

## Aspecte termice negative datorate circulației neuniforme a agentului termic în rezervoarele de acumulare

Negative thermal issues due to uneven heat circulation in storage tanks

Prof. dr. ing. Florin Iordache

Universitatea Tehnică de Construcții București  
Bulevardul Lacul Tei 122-124, Sector 2, București, România  
E-mail: *fliord@yahoo.com*

**Rezumat:** Lucrarea de față își propune să identifice efectele adverse asupra performanței unităților de stocare termică, cauzate de fluxul de apă fără încălzire uniformă prin ele. Ea modelează procesele de transfer de căldură în regim inconstant care au loc cu rezervoare de stocare a căldurii lichide și determină corelațiile dintre performanța de stocare termică și neuniformitatea mișcării debitului prin intermediul unității de stocare. Rezultatele sunt prezentate grafic, astfel consecințele suferite de performanța de stocare termică să fie clare și ușor de asociat cu cauzele lor neuniformitatea de circulație de către unitatea de stocare.

**Abstract:** The present paper aims at identifying adverse effects on the performance the thermal storage units, caused by non uniform heating water flow through them. It shapes the processes of heat transfer in unsteady regime that occur with heat storage tanks liquid and determine correlations between thermal storage performance and the unevenness of the movement of flow through the storage unit. The results are shown graphically so the consequences suffered by the thermal storage performance to be clear and easy to associate with their causes the circulation unevenness by storage unit.

### 1. Introducere

Circulația neuniformă a agentului termic prin colectoarele solare care formează suprafața de captare, componenta principală a unei instalații de preparare a apei calde de consum, are consecințe negative asupra performanței energetice a instalației de utilizare a energiei solare [2]. La fel, circulația neuniformă a agentului termic prin corpurile de încălzire ale unei instalații de încălzire centrală are consecințe negative asupra alimentării cu căldură a consumatorului deservit de instalația de încălzire

centrala. In aceasta idee, in cadrul lucrarii de fata dorim sa prezentam consecintele negative ale circulatiei neuniforme a agentului termic prin rezervoarele de acumulare, fie asociate unei instalatii care utilizeaza energia solara fie asociate unei instalatii de preparare a apei calde.

Obiectivul urmarit in cadrul lucrarii este faptul ca circulatia neuniforma diminueaza rata de acumulare a energiei termice in ansamblul sistemului de stocare si de aici diminueaza performantele energetice ale sistemului in care este inclusa componenta de stocare termica.

## 2. Modelarea proceselor de acumulare termica

Dat fiind faptul ca acumulatorii de apa calda considerate sunt de tip diurn modelul matematic pe care il consideram are urmatoarele caracteristici aferente zonelor cu circulatie uniforma:

- distributia temperaturii apei calde dintr-o zona este uniforma;
- pierderile de caldura prin anvelopa zonei se neglijeaza;

In aceste conditii bilantul termic, in regim nestationar aferent unei zone de acumulare se poate scrie [1] :

$$G \cdot \rho c \cdot (t - \theta) = V \cdot \rho c \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad (1)$$

de unde :

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{C_T} \cdot (\theta - t) \quad (2)$$

unde :

$$C_T = \frac{V \cdot \rho c}{G \cdot \rho c} \quad (3)$$

Relatia (2) este o ecuatie diferentiala liniara de ordinal 1 neomogena prin temperatura  $t$ , aferenta debitului de apa care intra in zona de stocare considerata. Se va efectua analiza propusa in ipoteza alimentarii zonei de acumulare cu agent termic de temperatura ( $t$ ) constanta in timp. Cu aceasta ipoteza solutia ecuatiei diferentiale este:

$$\theta(\tau) = t - (t - \theta_0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{C_T}\right) \quad (4)$$

In consecinta cresterea temperaturii apei din zona de stocare dupa o perioada de timp  $\tau$ , in care temperatura debitului de agent termic la intrare are valoarea

Aspecte termice negative datorate circulației neuniforme a agentului termic în rezervoarele de acumulare constanta  $t$ , este :

$$\Delta\theta_{\tau} = \theta_{\tau} - \theta_0 = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{C_T}\right) \right] \cdot (t - \theta_0) \quad (5)$$

sau :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\tau} &= (1 - E_{\tau}) \cdot (t - \theta_0) \\ E_{\tau} &= \exp\left(-\frac{\tau}{C_T}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Să considerăm acum ca unitatea de stocaj termic este compusă din două zone de volume diferite însă care însumate compun volumul total de acumulare  $V$ . Fiecare din cele două zone este circulat de câte un debit de agent termic, suma celor două debite compun debitul total de agent termic  $G$ . Rapoartele între debitele de agent termic și volumele zonelor pot fi diferite între cele două zone sau pot fi egale, caz în care avem circulație uniformă pe ansamblul volumului de stocare. În această situație se analizează situația acumulării termice pe fiecare zonă în parte și rezultă :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{1\tau} &= (1 - E_{1\tau}) \cdot (t - \theta_0) \\ \Delta\theta_{2\tau} &= (1 - E_{2\tau}) \cdot (t - \theta_0) \end{aligned} \quad (7)$$

unde :

$$\begin{aligned} E_{1\tau} &= \exp\left(-\frac{\tau}{C_{T1}}\right) \\ E_{2\tau} &= \exp\left(-\frac{\tau}{C_{T2}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

și :

$$\begin{aligned} C_{T1} &= \frac{V_1 \cdot \rho c}{G_1 \cdot \rho c} \\ C_{T2} &= \frac{V_2 \cdot \rho c}{G_2 \cdot \rho c} \end{aligned} \quad (9)$$

cu :

$$\begin{aligned} V_1 + V_2 &= V \\ G_1 + G_2 &= G \end{aligned} \quad (10)$$

Daca notam :

$$\begin{aligned} rv1 &= \frac{V_1}{V} \\ rv2 &= \frac{V_2}{V} \\ rg1 &= \frac{G_1}{G} \\ rg2 &= \frac{G_2}{G} \end{aligned} \quad (11)$$

Atunci relatiile (9) devin :

$$\begin{aligned} C_{T1} &= \frac{V_1 \cdot \rho c}{G_1 \cdot \rho c} = \frac{rv1}{rg1} \cdot C_T \\ C_{T2} &= \frac{V_2 \cdot \rho c}{G_2 \cdot \rho c} = \frac{rv2}{rg2} \cdot C_T \end{aligned} \quad (12)$$

iar relatiile (8) :

$$\begin{aligned} E_{1\tau} &= \exp\left(-\frac{rg1}{rv1} \cdot \frac{\tau}{C_T}\right) = E_{\tau}^{rg1/rv1} \\ E_{2\tau} &= \exp\left(-\frac{rg2}{rv2} \cdot \frac{\tau}{C_T}\right) = E_{\tau}^{rg2/rv2} \end{aligned} \quad (13)$$

Desigur ca situatiile in care cotele **rg** si **rv** coincid ca valoare reprezinta cazuri in care circulatia zonelor de acumulare se face uniform iar situatiile in care cotele **rg** si **rv** sunt diferite reprezinta cazuri in care circulatia prin acumulator este neuniforma. O masura a dispersiei circulatiei (grad neuniformitate) prin unitatea de stocaj termic este data de valoarea absoluta a diferentei :  $|rg-rv|$ .

Cantitatea de energie termica acumulata in unitatea de stocaj dupa o perioada de timp,  $\tau$ , in ipoteza unei circulatii uniforme a agentului termic prin toata unitatea de stocaj este :

$$Q(\tau) = V \cdot \rho c \cdot \Delta\theta_{\tau} = V \cdot \rho c \cdot (1 - E_{\tau}) \cdot (t - \theta_0) \quad (14)$$

Aspecte termice negative datorate circulației neuniforme a agentului termic în rezervoarele de acumulare

Cantitatea maximă de energie termică ce va fi acumulată după un timp infinit de lung va fi :

$$Q_{MAX} = V \cdot \rho c \cdot (t - \theta_0) \quad (15)$$

De unde rezultă că variația în timp a raportului dintre cantitatea de energie termică acumulată în unitatea de stocaj până la un anumit moment de timp,  $\tau$ , și cantitatea de energie maximă ce va fi acumulată este :

$$rQ_{UNIF} = \frac{Q(\tau)}{Q_{MAX}} = (1 - E_\tau) \quad (16)$$

Puterea termică livrată din unitatea de stocaj (considerată relativ la valoarea temperaturii inițiale a apei din unitatea de stocaj) este :

$$P(\tau) = G \cdot \rho c \cdot \Delta\theta_\tau = G \cdot \rho c \cdot (1 - E_\tau) \cdot (t - \theta_0) \quad (17)$$

Puterea termică maximă care va putea fi livrată după un timp infinit de lung este :

$$P_{MAX} = G \cdot \rho c \cdot (t - \theta_0) \quad (18)$$

De unde rezultă că variația în timp a raportului dintre puterea termică livrată din unitatea de stocaj la un anumit moment de timp,  $\tau$ , și puterea termică maximă ce va fi livrată la timpul infinit, este :

$$rP_{UNIF} = \frac{P(\tau)}{P_{MAX}} = (1 - E_\tau) \quad (19)$$

În situația în care există o circulație neuniformă realizată prin 2 zone cu circulație uniformă fiecare situația se prezintă astfel :

- cantitatea de energie termică acumulată raportată la cantitatea maximă care va fi acumulată în final este :

$$rQ = \frac{Q1(\tau) + Q2(\tau)}{Q_{MAX}} = 1 - (rv1 \cdot E1_\tau + rv2 \cdot E2_\tau) \quad (20)$$

- puterea termică livrată raportată la puterea termică maximă care va fi livrată, este :

$$rP = \frac{P1(\tau) + P2(\tau)}{P_{MAX}} = 1 - (rg1 \cdot E1_{\tau} + rg2 \cdot E2_{\tau}) \quad (21)$$

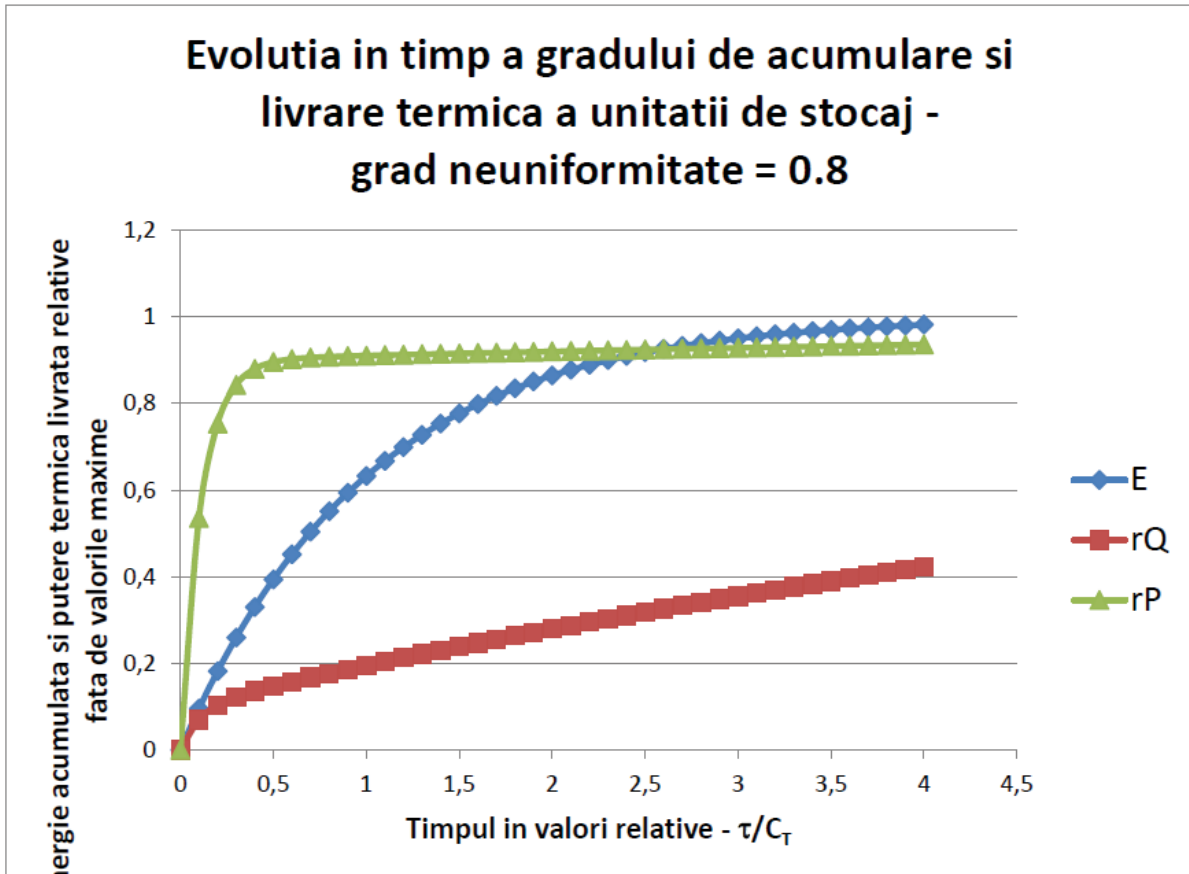


Fig. 1

In fig. 1 curba albastra reprezinta evolutia in timp a gradului de acumulare termica si a gradului de livrare termica din unitatea de stocaj in situatia in care gradul de neuniformitate al circulatiei unitatii de stocaj este de 0, adica circulatia este perfect uniforma. Curba rosie reprezinta evolutia in timp a gradului de acumulare termica iar curba verde reprezinta evolutia in timp a gradului de livrare termica din unitatea de stocaj in situatia in care gradul de neuniformitate al circulatiei unitatii de stocaj este 0.8. Se observa ca gradul de acumulare are o evolutie foarte lenta in timp ce livrarea de putere termica are o evolutie foarte rapida.

Daca gradul de neuniformitate al circulatiei unitatii de stocaj este mai scazut de exemplu 0.6 curba rosie si cea verde se mai apropie de cea albastra dupa cum se observa in fig. 2.

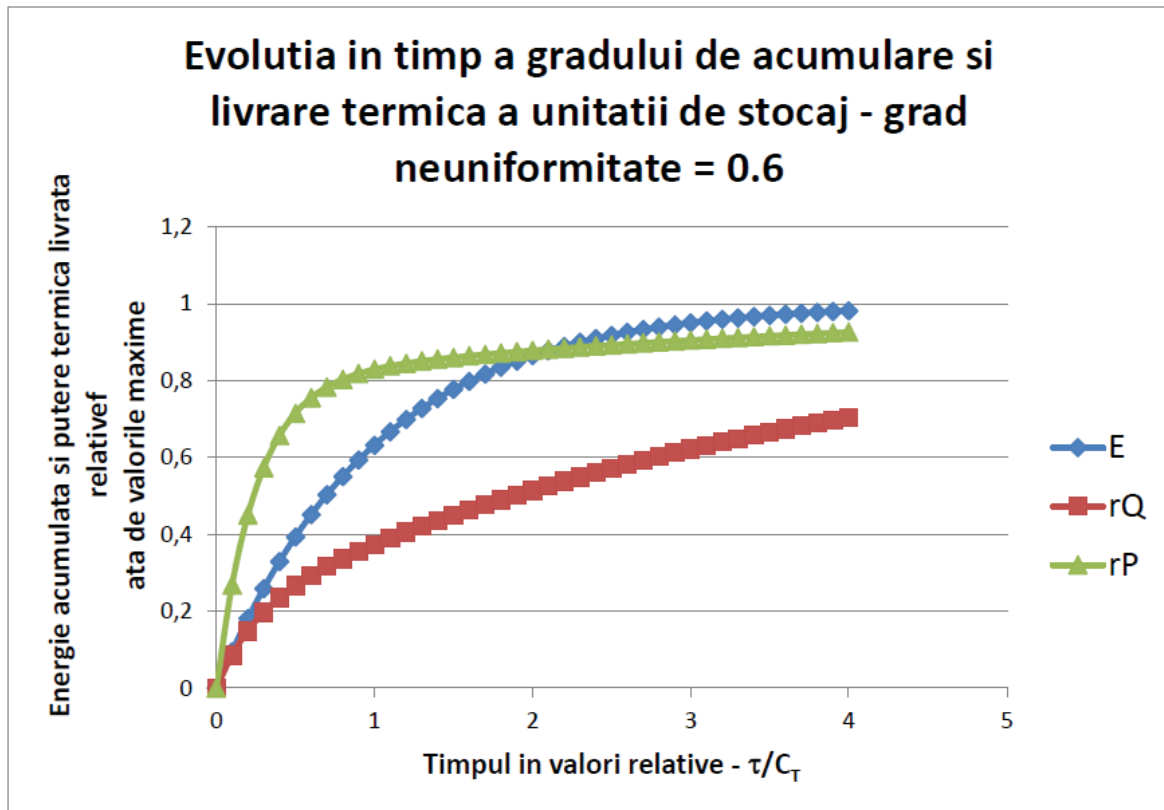


Fig. 2

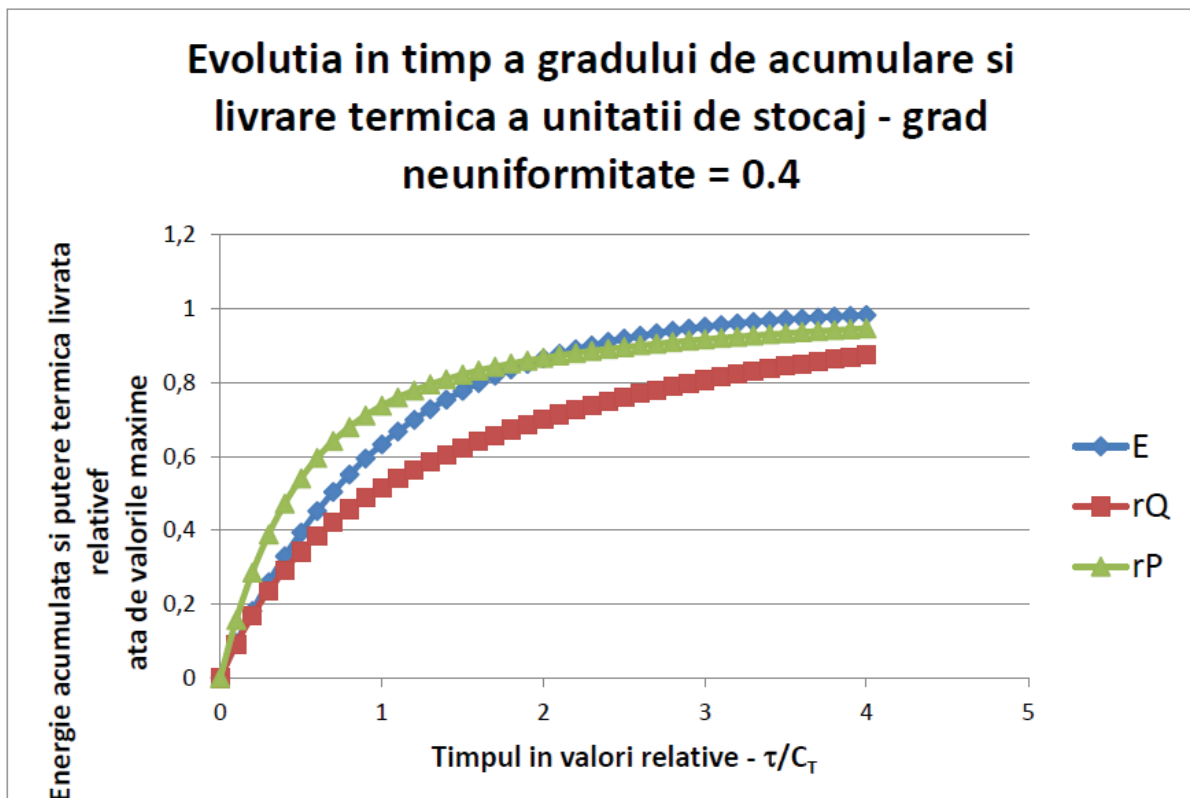


Fig. 3

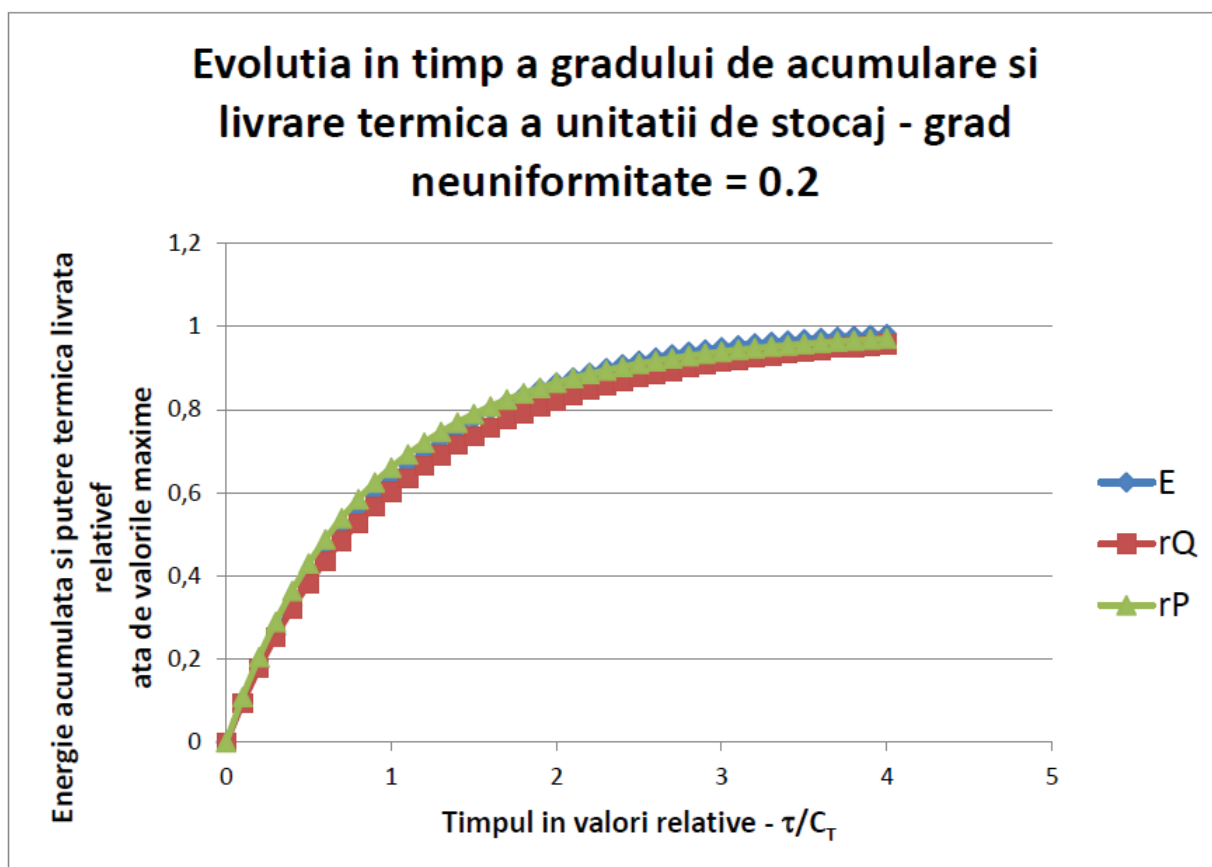


Fig. 4

In fig. 3 si 4 se prezinta aceleasi curbe in situatia unor grade de neuniformitate a circulatiei agentului termic prin unitatea de stocaj de 0.4 si 0.2. Se observa cum cu cat neuniformitatea circulatiei scade cu atat performanta unitatii de stocaj creste. Se defineste performanta unitatii de stocaj termic ca fiind raportul dintre gradul de acumulare termica in situatia de neuniformitate a circulatiei existente si gradul de acumulare termica in situatia de uniformitate perfecta a circulatiei agentului termic prin unitatea de stocaj. Performanta unitatii de stocaj este randamentul acesteia si depinde de gradul de neuniformitate al circulatiei agentului termic prin unitatea de stocaj :

$$\eta_{US} = \frac{1 - (rv1 \cdot E1_{\tau} + rv2 \cdot E2_{\tau})}{1 - E_{\tau}} \quad (22)$$

Din fig. 1...4 se observa cum, cu cat gradul de neuniformitate al circulatiei este mai mare cu atat randamentul de acumulare scade si agentul termic se intoarce la sursa cu o temperatura mai ridicata conducand si pe aceasta cale la scaderea performantelor altor componente ale sistemului. Cu cat circulatia este mai uniforma cu atat creste randamentul de acumulare si performantele sistemului in ansamblu (fig.5)



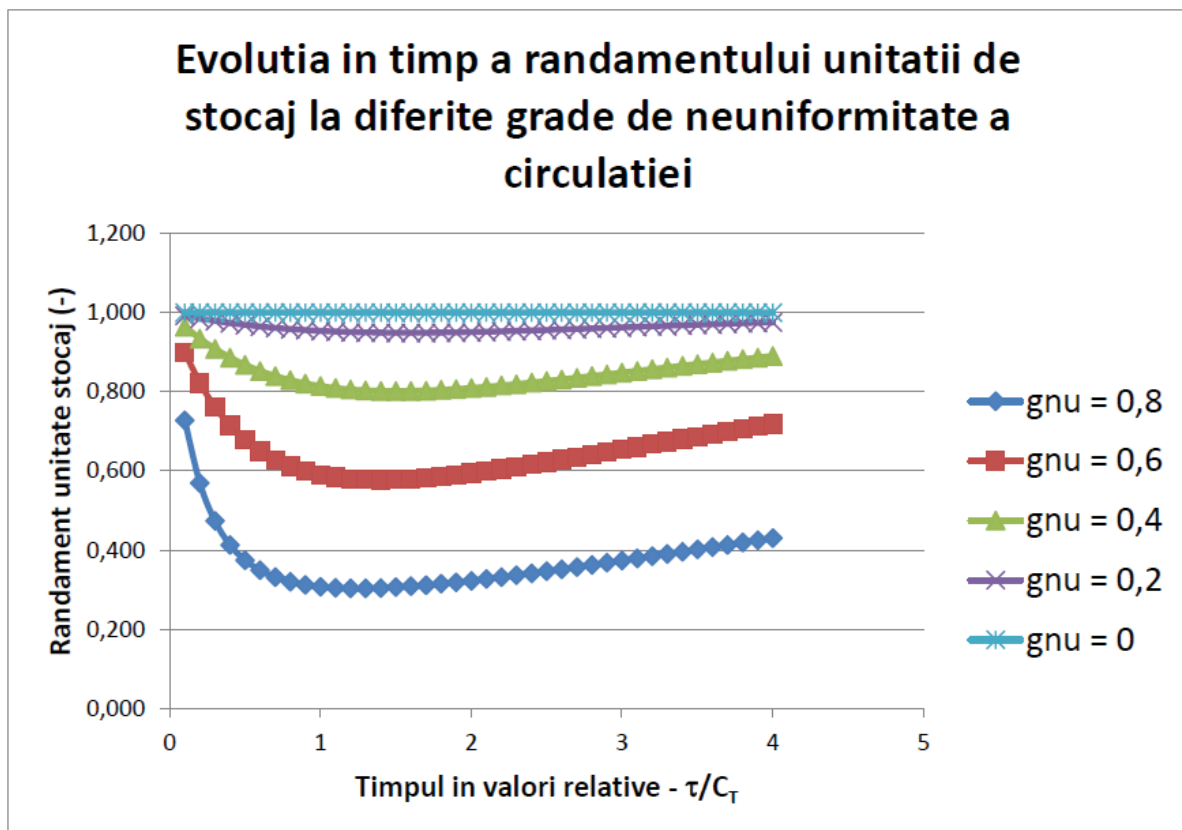


Fig. 5

### 3. Concluzii

Se definește performanța unității de stocaj termic ca fiind raportul dintre gradul de acumulare termică în situația de neuniformitate a circulației existente și gradul de acumulare termică în situația de uniformitate perfectă a circulației agentului termic prin unitatea de stocaj. Performanța unității de stocaj este randamentul acesteia și depinde de gradul de neuniformitate al circulației agentului termic prin unitatea de stocaj.

Circulația neuniformă prin unitățile de stocaj termic are consecințe negative atât în ceea ce privește gradul de acumulare termică în unitatea de stocaj cât și asupra componentelor sistemului care primesc agent termic din unitatea de stocaj. Cu cât gradul de neuniformitate este mai mare cu atât randamentul sistemului este mai scăzut.

Se poate spune că cu cât gradul de neuniformitate a circulației agentului termic prin unitatea de stocaj este mai mare cu atât unitatea de stocaj termic se comportă ca o unitate de stocaj termic cu volum mai scăzut și deci care prin exploatarea defectuoasă conține o cota de volum de acumulare neutilizat.

Dacă ne referim la un sistem complex de captare și utilizare a energiei solare în care stocajul termic este doar o componentă alături de suprafața de captare a

energiei solare se poate remarca faptul ca apar scaderi ale performantei energetice ale sistemului complex atat datorita circulatiei neuniforme atat prin suprafata de captare cat si prin sistemul de stocare. In plus datorita faptului ca din sistemul de stocare circulat neuniform agentul termic se intoarce in suprafata de captare cu temperature mai ridicate apar scaderi suplimentare ale randamentului de captare. Se intelege de aici necesitatea asigurarii unei circulatii cat mai uniforme a agentului termic in toate componentele sistemului.

### **Lista de Notatii :**

$t$  - temperatura agentului termic la intrarea in unitatea de stocaj, °C;  
 $\theta$  - temperatura agentului din unitatea de stocaj termic, °C;  
 $G$  - debitul total de agent termic care intra in unitatea de stocaj, m<sup>3</sup>/s;  
 $V$  - volumul total al unitatii de stocaj, m<sup>3</sup>;  
 $V_1$  - volumul zonei 1 a unitatii de stocaj, m<sup>3</sup>;  
 $V_2$  - volumul zonei 2 a unitatii de stocaj, m<sup>3</sup>;  
 $G_1$  - debitul de agent termic prin zona 1 a unitatii de stocaj, m<sup>3</sup>/s;  
 $G_2$  - debitul de agent termic prin zona 2 a unitatii de stocaj, m<sup>3</sup>/s;  
 $\tau$  - timpul, s;  
 $CT$  - constanta de timp aferenta intregii unitati de stocaj, s;  
 $CT_1$  - constanta de timp aferenta zonei 1 din unitatea de stocaj, s;  
 $CT_2$  - constanta de timp aferenta zonei 2 din unitatea de stocaj, s;  
 $\rho$  - densitatea agentului termic, kg/m<sup>3</sup>;  
 $c$  - caldura specifica a agentului termic, J/kg.K;  
 $Q$  - energia termica acumulata, J;  
 $Q_{MAX}$  – energia termica maxima ce poate fi acumulata, J;  
 $Q_1$  - energia termica acumulata in zona 1 a stocajului, J;  
 $Q_2$  - energia termica acumulata in zona 2 a stocajului, J;  
 $P$  - puterea termica livrata de unitatea de stocaj, W;  
 $P_{MAX}$  - puterea termica maxima ce ar putea fi livrata de unitatea de stocaj, W;  
 $P_1$  - puterea termica livrata din zona 1 a unitatii de stocaj, W;  
 $P_2$  - puterea termica livrata din zona 2 a unitatii de stocaj, W;  
 $\eta_{US}$  - randamentul unitatii de stocaj, -;

### **Bibliografie**

1. Florin Iordache – Energetica echipamentelor si sistemelor termice din instalatii – Editura Conspress 2010;
2. Florin Iordache, Horatiu Dragne – Influenta negative a dezechilibrarii hidraulice in campurile de captatoare solare asupra performantelor energetice – Revista Romana de Inginerie Civila – volumul 7 (2016), nr.1;