vor lua cel puțin două valori, cuprinse între limitele $\eta_2 = 60 \% - 90 \%$.

Reacțiile aferente fiecărei etape se caracterizează, la rândul lor, printr-o anumită eficiență, care se reflectă prin consumul de substanță neutralizantă. Acest consum depinde, în plus, de gradul de recirculare și de reactivare a aditivului nereacționat, rezultat din cea de a doua etapă a tratării. În aceste condiții, calculele anterioare vor fi efectuate pentru trei situații distincte în ceea ce privește cantitatea de substanță neutralizantă intrată în sistem, și anume pentru următoarele rapoarte molare Ca/S:

- a) $(Ca/S)_1 = 1.75$;
- b) $(Ca/S)_2 = 1.5$;
- c) $(Ca/S)_3 = 2.00$.

Cele trei situații de mai sus corespund următoarelor regimuri de funcționare ale instalației de desulfurare:

- a) Funcționare normală a sistemului hibrid de desulfurare;
- b) Funcționare optimizată în ceea ce privește fluxurile de gaze și de aditiv – destul de dificil de obținut;
- c) Funcționare cu exces prea mare de $CaCO_3$, specifică schimbării regimului cazanului sau funcționării necorelate a sistemului de desulfurare cu parametrii cazanului deservit.

Pentru toate situațiile prezentate anterior, va trebui determinat consumul preliminar de substanță activă, necesară reducerii conținutului de SO_2 , din gazele de ardere, sub valoarea limită de 1700 mg/Nm^3 , valoare limită reglementată a emisiei pentru centralele de această putere.

În ultima etapă de calcul, trebuie determinată cantitatea de substanță solidă care rezultă din instalațiile de ardere și de desulfurare, cantitate care trebuie comparată cu limita maximă admisibilă a emisiei de particule solide în suspensie în gazele de ardere, valoarea specifică cazanului de această putere fiind de:

- 100 mg/Nm^3 – în cazul arderii cărbunilor;
- 50 mg/Nm^3 – în cazul arderii păcurii.

Astfel, calculele din ultima etapă au drept scop întocmirea unui bilanț masic de substanță solidă, pentru a putea calcula concentrația acesteia în gazele de ardere și a o compara cu limita maximă admisibilă de substanță aeropurtată în gazele de ardere.

În mod natural, pe lângă cantitatea de substanță neutralizantă nereacționată și pe lângă cantitatea de $CaSO_4$ rezultată prin desulfurare, în gazele de ardere se află și cenușa zburătoare provenită din combustibil. Cenușa zburătoare se formează din sterilul din combustibil. Pentru exemplele considerate în această analiză parametrică se vor considera următoarele valori ale conținutului procentual de steril, St , din cei trei combustibili considerați:

1. Pacură – $St_p = 0 \%$;
2. Lignit – $St_{l1} = 25 \%$; $St_{l2} = 30 \%$;
3. Huilă - $St_{h1} = 15 \%$; $St_{h2} = 20 \%$,

Algoritmul de calcul

Așa cum rezultă din enunțul problemei, trebuie determinată cantitatea de reactiv care trebuie introdusă în cele două etape ale sistemului de desulfurare, astfel încât emisia de SO₂ a instalației de ardere să se încadreze în limitele admisibile pentru centrala considerată, cantitatea suplimentară de substanță solidă urmând a se verifica dacă nu determină depășirea limitei admisibile de total particule aeropurtate, funcție de tipul de combustibil care alimentează cazanul energetic de puterea considerată.

Etapa I – Determinarea emisiei de SO₂ a cazanului energetic

Pentru a determina consumul preliminar de substanță activă, necesară reducerii conținutului de SO₂ din gazele de ardere, sub valoarea limită de 1700 mg/Nm³, etapa inițială a algoritmului de calcul constă în determinarea emisiei de SO₂ a instalației de ardere.

Funcție de concentrația procentuală, S_c , a sulfului din combustibil și de puterea calorifică inferioară a combustibilului, H_i , se calculează factorul de emisie pentru SO₂, astfel:

$$e_{SO_2} = \frac{M_{SO_2} \cdot S_c}{M_s \cdot 100} \cdot (1 - r) \text{ kg/kJ} \quad (1)$$

în care, semnificația notațiilor este următoarea:

M_{SO_2} - masa moleculară a SO₂, în kg/kmol,

Mărimă cunoscută - $M_{SO_2} = 64.059 \text{ kg/kmol}$;

M_s - masa moleculară a sulfului, în kg/kmol;

Mărimă cunoscută - $M_s = 32 \text{ kg/kmol}$;

S_c - cantitatea de sulf din combustibil, în %; (În enunțul problemei s-a specificat că se va considera conținutul de sulf din combustibil cuprins între $S_c = 0,3 \%$ și $S_c = 5,0 \%$, prin cel puțin trei valori distincte);

H_i - puterea calorifică inferioară a combustibilului, în kJ/kg;

În enunțul problemei s-a arătat că se consideră un cazan în care se arde păcură, un altul în care se arde lignit și respectiv un altul în care se arde huilă, pentru a obține o aceeași putere termică de 40 MWh, puterile calorifice inferioare ale celor trei combustibili fiind de:

1. Păcura - $H_{ip} = 39500$ kJ/kg;
2. Lignit - $H_{il} = 6700$ kJ/kg;
3. Huilă - $H_{ih} = 8100$ kJ/kg.

r - gradul de retenție a sulfului de către zgură și cenușă.

În calculele curente, se recomandă:

- $r = 0,20$ - pentru lignit,
- $r = 0,05$ - pentru huilă,
- $r = 0,00$ - pentru păcură și gaze naturale sau de sinteză.

Pentru exemplificare, în reprezentarea grafică din Fig. 2 se dă dependența factorilor de emisie de dioxid de sulf în funcție de conținutul de sulf din cei trei combustibili, factori dați în kg/kJ.

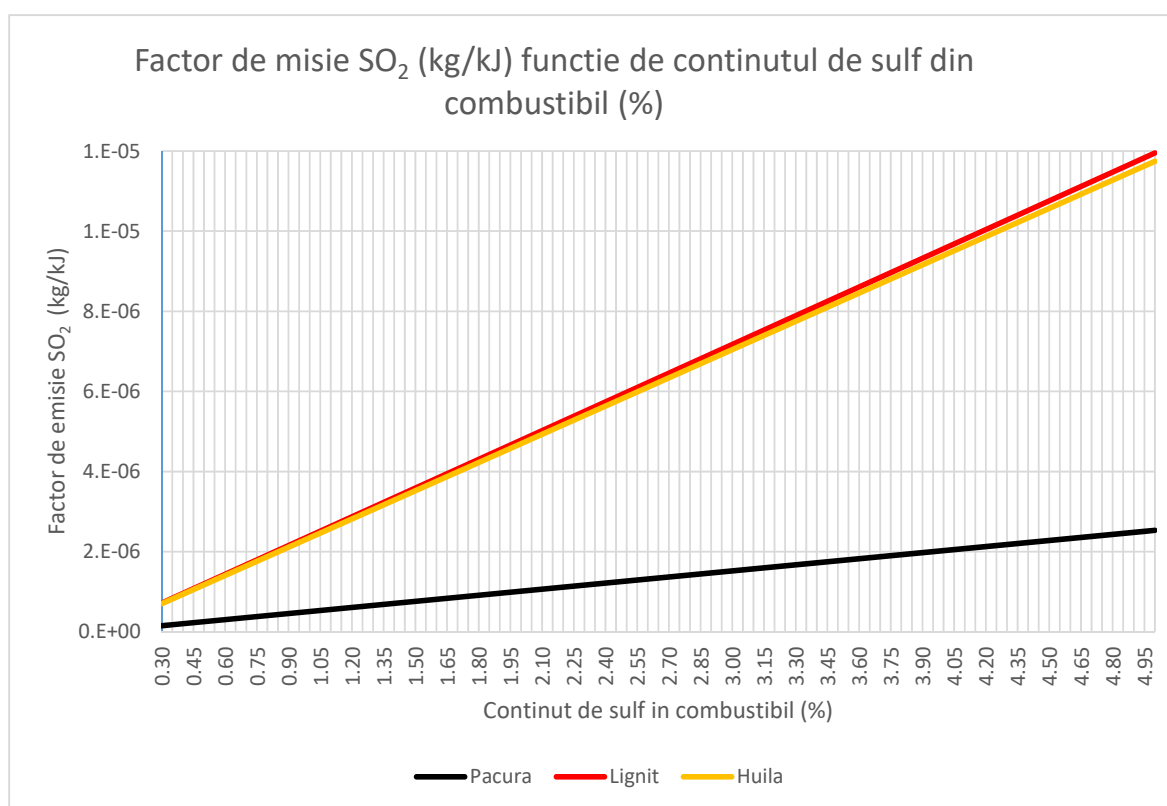


Fig. 2. Dependența factorilor de emisie de SO₂ funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați

Pentru a fi mai ușor de înțeles aspectele de ordin cantitativ, folosind relațiile de transformare între unitățile de energie kJ și respectiv MWh, reprezentarea grafică din Fig. 2 poate fi modificată prin trasarea dependenței factorului de emisie funcție de conținutul de sulf din combustibil, prin raportare la MWh, așa cum rezultă din reprezentarea grafică dată în Fig. 3.

Din cele două reprezentări grafice, se constată dependența lineară a factorului de emisie SO₂ funcție de conținutul de sulf din combustibil, așa cum, analitic, s-a putut observa din relația (1).

De asemenea, este de remarcat importanța pe care o are puterea calorifică a combustibilului pentru cantitatea de poluant eliberată în atmosferă pe unitatea de energie produsă, fiind foarte evident faptul

că utilizarea unui combustibil cu putere calorifică mare va genera o emisie mai redusă de SO₂, pentru obținerea aceleiași cantități de energie de la cazan, într-un interval de timp dat.

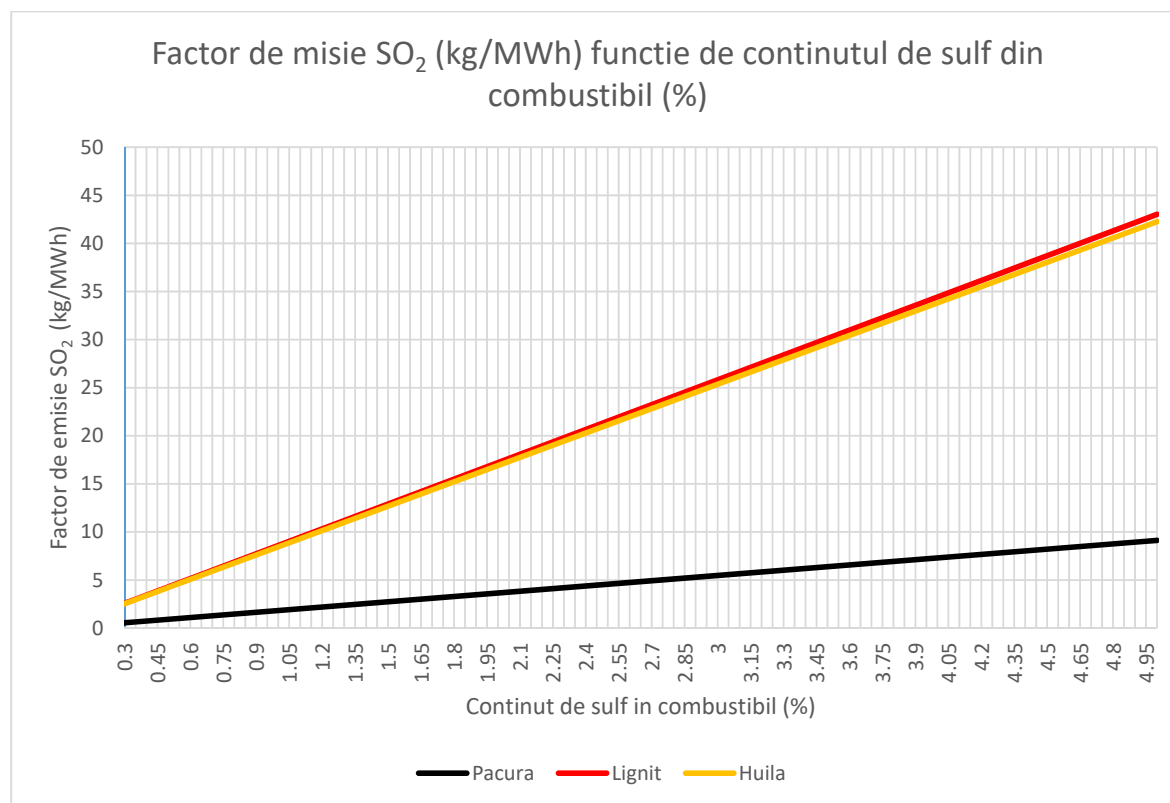


Fig. 3. Dependența factorilor de emisie de SO₂ funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați

Odată calculat factorul de emisie, utilizând o relație de forma (2), se poate calcula cantitatea de SO₂ evacuată în atmosferă, timp de o oră, pentru oricare dintre combustibilii analizați, astfel:

$$E_{SO_2} = B \cdot H_i \cdot e_{SO_2} \text{ kg/h}, \quad (2)$$

în care semnificația notațiilor este următoarea:

B - cantitatea de combustibil consumată orar (kg/h),

În enunțul problemei s-a arătat că se consideră un cazan în care se arde păcură, un altul în care se arde lignit și respectiv un altul în care se arde huilă, pentru a obține o aceeași putere termică de 40 MWh, consumurile orare de combustibil fiind:

1. Păcura - $B_p = 3646$ kg/h;
2. Lignit - $B_l = 21493$ kg/h;
3. Huilă - $B_h = 17778$ kg/h.

H_i - puterea calorifică a combustibilului (kJ/kg),

În enunțul problemei s-a arătat că se consideră un cazan în care se arde păcură, un altul în care se arde lignit și respectiv un altul în care se arde huilă, pentru a obține o aceeași putere termică de 40 MWh, puterile calorifice inferioare ale celor trei combustibili fiind de:

1. Păcura - $H_{ip} = 39500$ kJ/kg;
2. Lignit - $H_{il} = 6700$ kJ/kg;
3. Huilă - $H_{ih} = 8100$ kJ/kg.

e_{SO_2} - factorul de emisie corespunzător poluantului SO₂ (kg/kJ), funcție de combustibilul ars în cazan, factor de emisie dat de relația (1).

Dacă se particularizează relația (2) pentru fiecare dintre cei trei combustibili considerați, în condițiile enunțului problemei, rezultă dependența emisiei de SO₂ în atmosferă de concentrația de sulf din fiecare dintre cei trei combustibili, conform reprezentării grafice din Fig.4.

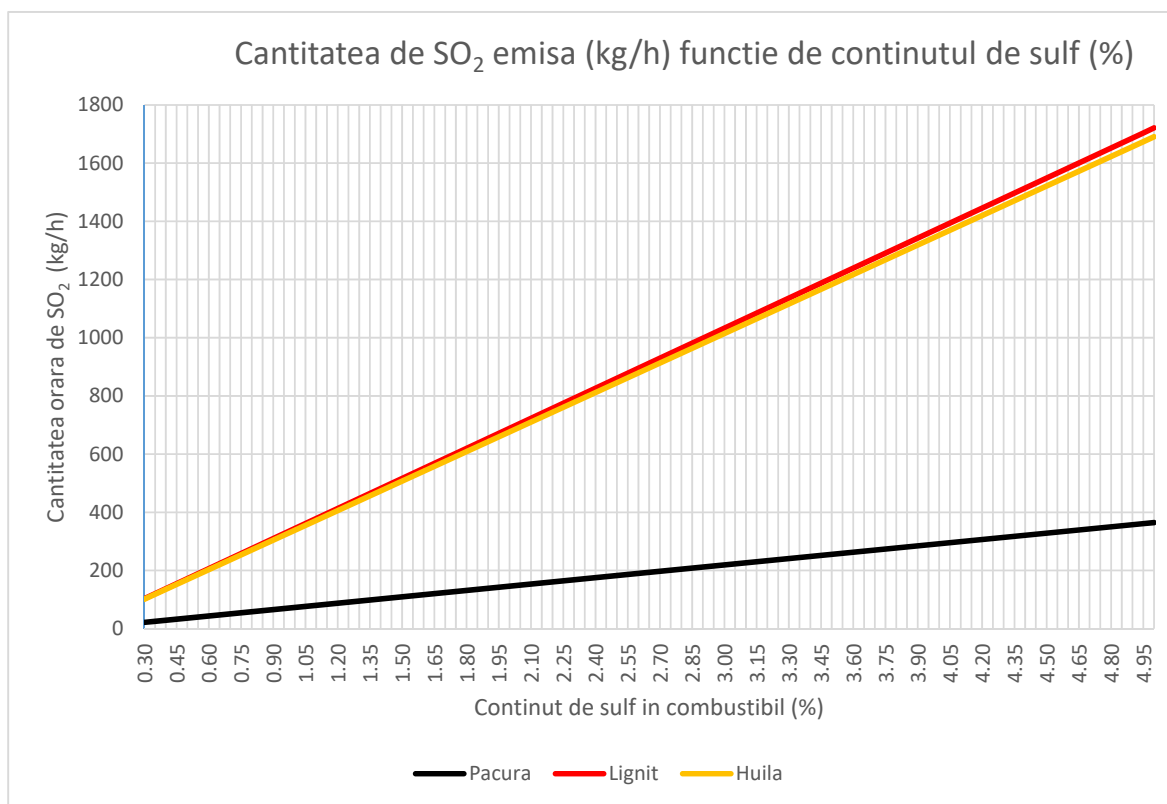


Fig. 4. Dependența cantității orare de SO₂ emise, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați

Din reprezentarea grafică dată în Fig. 4, se poate observa că emisia orară de SO₂ are, practic, aceeași dependență de concentrația de sulf din combustibil ca și dependența pe care o au factorii de emisie de această variabilă, așa cum era de așteptat atâta timp cât în relația (2) debitul de combustibil și puterea calorifică sunt în strânsă interdependență, în condițiile în care s-a impus aceeași putere termică furnizată de fiecare dintre cele trei cazane energetice.

Ultimul pas al algoritmului în ceea ce privește **etapa I**, de determinare a emisiei de SO₂ a fiecărui cazan energetic, este acela al calculării concentrației masice de SO₂ din gazele de ardere. Concentrația masică de SO₂ din gazele de ardere se calculează cu relația (3), astfel:

$$C_{SO_2} = \frac{E_{SO_2}}{B \cdot V_{gu}} \cdot 10^6 \text{ mg/Nm}^3. \quad (3)$$

Din care rezultă concentrația de dioxid de sulf din gazele de ardere, în mg pe m³ la presiune și temperatură standard pentru gazele de ardere uscate, notațiile având următoarea semnificație:

E_{SO_2} - cantitatea orară de SO₂ emisă în atmosferă, în kg/h;

B - consumul orar de combustibil (kg/h),

În enunțul problemei s-a arătat că se consideră un cazan în care se arde păcură, un altul în care se arde lignit și respectiv un altul în care se arde huilă, pentru a obține o aceeași putere termică de 40 MWh, consumurile orare de combustibil fiind:

1. Păcura - $B_p = 3646$ kg/h;
2. Lignit - $B_l = 21493$ kg/h;
3. Huilă - $B_h = 17778$ kg/h.

V_{gu} – volumul de gaze de ardere uscate raportat la cantitate de combustibil ars, în Nm^3/kg .

Volumul de gaze uscate, raportat la cantitate de combustibil ars, se dă pentru combustibilul păcură astfel:

1. Pentru păcură, $V_{gup} = 10,23$ Nm^3/kg ;

volumul de gaze de ardere pentru lignit și respectiv pentru huilă rezultând prin aplicarea factorilor de volum (F_V) la valoarea volumului de gaze uscate raportat la cantitatea de combustibil ars valabil pentru păcură.

Factorul de volum, definit ca raportul dintre volumul total de gaze de ardere rezultate și cantitatea de căldură aferentă combustibilului ars în cazan, măsurat în Nm^3/GJ .

Pentru factorul de volum, în literatura de specialitate se indică următoarele valori:

- $F_V = 480$ Nm^3/GJ - pentru lignit,
- $F_V = 380$ Nm^3/GJ - pentru huilă,
- $F_V = 290$ Nm^3/GJ - pentru păcură,
- $F_V = 320$ Nm^3/GJ - pentru gaze naturale.

Astfel, pentru combustibilul lignit și pentru combustibilul huilă pot fi făcute următoarele calcule:

$$V_{gul} = \frac{F_{Vl}}{F_{Vp}} \cdot V_{gup} = \frac{480}{290} \cdot 10,23 = 16,93 \text{ Nm}^3/\text{kg}; \quad V_{guh} = \frac{F_{Vh}}{F_{Vp}} \cdot V_{gup} = \frac{380}{290} \cdot 10,23 = 13,40 \text{ Nm}^3/\text{kg},$$

rezultând volumul de gaze de ardere uscate raportat la cantitate de combustibil ars, astfel:

2. Pentru lignit, $V_{gul} = 16,93$ Nm^3/kg ;
3. Pentru huilă, $V_{guh} = 13,40$ Nm^3/kg ,

Particularizând relația (3) pentru datele problemei, se obține reprezentarea grafică din Fig. 5.

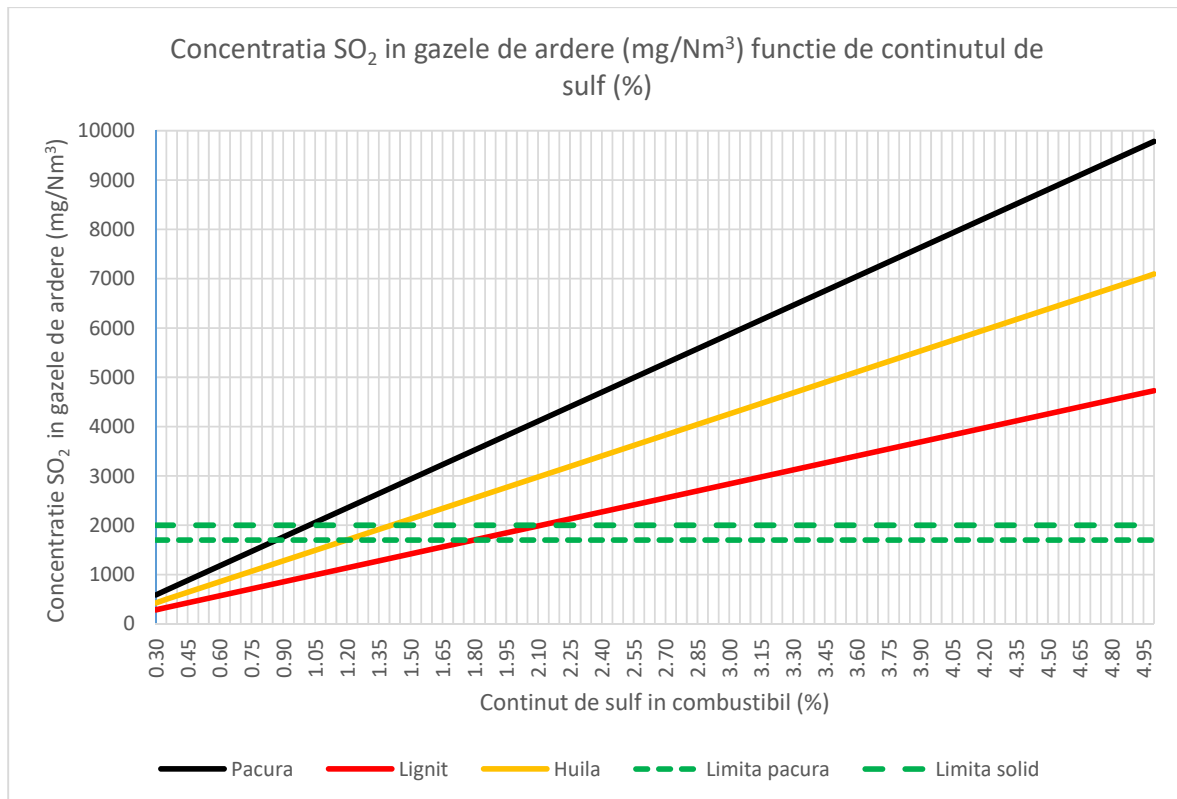


Fig. 5. Dependența concentrației de SO_2 din gazele de ardere, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, coroborat cu limitele maxime admisibile ale concentrației pentru cazanele de această putere

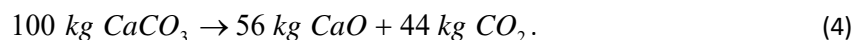
Dacă se analizează, în manieră comparativă, curbele din Fig. 4 și din Fig. 5, se constată că în cazul păcurii se depășește limita admisibilă a concentrației de poluant din gazele de ardere la o concentrație mai mică de sulf în combustibil, cu toate că cantitatea de SO₂ emisă în atmosferă este mai mică decât în cazul celorlalți doi combustibili. Aici, trebuie făcută coroborarea între cantitatea de SO₂ din gazele de ardere și volumul de gaze de ardere uscate în care se află această cantitate. Așa cum se poate observa, volumul de gaze uscate rezultate pe kilogramul de combustibil ars are cea mai mică valoare în cazul combustibilului păcură, efect al puterii calorifice mari a acestui combustibil. În consecință, concentrația maximă admisibilă de SO₂ în gazele de ardere, se va atinge la o concentrație mai mică de sulf în combustibil.

Etapa II – Determinarea cantității de substanță neutralizantă necesare

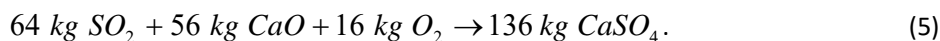
Coroborând concentrația de SO₂ din gazele de ardere rezultată cu limita admisibilă de 1700 mg/Nm³, se va putea trece la a doua parte a problemei și anume aceea de calcul a cantității de substanță neutralizantă.

Pentru a determina cantitatea reală de substanță neutralizantă utilizată, precum și concentrația SO₂ în gazele de ardere, în condițiile tratării intracombustie și postcombustie, se parcurg următoarele etape:

Cantitatea de CaCO₃ introdusă în focar, la temperaturi mai mari de 1100 °C, calcinează, iar reacția chimică respectivă, în unități cantitative, poate fi scrisă sub forma:



Urmează, apoi, reacția de legare chimică a SO₂ de către CaO, în prezența oxigenului, sub formă de CaSO₄, reacție care, în unități cantitative, este de următoarea formă:



Din relațiile (4) și (5) rezultă că pentru legarea a 64 kg de SO₂ sunt necesare, în condiții ideale (exponentul *i* în relațiile (6) și respectiv (7)), 100 kg de CaCO₃, iar din această reacție va rezulta o cantitate de 136 kg de CaSO₄. Astfel, cantitățile orare de CaCO₃ și de CaSO₄ care intră în sistem și respectiv ies din sistem, în condiții stoichiometrice, sunt date de relațiile:

$$C_{CaCO_3}^i = \frac{100}{64} \cdot E_{SO_2} \quad (\text{kg/h}), \quad (6)$$

$$C_{CaSO_4}^i = \frac{136}{64} \cdot E_{SO_2} \quad (\text{kg/h}), \quad (7)$$

în care E_{SO_2} este cantitatea de SO₂ evacuată în atmosferă, timp de o oră, calculată în etapa anterioară pe baza relației (2).

În mod evident, reacțiile chimice nu se desfășoară, din multe considerente, în condiții ideale, motiv pentru care cantitățile de CaCO₃ introduse în focar trebuie multiplicat cu raportul corespunzător (Ca/S), care să evidențieze condițiile reale. Astfel, cantitatea reală (exponent *r* în relația (8)) de CaCO₃ introdusă în focar va fi dată de relația:

$$C_{CaCO_3}^r = (Ca / S) \cdot C_{CaCO_3}^i \text{ (kg/h)}, \quad (8)$$

iar, după calcinare, aceasta se transformă într-o anumită cantitate de CaO (particule solide) și de CO₂ (gaz), cantități reale date de relațiile:

$$C_{CaO}^r = 0,56 \cdot C_{CaCO_3}^r \text{ (kg/h)} \text{ și} \quad (9)$$

$$C_{CO_2}^r = 0,44 \cdot C_{CaCO_3}^r \text{ (kg/h)} \quad (10).$$

În urma tratării, în fiecare etapă va fi reținută o anumită cantitate de SO₂, astfel:

- Cantitatea orară (debitul) de SO₂ reținută în focar (indice *F*), adică în etapa intracombustie a tratării este dată de relația

$$(E_{SO_2})_F = \eta_1 \cdot E_{SO_2} = \eta_1 \cdot B \cdot H_i \cdot e_{SO_2} \text{ (kg/h)}, \quad (11)$$

cu aceeași semnificați a notațiilor ca și în prima parte a problemei, la care se adaugă randamentul desulfurării uscate, notat cu η_1 . Așa cum s-a arătat anterior, randamentul de desulfurare a etapei intracombustie se limitează la valoarea de 25 %, pentru a obține o cantitate mare de CaO. Totuși, pentru a efectua o analiză parametrică, pentru eficiența desulfurării acestei etape se vor lua cel puțin două valori cuprinse între limitele $\eta_1 = 15 \% - 40 \%$.

- Cantitatea orară (debitul) de SO₂ reținută în reactor (indice *R* în relația (12)), în etapa cvasiuscată, este dată de relația

$$(E_{SO_2})_R = \eta_2 \cdot [E_{SO_2} - (E_{SO_2})_F] = \eta_2 \cdot (1 - \eta_1) \cdot E_{SO_2} = \eta_2 \cdot (1 - \eta_1) \cdot B \cdot H_i \cdot e_{SO_2} \text{ (kg/h)}. \quad (12)$$

cu aceeași semnificați a notațiilor ca și în prima parte a problemei, la care se adaugă randamentul desulfurării cvasiuscate, notat cu η_2 .

- Cantitatea orară de SO₂ rămasă în gazele de ardere care sunt dirijate către electrofiltru (indice *Ef* în relația (13)) este dată de relația (14)

$$(E_{SO_2})_{Ef} = E_{SO_2} - (E_{SO_2})_F - (E_{SO_2})_R = (1 + \eta_1 \cdot \eta_2 - \eta_1 - \eta_2) \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)}. \quad (14)$$

Dacă se neglijează debitul de CO₂ rezultat prin calcinarea CaCO₃ în focar, atunci concentrația SO₂ în gazele de ardere uscate va fi dată de relația

$$C_{SO_2} = \frac{(E_{SO_2})_{Ef}}{B \cdot V_{gu}} \cdot 10^6 \text{ mg/Nm}^3, \quad (15)$$

cu aceeași semnificație a notațiilor ca și în prima parte a prezentării problemei.

Dacă se dorește să se ia în calcul și concentrația suplimentară a gazului CO₂ care rezultă prin calcinarea calcarului, în debitul total de gaze de ardere, rezultând, astfel, o concentrație ceva mai mică a SO₂ în gazele de ardere, atunci se pleacă de la observația că, în condiții normale de presiune și temperatură, volumul molar al gazului CO₂ este de

$$24,465 \text{ l/mol.}$$

Coroborând cu cele arătate mai sus, rezultă că 44 kg de CO₂ au un volum de 24,465 Nm³, în condiții normale de presiune și temperatură.

În plus, debitul volumetric orar de CO₂ va rezulta dintr-o relație de forma

$$E_{CO_2} = 24,465 \cdot \frac{C_{CO_2}^r}{44} \text{ (Nm}^3\text{/h)}. \quad (16)$$

în care cantitatea de la numărător fracției este debitul masic real de CO₂ rezultat prin calcinarea calcarului introdus în focar.

De exemplu, dacă pentru combustibilul păcură, în problema dată se calculează debitul orar de gaze de ardere, acest rezultă

$$D_{gap} = B_p \cdot V_{gup} = 3646 \cdot 10,23 = 37298 \text{ (Nm}^3\text{/h)}.$$

Pentru valori rezonabile ale gradului de control al emisiei de SO₂ în focar, se obține un debit masic de CO₂ dat de relația (10), de aproximativ 285 kg/h, rezultând debitul volumetric de CO₂ dat de relația (16)

$$E_{CO_2} = 24,465 \cdot \frac{285}{44} = 158,46 \text{ (Nm}^3\text{/h)}.$$

Se poate observa că această cantitate reprezentând doar 0,42 % din volumul total de gaze de ardere uscate. În consecință, pentru calcule inginerești nu trebuie făcută această corecție, concentrația de SO₂ din gazele de ardere rezultând, de fapt, cu foarte puțin mai mică decât în cazul neglijării debitului volumetric de CO₂ care rezultă prin calcinarea calcarului introdus în focar.

Dacă se dorește, totuși, să se ia în considerare și acest debit de gaz, atunci relația de calcul a concentrației de SO₂ din gazele de ardere devine de forma

$$C_{SO_2} = \frac{(E_{SO_2})_{Ef}}{B \cdot V_{gu} - E_{CO_2}} \cdot 10^6 \text{ mg/Nm}^3. \quad (17)$$

Așa cum s-a arătat și anterior, în mod evident, valoarea rezultată a concentrației de SO₂ din gazele de ardere trebuie comparată cu limita admisibilă de 1700 mg/Nm³ – pentru cazul arderii păcurei și de 2000 mg/Nm³ – pentru cazul arderii cărbunilor, specifică cazanului de această putere.

Coroborând informațiile din această a doua parte a problemei cu acelea din prima parte, niște exemple de rezultate ar putea fi următoarele:

Cantitatea de CaCO₃ consumată pentru cele trei tipuri de combustibil, pentru un raport Ca/S = 1,75, funcție de conținutul de S din combustibil este de forma celei prezentate în Fig. 6:

Dacă se fac calculele pentru a determina concentrația de SO₂ din gazele de ardere, în următoarele condiții:

- Cantitatea de aditiv introdusă în focar în raport molar Ca/S = 1,75 u.r.
- Randamentul în etapa intracombustie a desulfurării $\eta_1 = 30 \%$;
- Randamentul în etapa postcombustie a desulfurării $\eta_2 = 70 \%$;

atunci se obține reprezentarea grafică a dependenței concentrației de SO₂ funcție de conținutul de sulf din combustibil de tipul celei date în Fig. 7.

Se poate constata că rezultă concentrații ale SO₂ în gazele de ardere mult inferioare limitei admisibile de 1700 mg/Nm³, mai puțin în cazul păcurei cu mai mult de 4,10 % S.

În consecință, trebuie făcută o analiză asupra parametrilor cantitate de aditiv și grade de desulfurare în cele două etape, în vederea optimizării procesului.

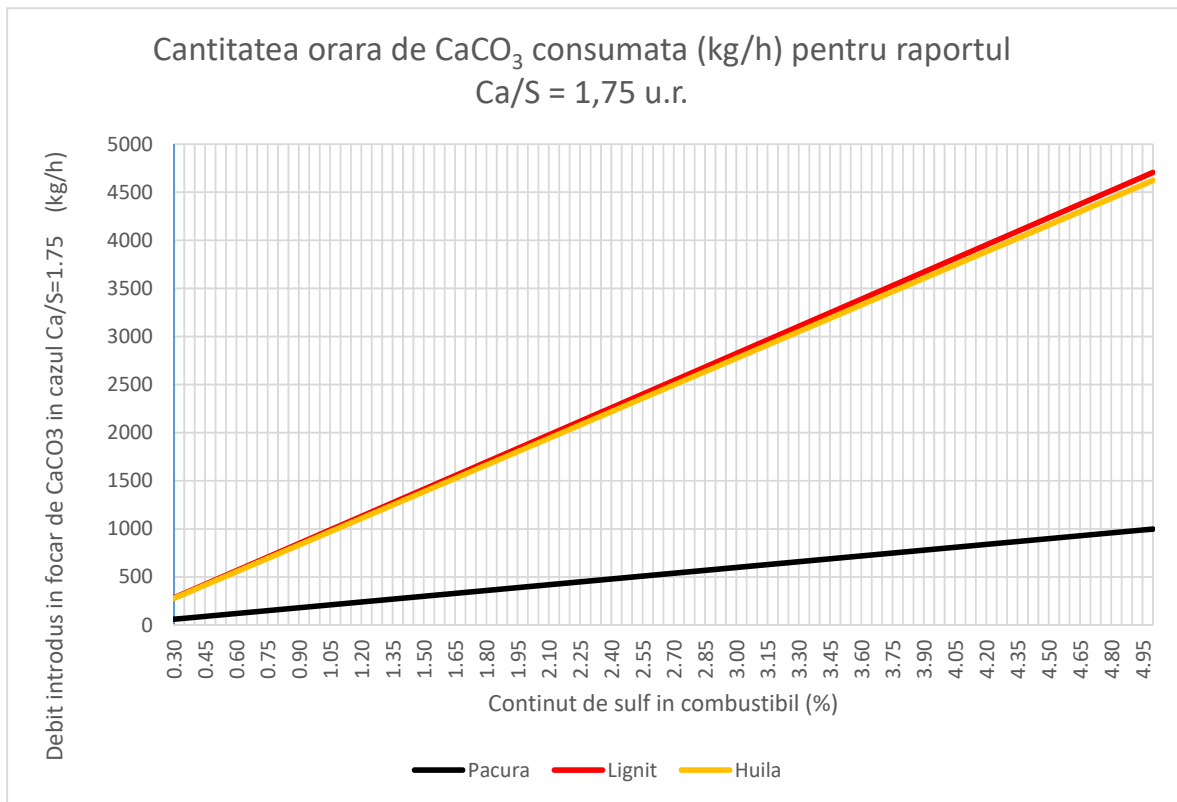


Fig. 6. Dependența cantității orare de calcar consumate funcție de concentrația de sulf din cei trei combustibili considerați

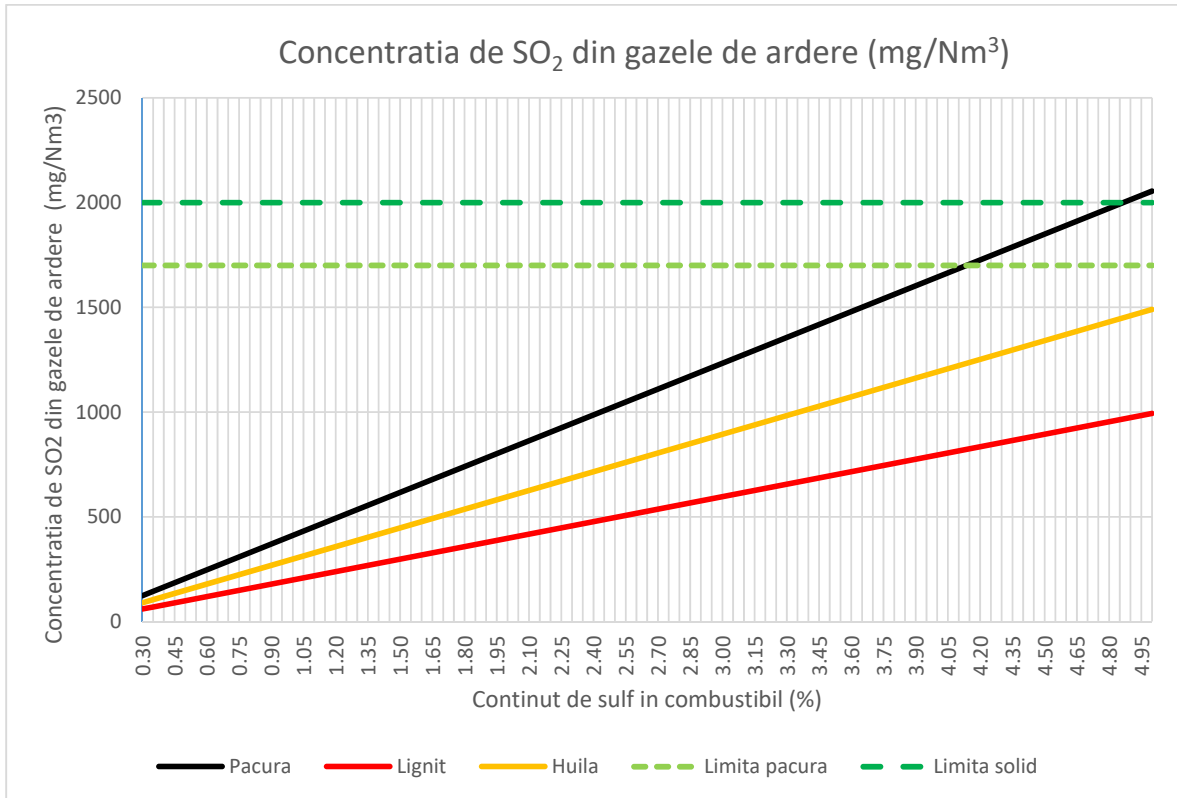


Fig. 7. Dependența concentrației de SO_2 din gazele de ardere funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în urma tratării coroborat cu limitele maxime admisibile ale concentrației poluantului SO_2

Dacă se reia calcul din exemplul anterior pentru următoarele valori:

- Cantitatea de aditiv introdusă în focar în raport molar Ca/S = 1,75 u.r.
- Randamentul în etapa intracombustie a desulfurării $\eta_1 = 25\%$;
- Randamentul în etapa postcombustie a desulfurării $\eta_2 = 75\%$;

se constată că se înregistrează o creștere a eficienței generale a sistemului, în ceea ce privește desulfurarea, singurii combustibili dintre cei analizați care nu se încadrează în limita maximă admisibilă a emisiei fiind cei din categoria păcură cu conținut de sulf mai mare de 4,65 %, așa cum rezultă din reprezentarea grafică dată în Fig. 8.

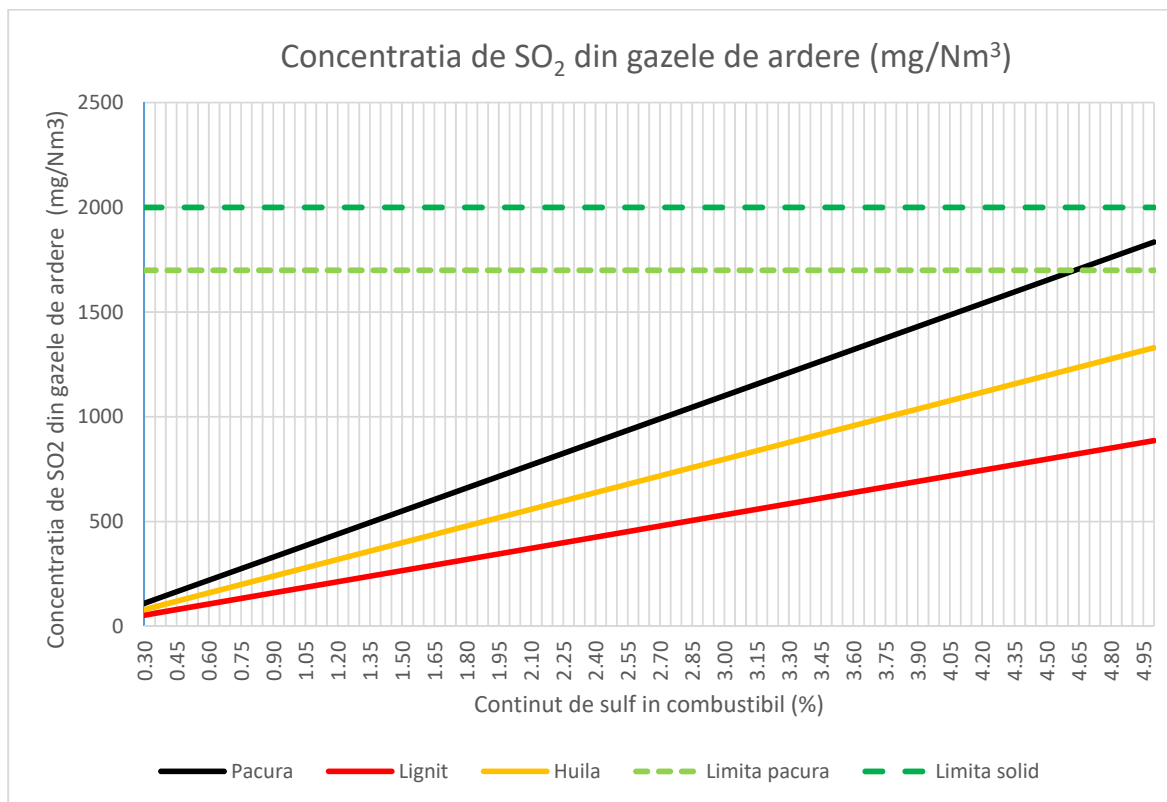


Fig. 8. Dependența concentrației de SO₂ din gazele de ardere funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în urma tratării coroborat cu limitele maxime admisibile ale concentrației poluantului SO₂

Etapa III – Determinarea cantității de substanță solidă aflată în suspensie în gazele de ardere

În această etapă se continuă analiza începută anterior, în sensul calculării cantității de substanță solidă care rezultă din instalațiile de ardere și de desulfurare. Așa cum s-a arătat din enunțul problemei, calculele se vor face pentru trei situații distincte în ceea ce privește cantitatea de substanță neutralizantă intrată în sistem, și anume pentru rapoartele Ca/S:

- $(Ca/S)_1 = 1.75;$
- $(Ca/S)_2 = 1.5;$
- $(Ca/S)_3 = 2.00.$

Cele trei situații de mai sus corespund:

- Funcționare normală a sistemului hibrid de desulfurare;
- Funcționare optimizată în ceea ce privește fluxurile de gaze și de aditiv – destul de dificil de obținut;
- Funcționare cu exces prea mare de $CaCO_3$, specifică schimbării regimului cazanului sau funcționării necorelate a sistemului de desulfurare cu parametrii cazanului deservit.

Aceste calcule au drept scop întocmirea unui bilanț masic de substanță solidă, pentru a putea calcula concentrația acestuia în gazele de ardere și a o compara cu limita maximă admisibilă de substanță solidă aeropurtată în gazele de ardere.

În mod natural, pe lângă cantitatea de substanță neutralizantă nereacționată și de cantitatea de $CaSO_4$ rezultată prin desulfurare, în gazele de ardere se află și cenușa zburătoare provenită din combustibil. Cenușa zburătoare se formează din sterilul din combustibil. Pentru exemplele considerate în această analiză parametrică se vor considera următoarele valori ale conținutului procentual de steril (St):

- Pacură – $St_p = 0 \%$;
- Lignit – $St_{l1} = 25 \%$; $St_{l2} = 30 \%$;
- Huile – $St_{h1} = 15 \%$; $St_{h2} = 20 \%$,

În etapa a doua, s-au calculat cantitățile ideale și reale de $CaCO_3$ care intră în reacție, funcție de cantitatea de SO_2 din gazele de ardere, cantitățile ideale de $CaSO_4$ care ies din reacție, precum și cantitățile reale de substanță, astfel:

$$C_{CaCO_3}^i = \frac{100}{64} \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)},$$

$$C_{CaSO_4}^i = \frac{136}{64} \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)},$$

$$C_{CaCO_3}^r = (Ca/S) \cdot C_{CaCO_3}^i \text{ (kg/h)},$$

$$C_{CaO}^r = 0,56 \cdot C_{CaCO_3}^r \text{ (kg/h)},$$

$$C_{CO_2}^r = 0,44 \cdot C_{CaCO_3}^r \text{ (kg/h)}.$$

În care E_{SO_2} cantitatea de SO_2 evacuată în atmosferă, timp de o oră, calculată în prima etapă cu relația

$$E_{SO_2} = B \cdot H_i \cdot e_{SO_2} \text{ (kg/h)},$$

în care semnificația notațiilor este:

B - cantitatea de combustibil consumată orar (kg/h),

H_i - puterea calorică a combustibilului (kJ/kg),

e_{SO_2} - factorul de emisie corespunzător poluantului SO_2 (kg/kJ).

Factorul de emisie, s-a calculat, de asemenea, în prima etapă, cu o relație de forma

$$e_{SO_2} = \frac{M_{SO_2} \cdot S_c}{M_S \cdot 100} \cdot (1 - r) \text{ kg/kJ}$$

în care, semnificația notațiilor este următoarea:

M_{SO_2} - masa moleculară a SO_2 , în kg/kmol;

M_S - masa moleculară a sulfului, în kg/kmol;

S_c - cantitatea de sulf din combustibil, în %;

H_i - puterea calorică inferioară a combustibilului, în kJ/kg;

r - gradul de retenție a sulfului de către zgură și cenușă.

În acest fel, pot fi calculate celelalte componente ale bilanțului masic de substanță solidă, astfel:

- Cantitatea orară de CaO care se combină cu SO_2 direct în focar (indice F în relația (18)):

$$(E_{CaO})_F = \frac{56}{64} \cdot (E_{SO_2})_F = \frac{56}{64} \cdot \eta_1 \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)}, \quad (18)$$

- Cantitatea orară de CaO care se combină cu SO_2 în reactor (indice R în relația (19)):

$$(E_{CaO})_R = \frac{56}{64} \cdot (E_{SO_2})_R = \frac{56}{64} \cdot \eta_2 \cdot (1 - \eta_1) \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)}, \quad (19)$$

- Cantitatea orară de CaO care rămâne nereacționat și urmează a fi reținut la electrofiltru (indice Ef în relația (20)):

$$(E_{CaO})_{Ef} = C_{CaO}^r - (E_{CaO})_F - (E_{CaO})_R \text{ (kg/h)}, \quad (20)$$

- Cantitatea orară de $CaSO_4$ care se formează direct în focar (indice F în relația (21)):

$$(E_{CaSO_4})_F = \frac{136}{64} \cdot (E_{SO_2})_F = \frac{136}{64} \cdot \eta_1 \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)}, \quad (21)$$

- Cantitatea orară de $CaSO_4$ care se formează în reactor (indice R în relația (22)):

$$(E_{CaSO_4})_R = \frac{136}{64} \cdot (E_{SO_2})_R = \frac{136}{64} \cdot \eta_2 \cdot (1 - \eta_1) \cdot E_{SO_2} \text{ (kg/h)}, \quad (22)$$

- Debitul de substanță solidă, sub formă de particule, care intră în electrofiltru doar ca efect al tratării gazelor de ardere cu compus calcic:

$$(E_{calcic})_{Ef} = (E_{CaO})_{Ef} + (E_{CaSO_4})_F + (E_{CaSO_4})_R \text{ (kg/h)}, \quad (23)$$

- Debitul total de substanță solidă, sub formă de particule, care intră în electrofiltru prin sumarea debitelor de cenușă zburătoare cu acelea de compuși calcici:

$$(E_{praf})_{Ef} = (E_{calcic})_{Ef} + St \cdot B \text{ (kg/h)}, \quad (24)$$

în care St este concentrația procentuală de steril din combustibil, iar B este consumul orar de combustibil.

Ca și în cazul calculării concentrației de SO_2 din gazele de ardere, se poate calcula și concentrația de particule aeropurtate din gazele de ardere, la intrare în electrofiltru, cu o relație de forma:

$$(C_{praf})_{Ef} = \frac{(E_{praf})_{Ef}}{B \cdot V_{gu}} \cdot 10^6 \text{ mg/Nm}^3, \quad (25)$$

în care mărimea de la numărător este dată de relația (24), iar la numitor este produsul dintre debitul orar de combustibil introdus în cazan, B , și volumul de gaze de ardere uscate raportat la cantitate de combustibil ars, V_{gu} .

Dacă presupunem că electrofiltrul are un randament de retenție notat cu η_{Ef} , concentrația de particule aeropurtate în gazele de ardere, la ieșirea din electrofiltru, este dată de relația

$$C_{praf} = (1 - \eta_{Ef}) \cdot (C_{praf})_{Ef} \text{ mg/Nm}^3, \quad (26)$$

rezultatul acestui ultim calcul urmând a fi comparat cu limita maximă admisibilă a concentrației de poluant din gazele de ardere, funcție de tipul combustibilului ars în cazan, astfel: 100 mg/Nm^3 – în cazul arderii cărbunilor și de 50 mg/Nm^3 – în cazul arderii păcurii, valori specifice cazanului de această putere.

În calculele de concentrație a particulelor în gazele de ardere, poate fi neglijată influența pe care o are debitul de CO_2 rezultat prin calcinarea calcarului, așa cum s-a arătat în partea a doua a problemei, eroarea fiind mai mică de 0,42 % în cazul păcurii și, evident, mult mai mică în cazul arderii lignitului și a huilei.

Coroborând informațiile din această a treia parte a problemei cu acelea din prima parte și din cea de a doua parte, câteva exemple de rezultate ale analizei sunt următoarele:

Astfel, cantitatea de CaO nereacționată care ajunge la electrofiltru, pentru cele trei tipuri de combustibil și un raport molar Ca/S = 1,75, funcție de conținutul de S din combustibil este de forma celei prezentate în graficul din Fig. 9, curbele fiind trasate pe baza relației (20):

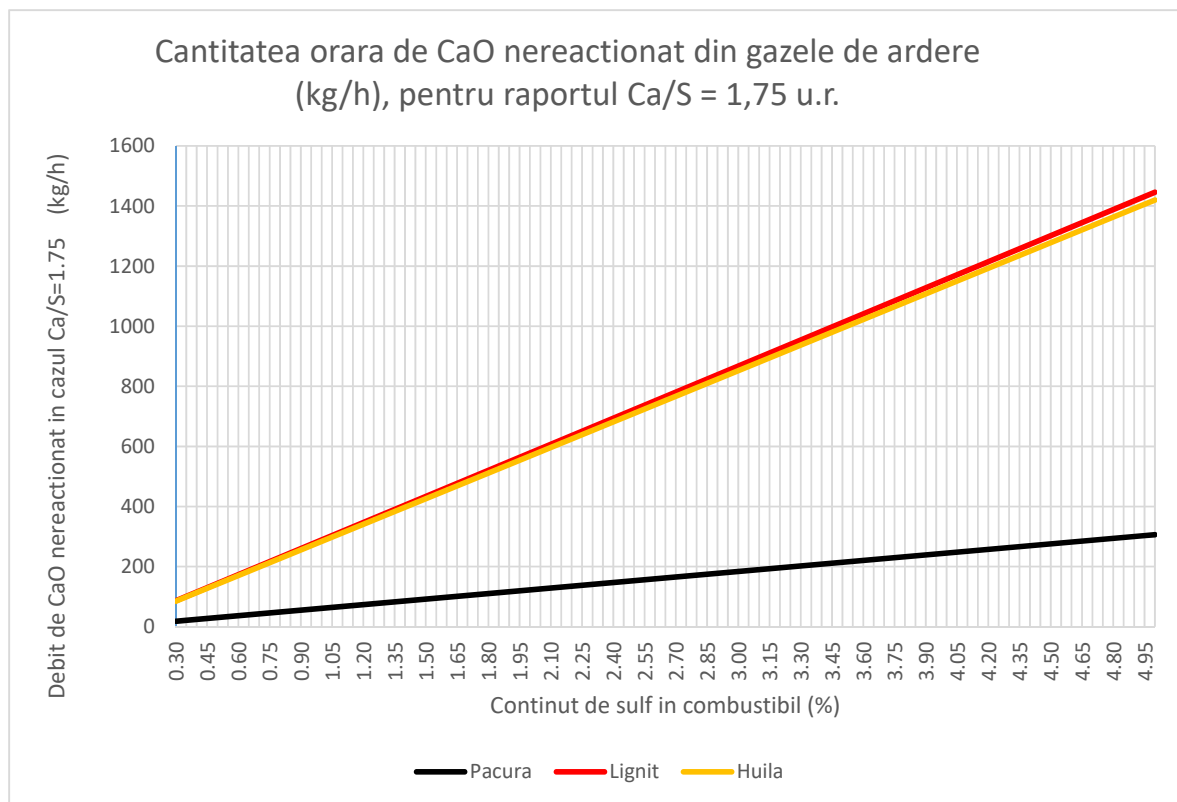


Fig. 9. Dependența cantității orare de CaO nereacționat aflat în gazele de ardere, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în condițiile în care cantitatea de aditiv introdusă în sistem este Ca/S = 1,75 u.r.

Cantitatea de CaSO_4 care a rezultat în urma reacțiilor din focar și din reactor și care ajunge la electrofiltru, pentru cele trei tipuri de combustibil și un raport $\text{Ca/S} = 1,75$, funcție de conținutul de S din combustibil este dată în curbele din figura 10, pe baza relațiilor (21) și (22).

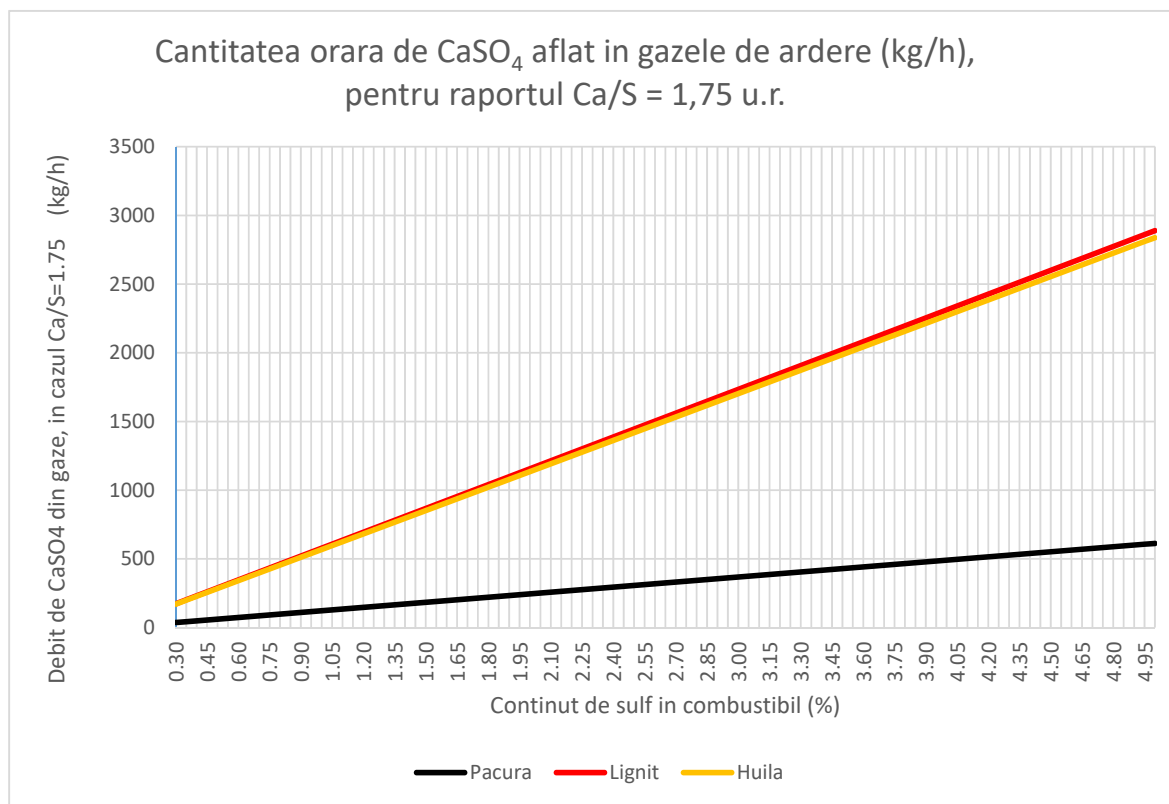


Fig. 10. Dependența cantității orare de CaSO_4 aflat în gazele de ardere, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în condițiile în care cantitatea de aditiv introdusă în sistem este $\text{Ca/S} = 1,75$ u.r.

Pentru combustibilul lignit, dacă tratarea se face cu calcar în raportul molar $\text{Ca/S} = 1,75$, componentele emisiei de particule aerportate rezultă din graficul dat în Fig. 11.

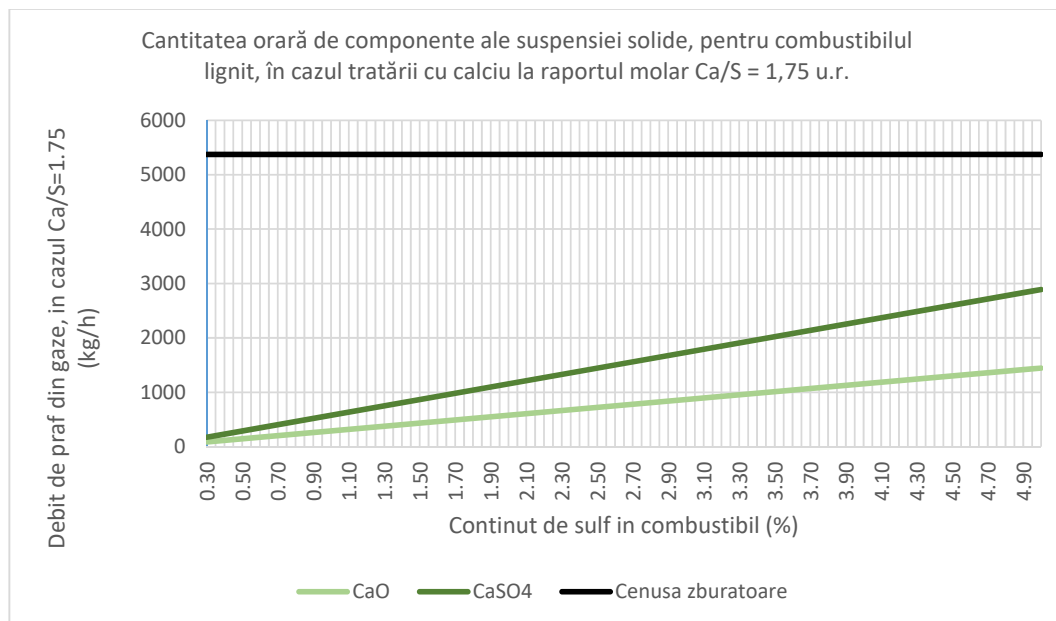


Fig. 11. Componentele emisiei de particule aerportate pentru combustibilul lignit

Cantitatea totală de pulbere care ajunge la electrofiltru, pentru cele trei tipuri de combustibil și un raport $Ca/S = 1,75$, funcție de conținutul de S din combustibil este dată în curbele din figura 12, trasate în baza relației (24).

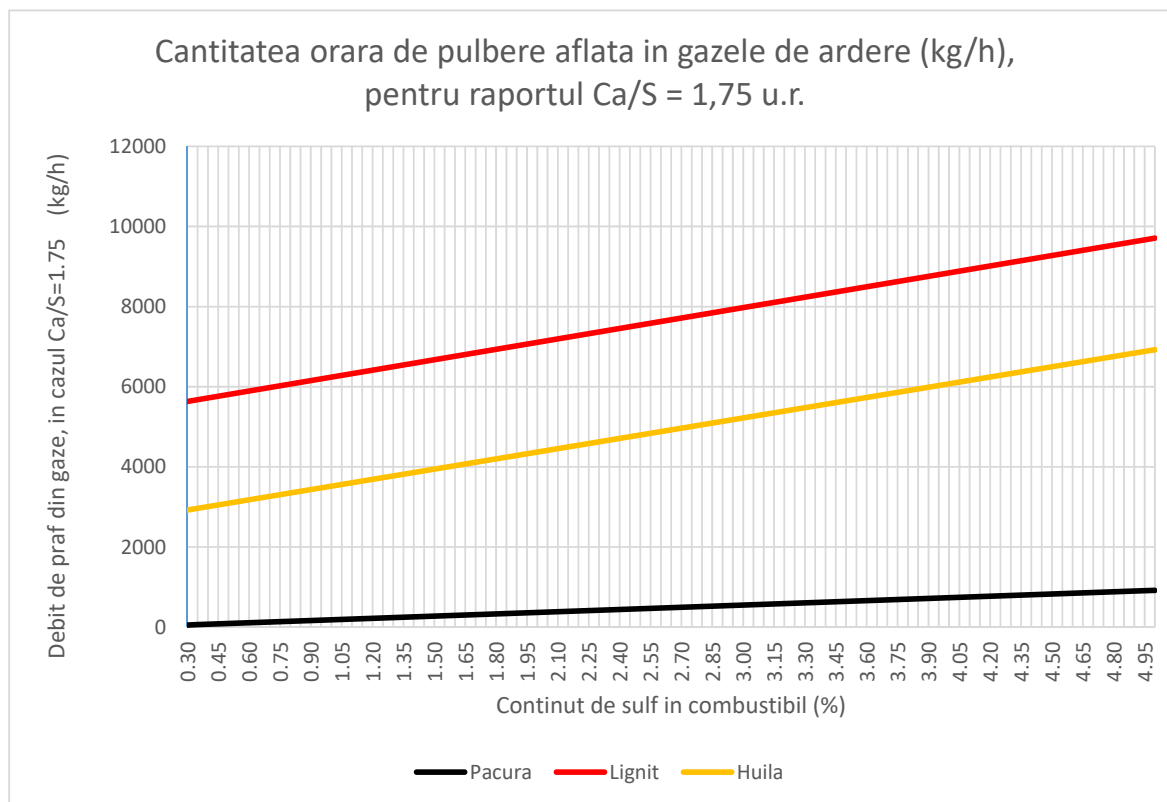


Fig. 12. Dependența cantității orare de pulbere aflată în suspensie în gazele de ardere, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în condițiile în care cantitatea de aditiv introdusă în sistem este $Ca/S = 1,75$

Concentrația de substanță solidă aeropurtată la nivelul coșului de fum, pentru aceleași situații prezentate anterior, funcție de concentrația de sulf din combustibil rezultă de forma curbelor redată în Fig. 13.

De remarcat că este depășită concentrația admisibilă pentru un conținut mai mare de 2 % sulf în păcură, pentru lignit atunci când conținutul de sulf depășește 2,1 %, iar pentru huilă atunci când conținutul de sulf depășește 2,45 %.

În consecință, trebuie luate măsuri de reducere a emisiei la ansamblul sistem de desulfurare – sistem de desprăfuire.

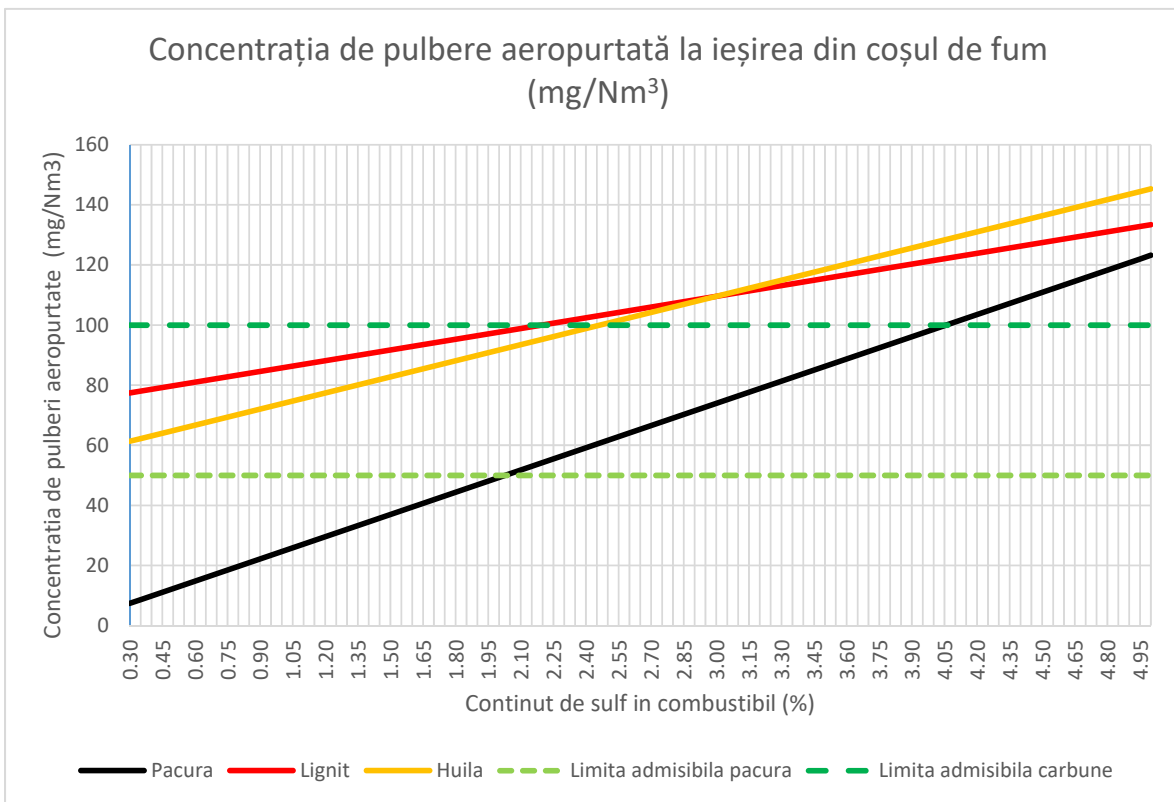


Fig. 13. Dependența concentrației substanței aeropurtate solide aflate în gazele de ardere, funcție de concentrația de S din cei trei combustibili considerați, în condițiile în care cantitatea de aditiv introdusă în sistem este Ca/S = 1,75 u.r. și în corelație cu concentrațiile maxime admisibile de pulbere pentru combustibili solizi și lichizi.