

**ANEXA nr. 1**

completare Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului  
asupra construcțiilor”, indicativ CR 1-1-4/2012,

**ANEXA E (informativă) – COMENTARII ȘI RECOMANDĂRI DE PROIECTARE**

## CUPRINS

### E.1 ELEMENTE GENERALE

### E.2 VITEZA VÂNTULUI. PRESIUNEA DINAMICĂ A VÂNTULUI

#### E.2.1 Elemente generale

#### E.2.2 Valori de referință ale vitezei și presiunii dinamice a vântului

#### E.2.3 Rugozitatea terenului. Valori medii ale vitezei și presiunii dinamice a vântului

#### E.2.4 Turbulența vântului. Valori de vârf ale vitezei și presiunii dinamice a vântului

### E.3 ACȚIUNEA VÂNTULUI ASUPRA CLĂDIRILOR ȘI STRUCTURILOR

#### E.3.1 Elemente generale

#### E.3.2 Presiunea vântului pe suprafețe

#### E.3.3 Forțe din vânt

#### E.3.4 Coeficientul de răspuns dinamic al construcției

### E.4 COEFICIENȚI AERODINAMICI DE PRESIUNE / SUȚIUNE ȘI DE FORȚĂ

### E.5 PROCEDURI DE DETERMINARE A COEFICIENTULUI DE RĂSPUNS DINAMIC

#### E.5.1 Turbulența vântului

#### E.5.2 Procedura detaliată de determinare a coeficientului de răspuns dinamic

#### E.5.4 Deplasări și accelerații pentru starea limită de serviciu a construcției

#### E.5.5 Criterii de confort

### E.6 FENOMENE DE INSTABILITATE AEROELASTICĂ GENERATE DE VÂRTEJURI

### E. ANEXA A ZONAREA ACȚIUNII VÂNTULUI ÎN ROMÂNIA

## INTRODUCERE

Comentariile și recomandările de proiectare următoare se referă la aplicarea reglementării tehnice CR 1-1-4/2012 “Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor” și au ca obiectiv facilitarea evaluării acțiunii vântului de către inginerii proiectanți.

Prevederile codului CR 1-1-4/2012 sunt armonizate cu standardul SR EN 1991-1-4:2006, cu luarea în considerare a informației meteorologice privind valorile maxime anuale ale vitezei medii a vântului.

### E.1 ELEMENTE GENERALE

Analiza acțiunii și a efectelor vântului pe clădiri și structuri se bazează pe evaluarea vitezei vântului,  $V$  în amplasament.

Vântul cu viteza  $V$  generează un sistem de forțe aerodinamice,  $F_w$  ce acționează asupra unei construcții (considerată fixă și indeformabilă) și asupra elementelor sale componente. Răspunsul este static, pentru construcții rigide și puternic amortizate, și este dinamic pentru construcții flexibile și / sau slab amortizate.

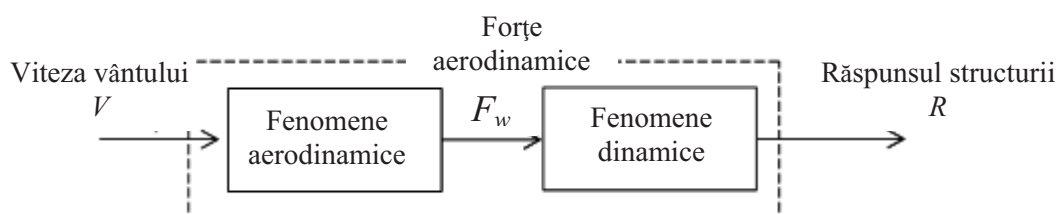


Figura E.1.1 Relația acțiune-răspuns pentru o construcție considerată fixă și indeformabilă [1]

La construcțiile ușoare, flexibile și slab amortizate, caracterizate de o formă aerodinamică sensibilă la acțiunea vântului, apar fenomene aeroelastice de interacțiune vânt-structură care modifică viteza vântului incident  $V$ , forța aerodinamică  $F_w$  și răspunsul structural  $R$ . În acest caz vântul produce asupra construcției o forță totală  $F=F_w+F_a$ , în care  $F_w$  este forța exercitată de vânt pe structura fixă și  $F_a$  este forța aeroelastică generată de mișcarea structurii.

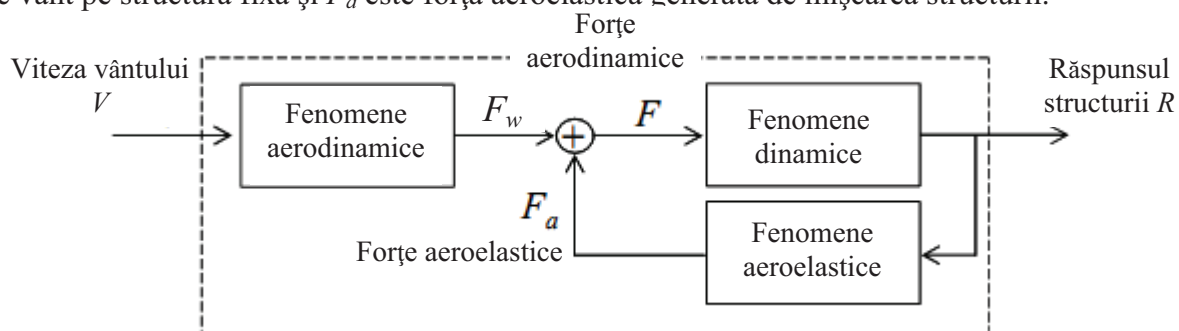


Figura E.1.2 Influența fenomenelor aeroelastice în relația acțiune-răspuns [1]

Prevederile codului de proiectare CR 1-1-4/2012 sunt aplicabile pentru proiectarea / verificarea clădirilor și structurilor cu înălțimi mai mici de 200 m și a podurilor cu deschiderea mai mică de 200 m, care satisfac condițiile de răspuns dinamic de la (C.2).

Codul de proiectare CR 1-1-4/2012 nu conține prevederi referitoare evaluarea acțiunii vântului pe turnuri cu zăbrele cu tălpi neparalele dacă abaterea de la verticală a unei tălpi este mai mare de 1/10 și la evaluarea acțiunii combinate vânt-ploaie, vânt-chiciura și vânt-gheață. Pentru acest cazuri se vor folosi și prevederile din SR EN 1993-3-1.

De asemenea, codul nu conține prevederi referitoare la:

- evaluarea acțiunii vântului pe piloni și coșuri de fum ancorate cu cabluri cu înălțimi peste 100 m;
- calculul vibrațiilor de torsiune, de exemplu la clădiri înalte cu nucleu central;
- calculul vibrațiilor tablierelor de pod generate de turbulența transversală a vântului;
- evaluarea acțiunii vântului pe poduri cu cabluri suspendate;
- considerarea influenței modurilor proprii superioare de vibrație în evaluarea răspunsului structural dinamice.

Pentru toate aceste cazuri se pot consulta referințe normative europene (de ex., vezi SR EN 1993-3-1) și internaționale, rezultate prezentate în literatura tehnică de specialitate sau rezultate ale încercărilor în tunelul aerodinamic de vânt și/sau ale metodelor numerice, utilizând modele adecvate ale construcției și ale acțiunii vântului, cu condiția respectării principiilor, cerințelor minime și regulilor de proiectare din codul CR 1-1-4/2012 și a legislației / reglementărilor tehnice aplicabile în vigoare.

### *Bibliografie*

1. CNR-DT 207/2008 Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

## E.2 VITEZA VÂNTULUI. PRESIUNEA DINAMICĂ A VÂNTULUI

### E.2.1 Elemente generale

Valorile instantanee ale vitezei vântului, Figura E.2.1 (precum și valorile instantanee ale presiunii dinamice ale vântului) conțin o componentă medie și o componentă fluctuantă față de medie.

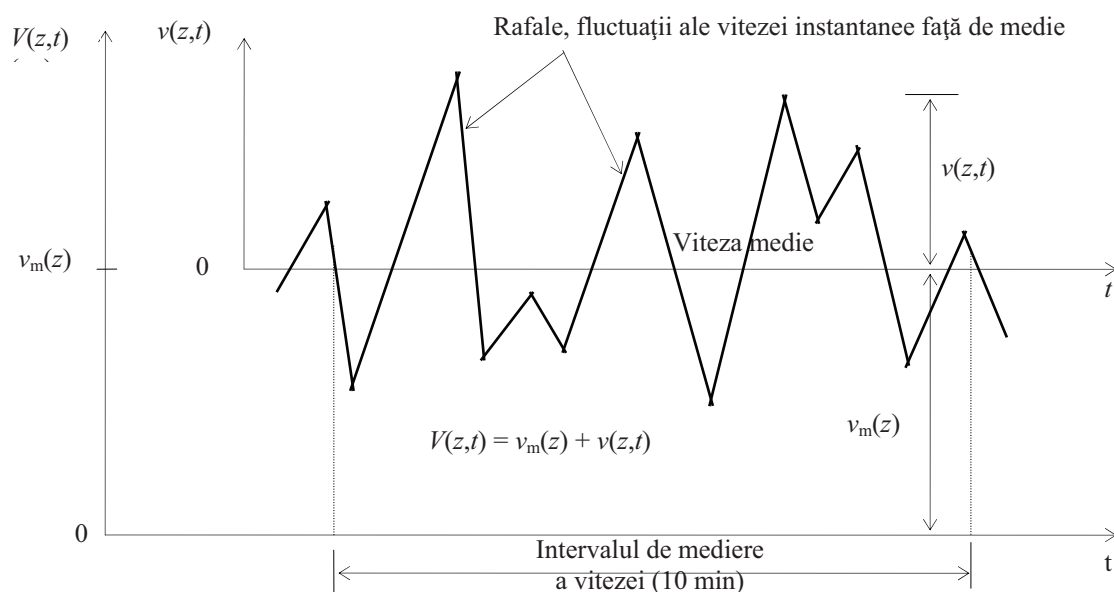


Fig. E.2.1 Procesul stochastic al vitezei vântului la înălțimea  $z$  deasupra terenului,  $V(z,t)$  [4]

### E.2.2 Valori de referință ale vitezei și presiunii dinamice a vântului

Viteza de referință a vântului,  $v_b$  este viteza vântului mediată pe o durată de 10 minute, determinată la o înălțime de 10 m deasupra terenului, în câmp deschis (având lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,05$  m) și exprimată cu o probabilitate de depășire de 2% într-un an (respectiv cu un intervalul mediu de recurență  $IMR=50$  de ani).

Medierea vitezei vântului pe o durată de 10 min conduce la o definiție stabilă a vitezei vântului valabilă pentru o suprafață mare și pentru un interval de timp suficient de lung pentru dezvoltarea completă a răspunsului structurii.

În câmp deschis se recomandă următoarele relații de conversie între vitezele vântului mediate pe diferite intervale de timp [4]:

$$1,05 \cdot v_b^{1h} = v_b^{10min} = 0,84 \cdot v_b^{1min} = 0,67 \cdot v_b^{3s} \quad (E.2.1)$$

Similar, relațiile de conversie ale presiunii vântului în câmp deschis pentru diferite intervale de mediere ale vitezei se estimează cu relația [4]:

$$1,1 \cdot q_b^{1h} = q_b^{10min} = 0,7 \cdot q_b^{1min} = 0,44 \cdot q_b^{3s} \quad (E.2.2)$$

Valoarea de referință a vitezei vântului având o probabilitate anuală de depășire de 2% se determină din analiza statistică a valorilor maxime anuale ale vitezei mediate a vântului.

În analiza statistică, numărul de ani pentru care există înregistrări meteorologice se recomandă să fie comparabil cu cel al intervalului mediu de recurență asociat vitezei de referință (50 de ani). Pentru zonarea acțiunii vântului se recomandă utilizarea în toate stațiile meteo a aceluiași tip de repartiție de probabilitate a valorilor extreme.

Dintre repartițiile de valori extreme adecvate pentru descrierea maximelor anuale ale vitezei vântului se recomandă repartiția Gumbel pentru maxime. În această repartiție, valoarea maximă anuală a vitezei medii a vântului având probabilitatea de nedepășire într-un an,  $p = 0,98$  este:

$$v_{0,98} = m_1 \cdot (1 + 2,593 \cdot V_1) \quad (E.2.3)$$

unde  $m_1$  și  $V_1$  sunt respectiv media și coeficientul de variație al maximelor anuale ale vitezei medii a vântului. Coeficientul de variație al valorilor maxime anuale ale vitezei mediate a vântului, în România, este în general mai mic ca 0,35.

Valoarea maximă anuală a vitezei medii a vântului având probabilitatea de nedepășire într-un an,  $p$  diferită de 0,98 poate fi stabilită cu expresia următoare valabilă în repartiția Gumbel a maximelor anuale ale vitezei medii a vântului:

$$v_{\text{prob}} = \frac{1 - \left[ 0,45 + \frac{\ln(-\ln p)}{1,282} \right] \cdot V_1}{1 + 2,593 \cdot V_1} \cdot v_{0,98} \quad (E.2.4)$$





### *E.2.3 Rugozitatea terenului. Valori medii ale vitezei și presiunii dinamice a vântului*

Rugozitatea terenului este descrisă de lungimea de rugozitate,  $z_0$ ; aceasta este o măsură a mărimii vârtejurilor vântului turbulent la suprafața terenului și are valori cuprinse între 0,003 m și 3,0 m, în funcție de categoria de teren. Pentru evaluarea lungimii de rugozitate a terenului din amplasamentul unei construcții este necesară determinarea categoriei de teren corespunzătoare amplasamentului.




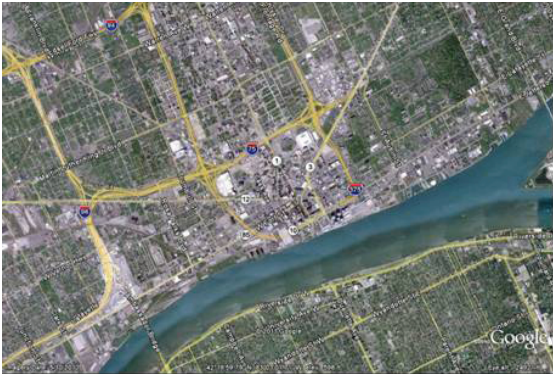
Determinarea categoriei de teren și a lungimii de rugozitate corespunzătoare acestuia se poate face prin inspecție vizuală (documentare fotografică), relevee cartografice și/sau imagini din satelit. Figurile E.2.2-E.2.5 prezintă exemple de categorii de teren cu diferite lungimi de rugozitate folosind (a) documentarea fotografică și (b) imaginile din satelit pentru diferite categorii de teren.

Stratul limită atmosferic este zona, măsurată pe verticală de la suprafața terenului, în care curgerea aerului este afectată de frecarea cu terenul. La apropierea de suprafața terenului, forța de frecare a aerului crește, viteza medie a vântului scade, iar turbulența acestuia crește.

Variația vitezei medii a vântului cu înălțimea deasupra terenului datorită rugozității suprafeței acestuia poate fi reprezentată de un profil logaritm (adoptat de SR EN 1991-1-4 și de prezentul cod de proiectare) sau de un profil exponențial (adoptat de codurile similare din SUA și Canada).

 <p>(a)</p>  <p>(b)</p>	 <p>(a)</p>  <p>(b)</p>
<p>Figura E.2.2 Categoria 0 - Mare sau zone costiere expuse vânturilor venind dinspre mare (<math>z_0 = 0,003</math> m) [5]</p>	<p>Figura E.2.3 Categoria II - Terenuri cu iarbă și/sau cu obstacole izolate (copaci, clădiri) aflate la distanțe de cel puțin 20 de ori înălțimea obstacolului (<math>z_0 = 0,05</math> m) [5]</p>



 <p>(a)</p>	 <p>(a)</p>
 <p>(b)</p>	 <p>(b)</p>
<p>Figura E.2.4 Categoria III - Zone acoperite uniform cu vegetatie, sau cu clădiri, sau cu obstacole izolate aflate la distanțe de cel mult de 20 de ori înălțimea obstacolului (de ex., sate, terenuri suburbane, păduri) (<math>z_0=0,3</math> m) [5]</p>	<p>Figura E.2.5 Categoria IV - Zone în care cel puțin 15% din suprafață este acoperită cu construcții având mai mult de 15 m înălțime (<math>z_0 = 1,0</math> m) [5]</p>

La înălțimi sub 200 m legea logaritmică modelează riguros variația vitezei medii a vântului cu înălțimea deasupra terenului. Pentru a obține legea logaritmică, în conformitate cu datele de observație, se postulează că rata de modificare a vitezei medii a vântului,  $v_m$  în raport cu înălțimea,  $z$  depinde de următorii parametri:

- înălțimea deasupra terenului,  $z$ ;
- forța de reducere a vitezei masei de aer pe unitatea de suprafață produsă de frecarea cu terenul; această mărime este denumită tensiune de forfecare la suprafața terenului,  $\tau_0$ ;
- densitatea aerului,  $\rho$ .

Expresia vitezei medii a vântului la cota  $z$  deasupra terenului având lungimea de rugozitate  $z_0$  este [3]:

$$v_m(z) = \int_{z_0}^z \frac{u_*}{k} \cdot \frac{1}{z} dz = \frac{u_*}{k} \cdot \int_{z_0}^z \frac{1}{z} dz = \frac{u_*}{k} \cdot (\ln z - \ln z_0) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (\text{E.2.5})$$

unde:



$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  are dimensiuni de viteză și este denumită viteză de frecare, și

$k$  – constanta lui von Karman, determinată experimental este egală cu 0,4.

Considerând două amplasamente cu lungimi de rugozitate diferite,  $z_{01}$  și  $z_{02}$ , raportul vitezelor medii ale vântului pe cele două amplasamente la cote diferite,  $z_1$  și  $z_2$  este

$$\frac{v_m(z_1)}{v_m(z_2)} = \frac{\frac{u_{*1}}{k} \ln\left(\frac{z_1}{z_{01}}\right)}{\frac{u_{*2}}{k} \ln\left(\frac{z_2}{z_{02}}\right)} = \left(\frac{z_{01}}{z_{02}}\right)^{0,07} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_{01}}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_{02}}\right)} \quad (\text{E.2.6})$$

unde se consideră aproximarea determinată experimental [3]:

$$\frac{u_{*1}}{u_{*2}} = \left(\frac{z_{01}}{z_{02}}\right)^{0,07} \quad (\text{E.2.7})$$

Dacă în relația (E.2.6) amplasamentul 2 este înlocuit cu amplasamentul de referință – câmp deschis cu  $z_{0ref} = 0,05\text{m}$  – și cota  $z_2$  cu înălțimea de referință,  $z_{ref} = 10\text{m}$  se obține

$$\frac{v_m(z)}{v_b} = \left(\frac{z_0}{z_{0ref}}\right)^{0,07} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right)} = \frac{\left(\frac{z_0}{z_{0ref}}\right)^{0,07}}{\ln\left(\frac{10}{0,05}\right)} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{E.2.8})$$

unde factorul  $k_r(z_0)$  este dat de relația:

$$k_r(z_0) = 0,189 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} \quad (\text{E.2.9})$$

Profilul vitezei medii a vântului mediată pe 10 minute pentru diferite categorii de teren în funcție de viteza de referință  $v_b$  se determină cu următoarea relație:

$$v_m(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_b = c_r(z) \cdot v_b \quad (\text{E.2.10})$$

unde  $c_r(z)$  este factorul de rugozitate pentru viteza vântului.

Factorul de rugozitate pentru viteza vântului,  $c_r(z)$  descrie variația vitezei medii a vântului cu înălțimea  $z$  deasupra terenului pentru diferite categorii de teren (caracterizate prin lungimea de rugozitate  $z_0$ ) în funcție de viteza de referință a vântului. Variația factorului de rugozitate  $c_r(z)$  cu înălțimea și categoria de teren este reprezentată în Figura E.2.6.

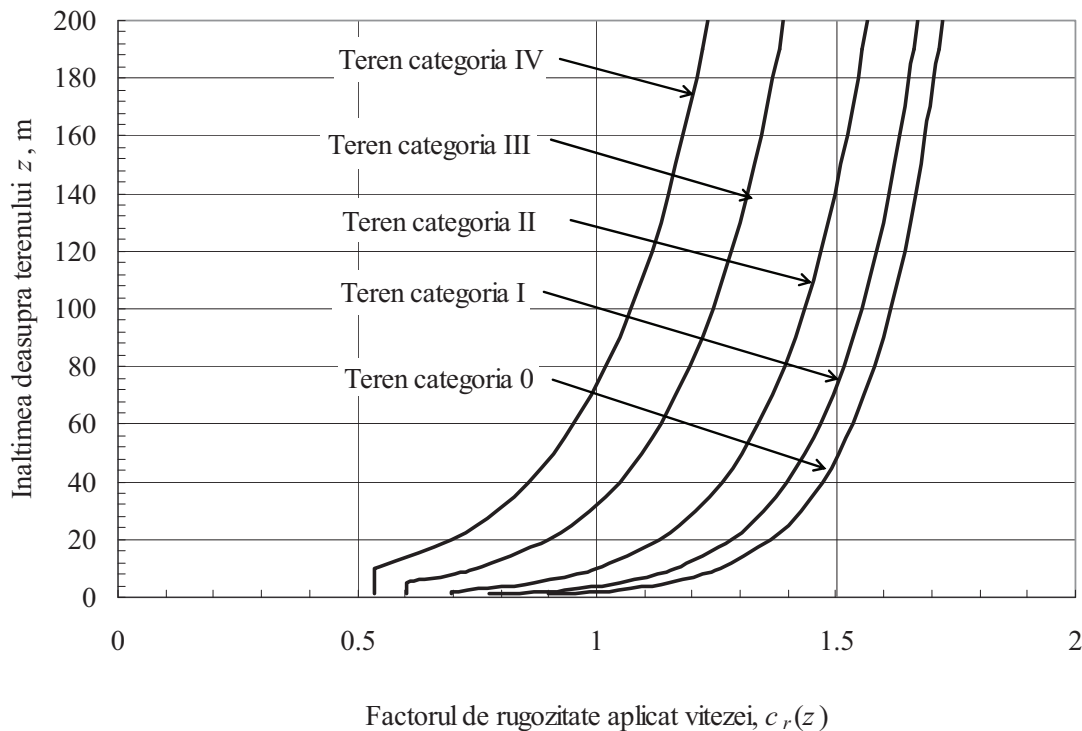


Fig. E.2.6 Variația factorului de rugozitate  $c_r(z)$

Determinarea profilului vitezei medii a vântului mediată pe 10 minute pentru diferite categorii de teren se face cu considerarea efectele orografiei dacă panta medie a terenului din amonte (față de direcția de curgere a aerului) este mai mare de  $3^\circ$ . Terenul din amonte poate fi considerat până la o distanță egală cu de 10 ori înălțimea elementului orografic izolat.

În Anexa B a codului este prezentată o metodă de considerare a unei viteze sporite a vitezei vântului pentru cazurile în care clădirea/structura analizată este/va fi amplasată în apropierea unei alte structuri care este de cel puțin două ori mai înaltă decât media înălțimilor structurilor învecinate. Tot în Anexa B este dată o metodă aproximativă de considerare a efectului clădirilor amplasate la distanțe reduse asupra vitezei medii a vântului.

Profilul valorilor medii ale presiunii dinamice a vântului pentru diferite categorii de teren se obține în funcție de presiunea dinamică de referință,  $q_b$  cu următoarea relație:

$$q_m(z) = \left[ k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 \cdot q_b = [c_r(z)]^2 \cdot q_b \quad (\text{E.2.11})$$

unde  $[c_r(z)]^2$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului.

Factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului,  $c_r^2(z)$  descrie variația presiunii medii a vântului cu înălțimea  $z$  deasupra terenului pentru diferite categorii de teren (caracterizate prin lungimea de rugozitate  $z_0$ ) în funcție de valoarea de referință a presiunii dinamice a vântului.

Variația factorului de rugozitate aplicat presiunii dinamice a vântului cu înălțimea și cu categoria de teren este prezentată în Figura E.2.7.

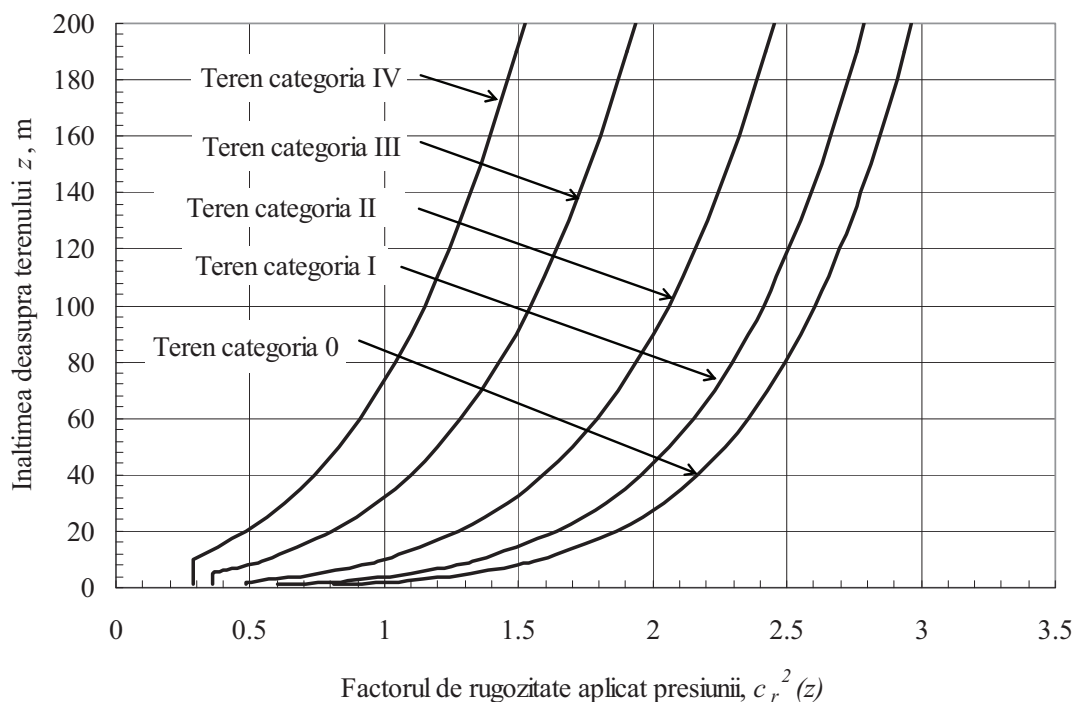


Fig. E.2.7 Variația factorului de rugozitate,  $c_r^2(z)$

#### E.2.4 Turbulența vântului. Valori de vârf ale vitezei și presiunii dinamice a vântului

Viteza instantanee a vântului variază aleator în timp și spațiu datorită turbulenței spațiale a curgerii aerului. Variația aleatoare în timp și spațiu a vitezei vântului produce efecte dinamice asupra construcțiilor sensibile la acțiunea vântului.

Componenta în direcție longitudinală a vectorului vitezei vântului la cota  $z$  deasupra terenului se exprimă ca suma dintre un termen constant (viteza medie) și o funcție aleatoare de timp cu media zero (viteza fluctuantă):

$$V(z, t) = v_m(z) + v(z, t) \quad (\text{E.2.12})$$

Turbulența atmosferică se modelează simplificat ca un proces aleator staționar normal de medie zero.

Turbulența vitezei vântului poate fi caracterizată prin dispersia fluctuațiilor vitezei față de valoarea sa medie, sau prin valoarea medie pătratică a fluctuațiilor. Deoarece fluctuațiile vitezei față de medie sunt reprezentate printr-un proces aleator de medie zero, valoarea medie pătratică a fluctuațiilor este egală cu dispersia acestora. În partea inferioară a stratului limită atmosferic (max. 200 m de la suprafața terenului) se poate considera, simplificat, că dispersia rafalelor longitudinale ale vântului este independentă de înălțimea  $z$  deasupra terenului și proporțională cu pătratul vitezei de frecare,  $u_*^2$  [3]:

$$\sigma_v^2 = \beta \cdot u_*^2 \quad (\text{E.2.13})$$

Factorul de proportionalitate  $\beta$  depinde de rugozitatea terenului din amplasament. Datele experimentale arată că valoarea  $\beta$  în direcție longitudinală poate fi determinată cu următoarea relație [4]:

$$4,5 \leq \beta = 4,5 - 0,856 \cdot \ln(z_0) \leq 7,5 \quad (\text{E.2.14})$$

unde  $z_0$  este lungimea de rugozitate, exprimată în metri.

În cod se consideră, simplificat, că turbulența caracterizează doar fluctuațiile vitezei instantanee pe direcția vântului (turbulența longitudinală). Astfel, raportul între abaterea standard a fluctuațiilor rafalelor vântului pe direcție longitudinală și viteza medie a vântului este denumit intensitatea turbulenței longitudinale și are semnificația coeficientului de variație al fluctuațiilor rafalelor față de viteza medie:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{\sqrt{\beta} \cdot u_*}{\frac{1}{k} \cdot u_* \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{E.2.15})$$

Variația intensității turbulenței cu înălțimea deasupra terenului pentru diferite rugozități (categorii de teren) este reprezentată în Figura E.2.8.

Pentru teren de categoria II intensitatea turbulenței  $I_v(z)$  poate fi aproximată de relația [2]:

$$I_v(z) = \begin{cases} \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} & \text{pentru } z_{\min} < z \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ I_v(z = z_{\min}) & \text{pentru } z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (\text{E.2.16}).$$

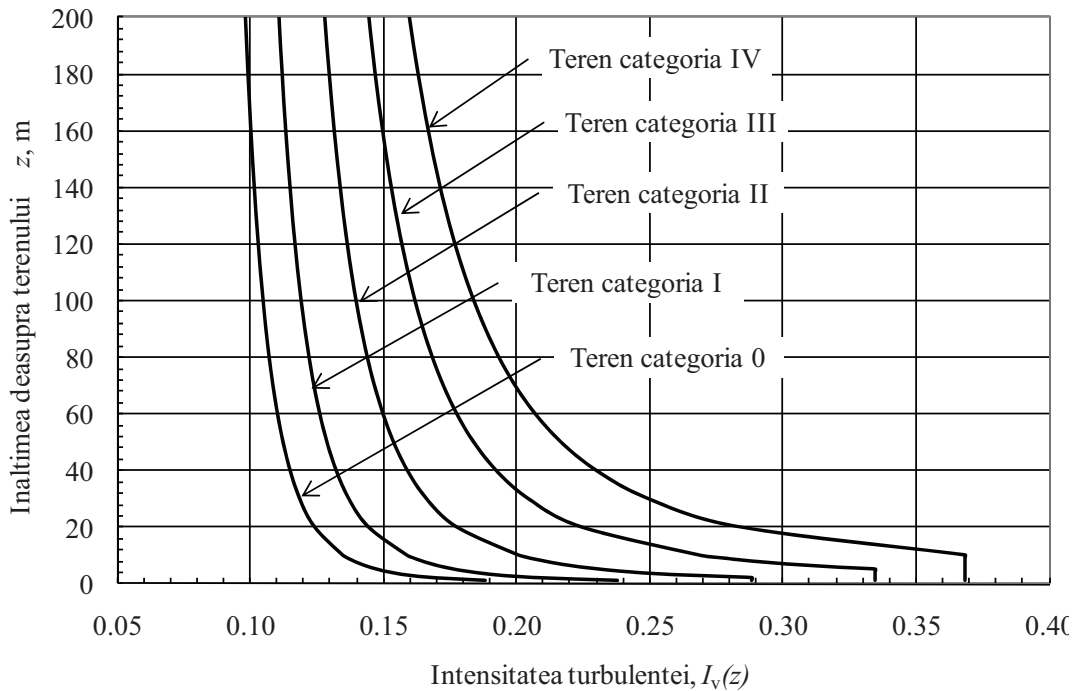


Fig. E.2.8 Intensitatea turbulenței,  $I_v(z)$

În codurile de proiectare se folosesc valori de vârf sau „extreme maxime” ale vitezei și presiunii de rafală ale vântului. Datorită caracterului aleator al vitezei instantanee a vântului, valoarea de vârf a vitezei de rafală a vântului într-un interval de timp de 10 minute este o variabilă aleatoare pentru care se definește o valoare medie (așteptată). Considerând că valorile vitezei longitudinale a vântului au o repartiție normală, valoarea așteptată a vitezei de rafală este [3]:

$$v_p(z) = v_m(z) + g \cdot \sigma_v = v_m(z) [1 + g \cdot I_v(z)] \quad (\text{E.2.17})$$

unde  $g$  este un factor de vârf a cărui valoare medie estimată este 3,5.

Factorul de rafală pentru viteza medie a vântului,  $c_{pv}(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se definește ca raportul dintre valoarea de vârf a vitezei vântului (produsă de rafalele vântului turbulent) și valoarea medie (mediată pe 10 min în prezentul cod) a vitezei vântului, ambele la înălțimea  $z$ :

$$c_{pv}(z) = \frac{v_p(z)}{v_m(z)} = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z) \quad (\text{E.2.18})$$

Variația factorului de rafală  $c_{pv}(z)$ , considerând  $g = 3,5$ , este reprezentată în Figura E.2.9.

Valorile factorului de rafală aplicat vitezei medii a vântului depind de durata de mediere a vitezei de referință a vântului și se determină, de exemplu (vezi relația (E.2.1)) [4]:

$$c_{pv}^{1\min} \cong 0,84 \cdot c_{pv}^{10\min} \quad (\text{E.2.19})$$

$$c_{pv}^{1h} \cong 1,05 \cdot c_{pv}^{10\min} \quad (\text{E.2.20})$$

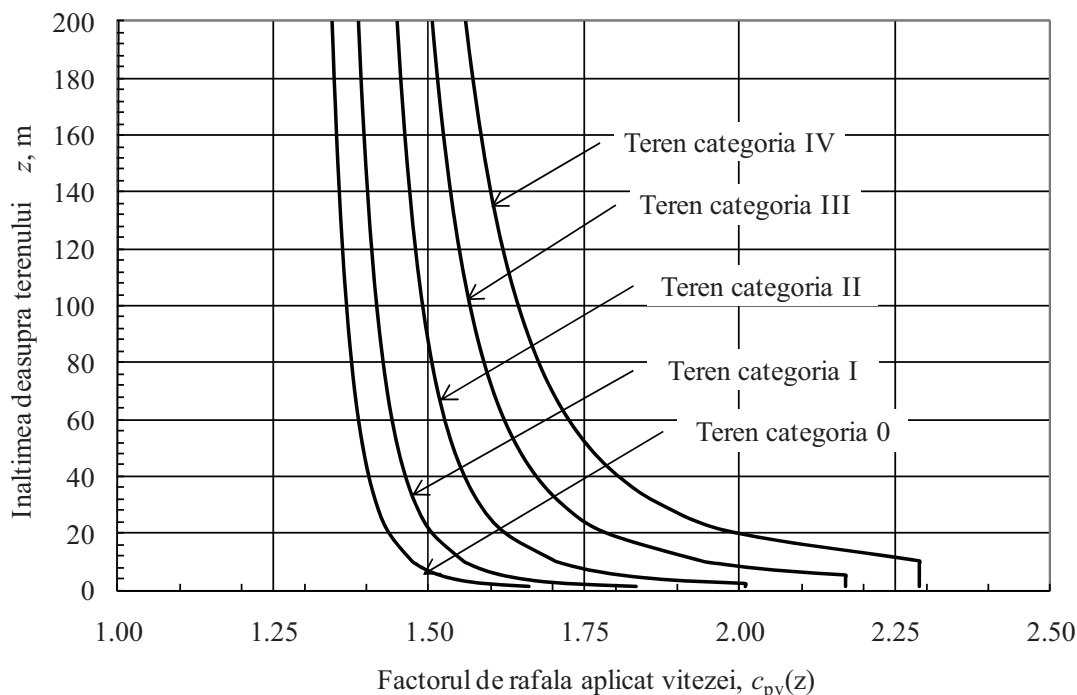


Fig. E.2.9 Factorul de rafală pentru viteza vântului,  $c_{pv}(z)$

Valoarea de vârf sau „maximă” a presiunii dinamice a vântului într-un interval de timp egal cu 10 minute este

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [v_m(z)]^2 \cdot [1 + g \cdot I_v(z)]^2 \cong q_m(z) \cdot [1 + 7 \cdot I_v(z)] \quad (\text{E.2.21})$$

unde  $\rho$  este densitatea aerului. În relația (E.2.21) s-a neglijat termenul de ordinul 2 al intensității turbulenței, având în vedere că eroarea introdusă de această aproximare este sub 3-4%.

Factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului,  $c_{pq}(z)$  la înălțimea  $z$  deasupra terenului se definește ca raportul dintre valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului (produsă de rafalele vântului) și valoarea medie a presiunii dinamice a vântului (produsă de viteza medie a vântului), ambele la înălțimea  $z$ :

$$c_{pq}(z) = \frac{q_p(z)}{q_m(z)} = 1 + 2g \cdot I_v(z) = 1 + 7 \cdot I_v(z) \quad (\text{E.2.22})$$

Variația factorului de rafală pentru presiunea dinamică a vântului, considerând  $g = 3,5$ , este reprezentată în Figura E.2.10.

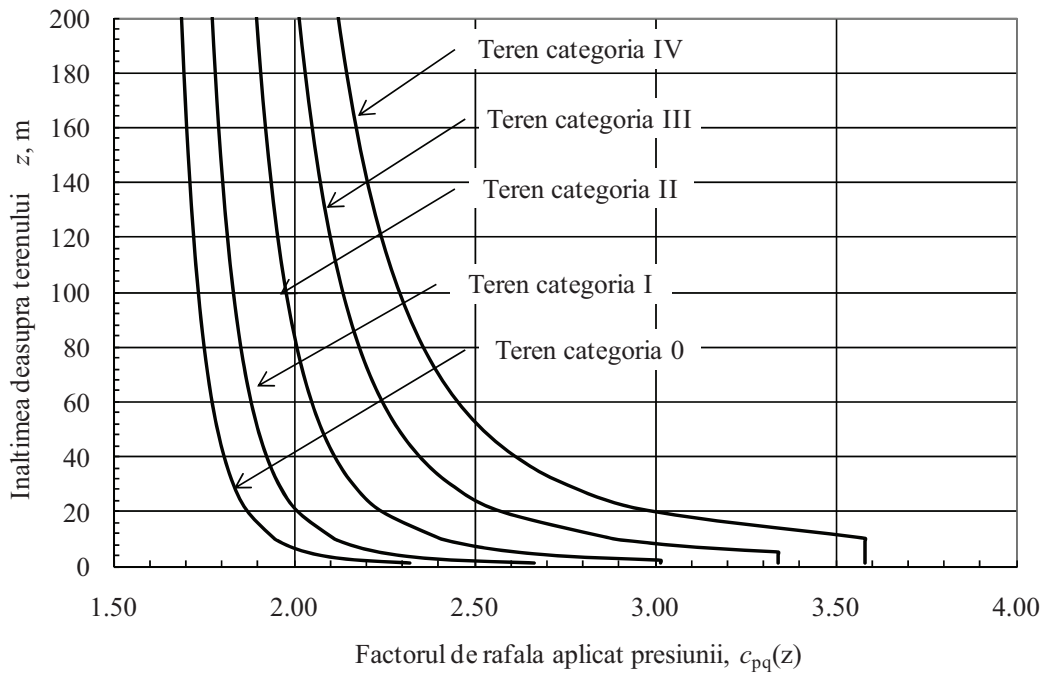


Fig. E.2.10 Factorul de rafală pentru presiunea dinamică a vântului,  $c_{pq}(z)$

Valorile numerice ale factorului de rafală pentru presiunea dinamică a vântului depind de durata de mediere a vitezei de referință a vântului (vezi relația (E.2.2) [4]:

$$c_{pq}^{1 \min} \cong 0,70 \cdot c_{pq}^{10 \min} \quad (\text{E.2.23})$$

$$c_{pq}^{1h} \cong 1,1 \cdot c_{pq}^{10 \min} \quad (\text{E.2.24})$$



### Bibliografie

1. CNR-DT 207/2008 - Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, 2008
2. EN 1991-1-4 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, CEN
3. J. D. Holmes, 2004 - Wind Loading of Structures, Taylor & Francis
4. NP 082-04 - Cod de proiectare. Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului
5. <http://maps.google.com/>
6. Lungu D., Demetriu S., Aldea A., 1994. *Basic code parameters for environmental actions in Romania harmonised with EUROCODE 1*, Scientific Bulletin of Technical University of Civil Engineering Bucharest, Vol.2/1994, p.35-44
7. Lungu D., van Gelder P., Trandafir R., 1996. *Comparative study of Eurocode 1, ISO and ASCE procedures for calculating wind loads*. IABSE Colloquium, Basis of Design and Actions on Structures, Background and Application of EUROCODE 1. Delft University of Technology, March 27-29, p.345-354
8. Lungu, D., Aldea, A., Demetriu, S., 1998. *Probabilistic wind and snow hazards assessment for Romania*, Proceedings of the 1st International Scientific-Technical Conference – Technical Meteorology of the Carpathians, Ukraine, p.35-40

### *E.3 ACȚIUNEA VÂNTULUI ASUPRA CLĂDIRILOR ȘI STRUCTURILOR*

#### *E.3.1 Elemente generale*

Acțiunea vântului asupra clădirilor și structurilor poate fi reprezentată de:

- a. presiunile exercitate de vânt pe fiecare față a suprafețelor construcției sau a elementelor sale (de exemplu, în cazul clădirilor);
- b. presiunile totale (rezultante) exercitate de vânt pe ambele suprafețe ale construcției sau ale elementelor acesteia; acestea sunt date de rezultanta presiunilor care acționează pe ambele fețe ale suprafețelor fiind utilizate, de exemplu, în cazul pereților izolați și a parapetelor;
- c. forțele și momentele rezultante din acțiunea vântului exercitate pe clădiri în ansamblu sau pe elemente (de exemplu, copertine, panouri);
- d. forțele și momentele pe unitatea de lungime exercitate de vânt de-a lungul axei construcției sau a elementelor zvelte (de exemplu, coșuri de fum, turnuri și poduri);
- e. forțele tangențiale exercitate de vânt pe suprafețele paralele cu direcția vântului (în cazul clădirilor sau al unor elemente cu suprafețe expuse mari, cum ar fi clădiri industriale mari, pereti sau parapete lungi.

Cele mai multe dintre construcții și componentele acestora au o rigiditate și o amortizare suficient de mari pentru a limita efectele dinamice și pentru a nu se produce fenomenele aeroelastice periculoase. În aceste cazuri, acțiunea vântului poate fi reprezentată printr-o distribuție echivalentă de presiuni sau de forțe care, aplicate static pe construcție sau pe elementele sale, produc valorile maxime ale deplasărilor și eforturilor secționale cauzate de acțiunea dinamică a vântului.

Răspunsul total pe direcția vântului turbulent este suma dintre (i) componenta care acționează practic static și (ii) componenta rezonantă fluctuantă provocată de acele fluctuații ale excitației turbulente având frecvența în vecinătatea frecvențelor proprii de vibrație ale structurii.

Pentru majoritatea clădirilor / structurilor având frecvența fundamentală de vibrație peste 1 Hz (perioada fundamentală de vibrație sub 1 s), componenta rezonantă este neglijabilă și răspunsul la vânt poate fi, în mod simplificat, considerat static.

Pentru clădirile / structurile cu răspuns dinamic la vânt, ponderea componentei rezonante corespunzând frecvenței fundamentale de vibrație a structurii este de obicei dominantă față de ponderile celorlalte componente ce corespund frecvențelor modurilor superioare de vibrație.

Pentru determinarea efectelor vântului pe clădirile / structurile neuzuale ca tip, complexitate și dimensiuni, pe structurile cu înălțimi (clădiri, antene) sau deschideri (poduri) de peste 200 m,

pe antenele ancorate și pe podurile suspendate sunt necesare studii speciale de ingineria vântului. Pentru structurile foarte flexibile, precum cabluri, antene, turnuri, coșuri de fum și poduri, interacțiunea vânt-structură produce un răspuns aeroelastic al acestora pentru determinarea căruia sunt date reguli simplificate în Capitolul 6.

Pentru evaluarea acțiunii vântului pe turnuri cu zăbrele cu tălpi neparalele se vor folosi prevederile corespunzătoare din SR EN 1993-3-1.

Acțiunea statică echivalentă a vântului se definește ca fiind acțiunea care, aplicată static pe construcție sau pe elementele sale, produce valorile maxime ale deplasărilor și eforturilor sectionale cauzate de acțiunea reală dinamică a vântului. În general, acțiunea statică echivalentă este exprimată printr-o relație de tipul:

$$\text{Acțiunea statică echivalentă} = c_d \times \text{Acțiunea aerodinamică de vârf} \quad (\text{E.3.1})$$

unde  $c_d$  este un parametru adimensional numit coeficient de răspuns dinamic.

Acțiunea statică echivalentă pe o construcție în ansamblu (sau pe elementele sale individuale), este valoarea maximă așteptată a acțiunii vântului pe un interval de timp  $T = 10$  minute, evaluată cu considerarea:

- efectelor de reducere a răspunsului structural datorate nesimultaneității valorilor de vârf ale presiunilor locale pe suprafața construcției;
- efectelor de amplificare a răspunsului structural produse de vibrațiile structurii în cvasi-rezonanță cu conținutul de frecvențe al rafalelor vântului.

Valoarea factorului de importanță - expunere aplicat la valoarea caracteristică a acțiunii vântului pentru construcțiile din clasele de importanță-expunere I și II,  $\gamma_{tw}=1,15$  este determinată conform relației (A.6) din cod. În acest fel, pentru construcțiile din clasele de importanță-expunere I și II evaluarea acțiunii vântului se face pe baza valorilor de referință ale presiunii dinamice a vântului având 1% probabilitate de depășire într-un an (valori cu un interval mediu de recurență,  $IMR = 100$  ani).

### E.3.2 Presiunea vântului pe suprafețe

Ipoteza “cvasi-staționară” se află la baza codurilor și standardelor europene și internaționale pentru determinarea acțiunii vântului pe construcții. Conform ipotezei cvasi-staționare, fluctuațiile presiunii pe suprafețele construcțiilor,  $W(t)$  urmăresc fluctuațiile vitezei longitudinale a vântului în amonte de construcții [2]:

$$W(t) = w_m + w(t) = c_{p0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2(t) \quad (\text{E.3.2})$$

unde  $c_{p0}$  este coeficientul cvasi-staționar de presiune. Componenta medie a presiunii este:

$$w_m = c_{p0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_m^2 + \sigma_v^2) \quad (\text{E.3.3}).$$

Pentru intensități reduse ale turbulenței, dispersia  $\sigma_v^2$  este mică în comparație cu pătratul valorii medii,  $v_m^2$ . În acest caz, coeficientul cvasi-staționar de presiune,  $c_{p0}$  se poate considera aproximativ egal cu valoarea medie a coeficientului de presiune,  $c_{pm}$ :

$$w_m = c_{p0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = c_{pm} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad (\text{E.3.4}).$$

Folosind ipoteza cvasi-staționară, valoarea de vârf a presiunii vântului pe suprafețe,  $w_p$  este [2]:

$$w_p = c_{p0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_p^2 \cong c_{pm} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_p^2 = c_{pm} \cdot q_p \quad (\text{E.3.5})$$

unde  $v_p$  este valoarea de vârf a vitezei vântului și  $q_p$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului.

În ipoteza cvasi-staționară, se pot determina valori de vârf ale presiunii pe suprafețele construcțiilor folosind valori medii ale coeficienților de presiune și valori de vârf ale presiunii dinamice a vântului.

Acțiunea vântului pe suprafața unei construcții sau a unui element component produce presiuni și suucțiuni  $w$  orientate normal, atât pe suprafețele exterioare, cât și pe cele interioare. Presiunile sunt considerate, convențional, pozitive; suucțiunile sunt considerate, convențional, negative. Presiunile ce acționează pe fețele exterioare ale clădirii se consideră presiuni externe,  $w_e$ ; presiunile ce acționează pe fețele interioare ale clădirii se consideră presiuni interne,  $w_i$ . Acțiunea vântului pe un element individual este determinată pe baza celei mai defavorabile combinații de presiuni care acționează asupra elementului.

### E.3.3 Forțe din vânt

Acțiunea exercitată de vânt asupra construcțiilor pe direcție longitudinală (în lungul vântului) se exprimă printr-o forță globală  $F_w$  aplicată într-un punct de referință al construcției. Forța globală pe direcția vântului  $F_w$ , ce acționează pe structură sau pe un element structural se determină cu relațiile (3.3) și/sau (3.4) din cod în care  $A_{ref}$  este aria de referință, orientată perpendicular pe direcția vântului, pentru clădiri / structuri sau elemente sale; în cazul copertinelor, pentru care se specifică și coeficienți aerodinamici de forță (sau a altor elemente ce pot fi asimilate acestora, de ex. panouri solare) și este posibilă determinarea directă a forței globale din vânt, aria de referință este suprafața totală a acestora pe care se manifestă efecte de presiune/sucțiune generate de acțiunea vântului. Astfel, pentru o copertină cu dimensiunile în plan de  $b$ , respectiv  $d$ , aria de referință este  $b \times d$ .

Forțele globale exercitate de vânt asupra construcțiilor sunt evaluate, de regulă, pentru fiecare din axele principale ale construcției, considerate separat. În unele cazuri, cum ar fi de exemplu turnurile cu secțiunea cvasi-pătrată, trebuie considerată și posibilitatea de acțiune a vântului pe

direcție diagonală (Figura E.3.1). În general, se recomandă determinarea direcției vântului ce produce acțiunile aerodinamice și efectele structurale cele mai severe asupra construcției.

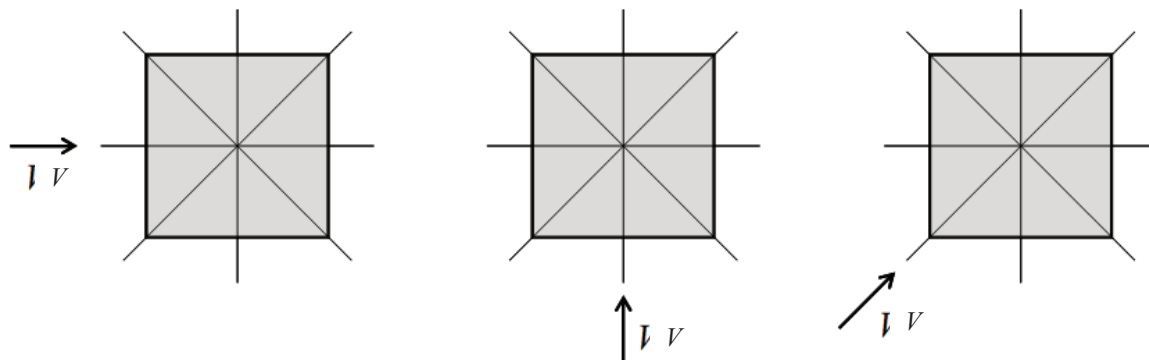


Figura E.3.1. Direcția vântului de proiectare pentru structuri cu forma pătrată în plan [1]

Forțele locale exercitate de vânt pe elemente structurale și/sau nestructurale sunt evaluate considerând direcția vântului care provoacă acțiunea cea mai severă.

Efectele de torsiune generală produse de acțiunea oblică a vântului sau de rafalele necorelate ale vântului acționând pe clădiri / structuri cvasi-paralelipipedice pot fi estimate simplificat considerând aplicarea forței  $F_w$  cu o excentricitate  $e = b / 10$ , unde  $b$  este dimensiunea laturii secțiunii transversale a construcției orientată (cvasi)-perpendicular pe direcția vântului.

Alternativ, în vederea reprezentării efectelor de torsiune produse de un vânt incident ne-perpendicular sau produse de lipsa de corelație între valorile de vârf ale forțelor din vânt ce acționează în diferite puncte ale construcției, pentru construcții dreptunghiulare sensibile la torsiune (de exemplu pentru clădiri simetrice cu un singur nucleu central supuse la torsiune) se poate folosi distribuția de presiuni / sujecțiuni dată în Figura E.3.2.

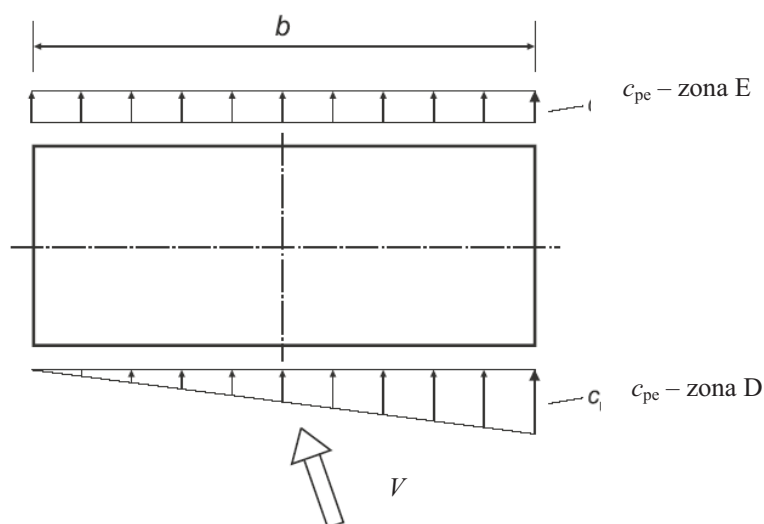


Figura E.3.2. Distribuția presiunii / sujecțiunii vântului pentru considerarea efectelor de torsiune. Zonele și valorile pentru  $c_{pe}$  sunt date în Tabelul 4.1 și Figura 4.5 din Cod

Atunci când aria totală a suprafețelor paralele cu direcția vântului (sau puțin înclinate față de aceasta) reprezintă mai puțin de  $1/4$  din aria totală a tuturor suprafețelor exterioare

perpendiculare pe direcția vântului, efectele generate de frecarea vântului pe suprafețe pot fi neglijate; această recomandare nu se aplică pentru starea limită de echilibru static, *ECH* (vezi *CR 0 – 2012 Cod de proiectare. Bazele proiectării construcțiilor*).

#### *E.3.4 Coeficientul de răspuns dinamic al construcției*

Natura fluctuantă a vitezei vântului, a presiunilor și a forțelor din vânt pe construcții poate produce un răspuns (cvasi-)rezonant semnificativ la structurile zvelte la care rigiditatea și amortizarea structurii au valori reduse. Acest răspuns dinamic (cvasi-)rezonant se suprapune peste răspunsul nerezonant (de fond) la care sunt supuse toate construcțiile expuse vântului.

Răspunsul structural nerezonant este datorat contribuției frecvențelor joase ale fluctuațiilor vitezei vântului, mai mici decât frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii și este, de obicei, cel mai important contributor la răspunsul structural total pe direcția vântului. Contribuțiile rezonante devin din ce în ce mai semnificative și, în cele din urmă, pot deveni dominante, pe măsură ce structurile sunt mai zvelte/înalte și frecvențele proprii de vibrație și amortizările acestora devin mai reduse.

#### *Bibliografie*

1. CNR-DT 207/2008 Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
2. J. D. Holmes, 2004. Wind Loading of Structures, Taylor & Francis



#### E.4 COEFICIENȚI AERODINAMICI DE PRESIUNE / SUȚIUNE ȘI DE FORȚĂ

Coeficienții aerodinamici pentru evaluarea efectelor vântului asupra construcțiilor pot fi coeficienți aerodinamici de presiune, de suțiuune și de presiune totală (rezultantă) sau/și coeficienți aerodinamici de forță rezultantă și de moment rezultant, de forță și de moment pe unitatea de lungime, și de frecare.

Presiunile vântului ce acționează pe fețele exterioare ale unei construcții se evaluează utilizând coeficienți aerodinamici de presiune / suțiuune exterioară ce se notează cu  $c_{pe}$ . În Figura E.4.1 se indică o distribuție tipică a coeficienților de presiune / suțiuune exterioară pentru un corp având forma de cub. Presiunile ce acționează pe fețele interioare ale construcției se evaluează utilizând coeficienți aerodinamici de presiune / suțiuune interioară notați cu  $c_{pi}$ .

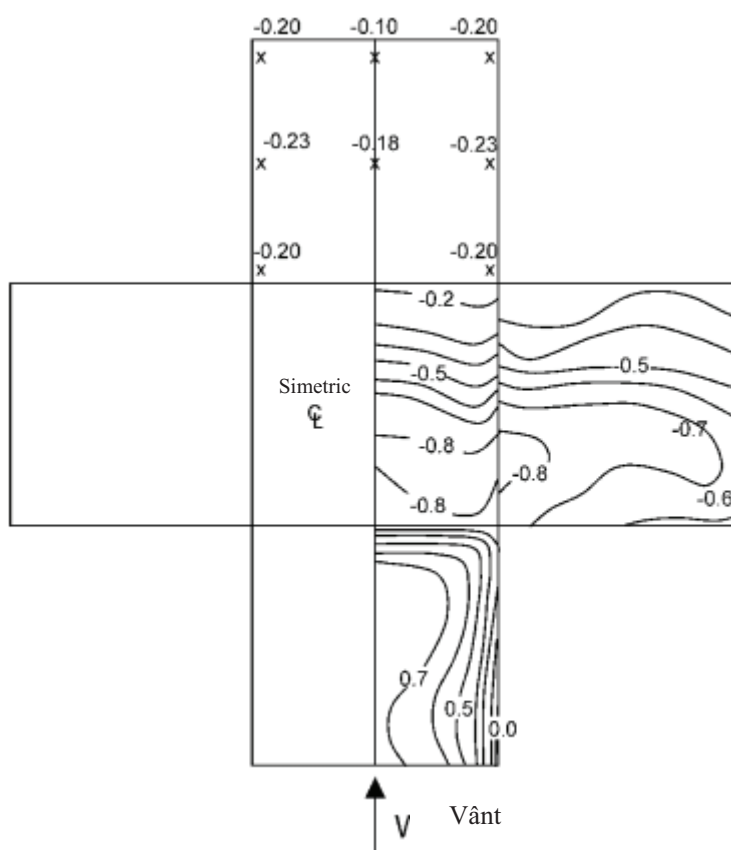


Figura E.4.1. Coeficienți de presiune / suțiuune pe suprafața exterioră a unui cub [1]

Acțiunea de ansamblu produsă de presiunea dinamică a vântului asupra unui corp poate fi exprimată prin rezultanta vectorială a tuturor forțelor din vânt care acționează pe suprafețele corpului la exterior și la interior. Direcția acestei forțe rezultante poate fi diferită de direcția vântului. În cazul general, forța rezultantă pe corp poate fi descompusă în trei componente:

- o componentă orizontală pe direcția vântului, denumită forță de antrenare,  $F_w$ ;

- o componentă orizontală perpendiculară pe direcția vântului, denumită forță laterală,  $F_L$ ;
- o componentă verticală, denumită forță de portanță,  $F_P$ .

Coeficientul aerodinamic de forță  $c_f$  se definește cu relația

$$c_f = \frac{F_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{\perp}} \quad (\text{E.4.1})$$

unde  $A_{\perp}$  este aria frontală a corpului perpendiculară pe direcția vântului,  $V$  este viteza vântului în câmp liber, evaluată la o înălțime de referință convențională și  $\rho$  este densitatea aerului.

Coeficientul de frecare este definit cu relația:

$$c_{fe} = \frac{w_{fe}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad (\text{E.4.2})$$

unde  $w_{fr}$  este acțiunea tangentă pe unitatea de suprafață paralelă cu direcția vântului.

Coeficienții aerodinamici de presiune / sucțiune pot lua valori pozitive (pentru presiuni) sau negative (pentru sucțiuni), în funcție de geometria clădirii. Coeficienții de presiune / sucțiune exterioară au valori pozitive în toate punctele expuse direct vântului și au valori negative pe suprafețe laterale sau neexpuse direct vântului. Valorile pozitive ale coeficientului aerodinamic de presiune pot fi inferioare valorilor negative (considerate în modul) ale coeficientului aerodinamic de sucțiune.

Coeficienții de presiune totală (rezultantă) pot avea atât valori pozitive, cât și negative. Coeficienții aerodinamici de forță pot avea valori pozitive sau negative, în funcție de geometria corpului analizat și de direcția vântului. Coeficienții de frecare au întotdeauna valori pozitive.

Coeficienții aerodinamici locali sunt utilizați pentru evaluarea acțiunilor locale ale vântului pentru proiectarea și verificarea elementelor individuale de acoperiș sau de fațadă.

Valorile coeficienților aerodinamici din Capitolul 4 sunt preluate integral din SR EN-1991-1-4:2006.

Aria de referință este suprafața totală a copertinei pe care se manifestă efecte de presiune/sucțiune generate de acțiunea vântului

### Bibliografie

1. Baines, W. D., 1963. *Effects of velocity distributions on wind loads and flow patterns on buildings*, Proceedings, International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington, U.K., 26–28 June, 198–225
2. SR EN 1991-1-4:2006 - Eurocod 1: Acțiuni asupra structurilor. Partea 1-4: Acțiuni generale. Acțiuni ale vântului, ASRO

## E.5 PROCEDURI DE DETERMINARE A COEFICIENTULUI DE RĂSPUNS DINAMIC

### E.5.1 Turbulența vântului

#### (i) Lungimea scării integrale a turbulenței

Fluctuațiile vitezei instantanee a vântului față de medie pot fi descompuse în rafale armonice având pulsații  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$  (unde  $n$  este frecvența armonice) și lungimi de undă  $\lambda = v_m / n$ , unde  $v_m$  este viteza medie a vântului în direcție longitudinală.

Scara integrală a turbulenței reprezintă o măsură a dimensiunilor medii ale vârtejurilor turbulente ale curgerii aerului. Lungimea scării integrale a turbulenței în direcție longitudinală (pe direcția vântului) este determinată cu relația [5]:

$$L^x = \frac{1}{\overline{v^2}} \cdot \int_0^{\infty} R_{v_1 v_2}(x) dx \quad (\text{E.5.1})$$

unde  $R_{v_1 v_2}(x)$  este funcția de inter-corelație a componentelor longitudinale ale vitezelor fluctuante  $v_1$  și  $v_2$  măsurate în două puncte oarecare 1 și 2 și  $\overline{v^2}$  este valoarea medie pătratică a vitezei fluctuante. Funcția de inter-corelație scade rapid cu distanța între punctele 1 și 2. Fluctuațiile componentelor longitudinale ale vitezei, măsurate în două puncte separate de o distanță considerabil mai mare decât lungimea scării integrale a turbulenței, sunt necorelate.

În codurile de proiectare, pentru evaluarea lungimii scării integrale a turbulenței, se folosesc relații empirice de forma [1]:

$$L^x(z) = c \cdot z^m \quad (\text{E.5.2})$$

unde  $c$  și  $m$  sunt constante determinate experimental.

În Figura E.5.1 este reprezentată variația lungimii scării integrale a turbulenței determinate cu relația (5.1) din cod, în funcție de înălțimea  $z$  și de categoria terenului.

#### (ii) Densitatea spectrală de putere a vitezei fluctuante a vântului

Proprietățile statistice ale fluctuațiilor vitezei față de medie în direcție longitudinală sunt definite complet de densitatea spectrală de putere unilaterală a rafalelor (vitezei fluctuante) pe direcția vântului la cota  $z$ ,  $S_v(z, n)$ . Densitatea spectrală de putere descrie distribuția dispersiei fluctuațiilor vitezei în funcție de conținutul de frecvențe al acestora. Dispersia rafalelor longitudinale se obține integrând densitatea spectrală de putere pentru toate frecvențele:

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} S_v(z, n) dn \quad (\text{E.5.3})$$

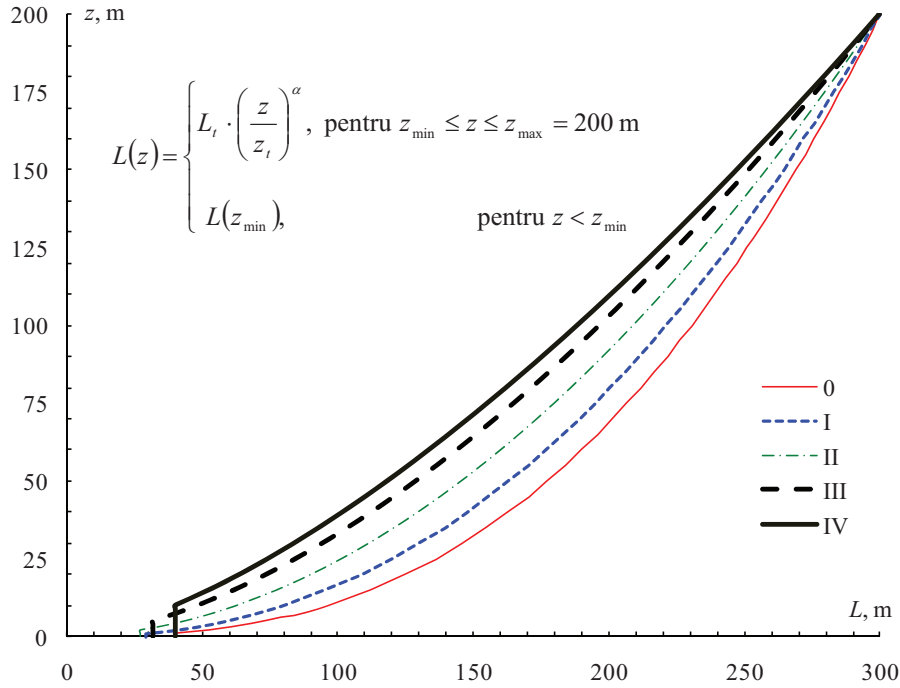


Figura E.5.1 Lungimea scării integrale a turbulenței,  $L(z)$

Densitatea spectrală de putere pentru rafalele longitudinale se normalizează:

$$S_L(z, n) = \frac{n \cdot S_v(z, n)}{\sigma_v^2} \quad (\text{E.5.4})$$

parametrul de normalizare fiind dispersia rafalelor vântului în direcția corespunzătoare.

Aria situată sub densitatea spectrală de putere unilaterală normalizată este egală cu unitatea:

$$\int_0^\infty \frac{S_v(z, n)}{\sigma_v^2} dn = \int_0^\infty \frac{n \cdot S_v(z, n)}{\sigma_v^2} d \ln(n) = 1 \quad (\text{E.5.5})$$

Densitatea spectrală de putere unilaterală și normalizată a rafalelor longitudinale ale vântului din [4,7] și din cod este dată de următoarea relație propusă în [1], Figura E.5.2:

$$S_L(z, n) = \frac{n \cdot S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{[1 + 10,2 \cdot f_L(z, n)]^{\frac{5}{3}}} \quad (\text{E.5.6})$$

unde  $f_L$  este o frecvență adimensională (coordonată Monin) asociată rafalelor longitudinale și reprezintă raportul între lungimea scării integrale a turbulenței și lungimea de undă a rafalei armonice de frecvență  $n$ :

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L_v^x(z)}{v_m(z)} \quad (\text{E.5.7})$$

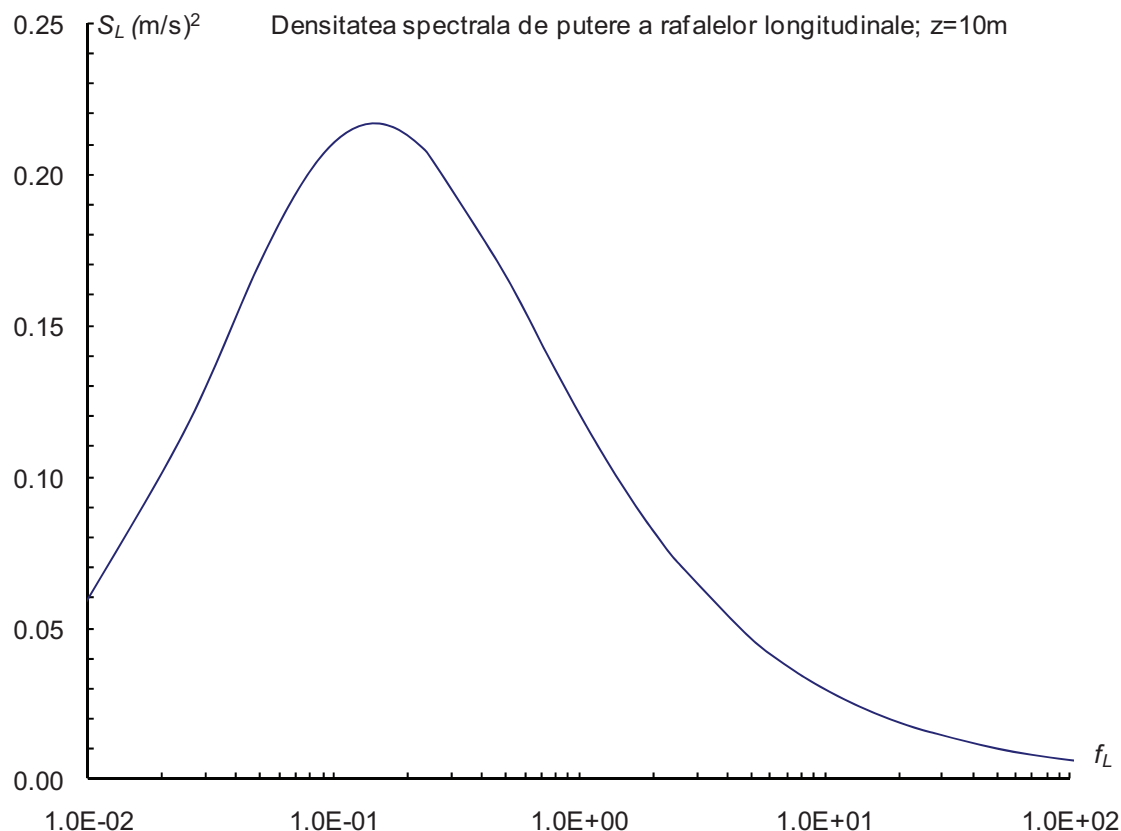


Figura E.5.2. Densitatea spectrală de putere unilaterală normalizată a rafalelor longitudinale

### E.5.2 Procedura detaliată de determinare a coeficientului de răspuns dinamic

Determinarea coeficientului de răspuns dinamic la vânt se bazează pe modelarea stochastică a proceselor aleatoare staționare pentru descrierea vitezei vântului, a forțelor generate de vânt pe construcție și a răspunsului structural la vânt.

Valorile instantanee ale mărimilor de interes (viteza vântului în amplasament,  $V(t)$ , forța generată de vânt pe construcție,  $F(t)$ , deplasarea produsă de vânt,  $X(t)$ ) se descompun într-o componentă medie și o componentă fluctuantă față de medie, variabilă în timp și modelată ca proces stochastic staționar de medie zero:

$$V(t) = v_m + v(t) \quad (\text{E.5.8})$$

$$F(t) = F_m + f(t) \quad (\text{E.5.9})$$

$$X(t) = X_m + x(t) \quad (\text{E.5.10})$$

$$\overline{v(t)} = 0.$$

$$\overline{f(t)} = 0. \quad (\text{E.5.11})$$

$$\overline{x(t)} = 0.$$

În Figura E.5.3 se prezintă grafic elementele modelării stochastice.

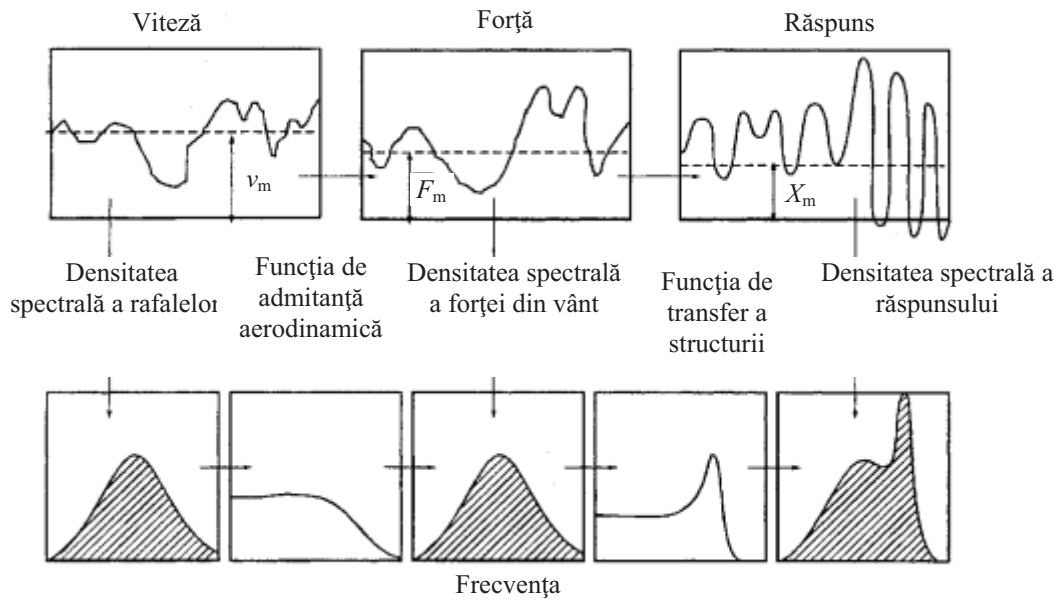


Figura E.5.3. Abordarea folosind vibrații aleatoare pentru determinarea răspunsului dinamic la acțiunea vântului [5]

Relația dintre densitatea spectrală de putere a componentei fluctuante a forței din vânt și densitatea spectrală de putere a componentei fluctuante a vitezei longitudinale a vântului [2, 3, 5] este:

$$S_f(n) = \frac{4 \cdot F_m^2}{v_m^2} \cdot S_v(n) \quad (\text{E.5.12})$$

Pentru determinarea răspunsului structurii se introduce noțiunea de funcție de transfer a structurii (sistemului). Pătratul modului funcției de transfer a sistemului cu un grad de libertate dinamică (GLD):

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{n}{n_1}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right)^2} = \frac{1}{k^2} \cdot |H_0(n)|^2 \quad (\text{E.5.13})$$

În relația (E.5.13)  $k$  este rigiditatea sistemului,  $\xi$  este fracțiunea din amortizarea critică,  $n_1$  este frecvența proprie de vibrație a sistemului cu un GLD și  $|H_0(n)|$  este factorul de amplificare dinamică a răspunsului sistemului cu un GLD expus unei forțe excitatoare armonice.

Relația între valoarea medie a forței din vânt și valoarea medie a deplasării sistemului este:

$$X_m = \frac{1}{k} \cdot |H_0(n=0)| \cdot F_m = \frac{F_m}{k} = \frac{F_m}{m \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_1)^2} \quad (\text{E.5.14})$$

Relația între densitatea spectrală de putere a componentei fluctuante a deplasării sistemului și densitatea spectrală de putere a componentei fluctuante a forței din vânt este:



$$S_x(n) = \frac{1}{k^2} \cdot |H_0(n)|^2 \cdot S_f(n) \quad (\text{E.5.15})$$

Combinând relația (E.5.15) cu relația (E.5.12) se obține:

$$S_x(n) = \frac{1}{k^2} \cdot |H_0(n)|^2 \cdot \frac{4 \cdot F_m^2}{v_m^2} \cdot S_v(n) \quad (\text{E.5.16})$$

Relația (E.5.16) este aplicabilă construcțiilor cu arii frontale reduse în raport cu lungimile scărilor turbulenței atmosferice. Intrucât fluctuațiile vitezei nu se produc simultan pe toată suprafața feței expuse vântului, trebuie considerată corelația acestor fluctuații pe suprafața expusă. Pentru a ține seama de acest efect se introduce funcția de admitanță aerodinamică,  $\chi^2(n)$ , relația (E.5.16) devenind [5]:

$$S_x(n) = \frac{1}{k^2} \cdot |H_0(n)|^2 \cdot \frac{4 \cdot F_m^2}{v_m^2} \cdot \chi^2(n) \cdot S_v(n) \quad (\text{E.5.17})$$

Funcțiile de admitanță aerodinamică  $\chi^2(n)$  evaluează gradul de corelație al rafalelor longitudinale pe aria frontală ( $b \times h$ ) a construcției expusă vântului. Funcțiile de admitanță aerodinamică – notate cu  $R_h$  și  $R_b$  în cod - sunt reprezentate în Figura E.5.4.

Funcția de admitanță aerodinamică,  $\chi^2(n)$  tinde la 1 pentru frecvențe joase și pentru corpuri de dimensiuni reduse. Rafalele cu frecvențe joase sunt aproape perfect corelate și cuprind fața expusă a corpului în totalitate. Pentru frecvențe înalte, sau pentru corpuri cu dimensiuni mari, rafalele nu sunt corelate, admitanța aerodinamică tinde la zero și rafalele nu generează forțe fluctuante totale importante.

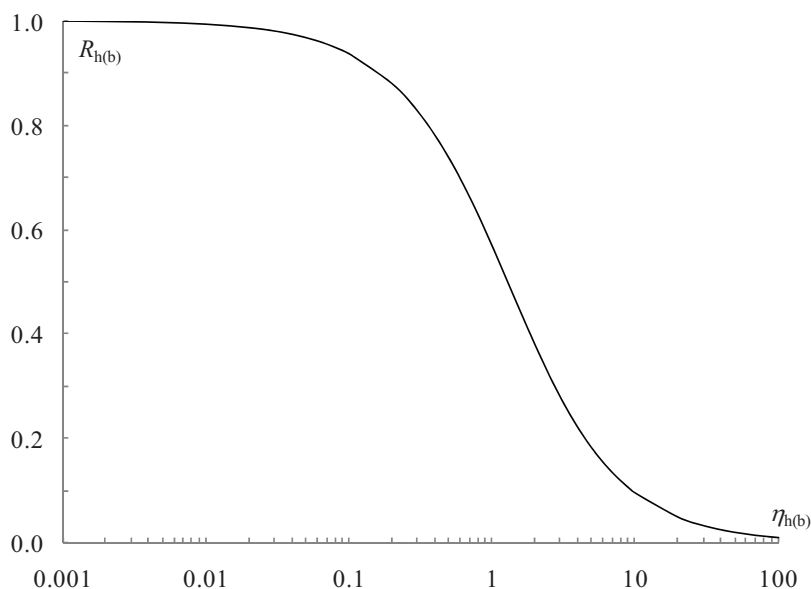


Figura E.5.4 Funcțiile de admitanță aerodinamică,  $R_{h(b)}$

Înlocuind în relația (E.5.17) valoarea medie a deplasării (relația E.5.14), se obține:

$$S_X(n) = \frac{4 \cdot X_m^2}{v_m^2} \cdot |H_0(n)|^2 \cdot \chi^2(n) \cdot S_v(n) \quad (\text{E.5.18})$$

Valoarea medie pătratică a deplasării fluctuante se determină prin integrarea densității spectrale de putere a deplasării pentru toate frecvențele [2, 3, 5]:

$$\begin{aligned} \overline{x^2} = \sigma_X^2 &= \int_0^\infty S_X(n) dn = \frac{4 \cdot X_m^2}{v_m^2} \cdot \sigma_v^2 \cdot \int_0^\infty |H_0(n)|^2 \cdot \chi^2(n) \cdot \frac{S_v(n)}{\sigma_v^2} dn \cong \\ &\cong \frac{4 \cdot X_m^2}{v_m^2} \cdot \sigma_v^2 \cdot \left( \int_0^\infty \chi^2(n) \cdot \frac{S_v(n)}{\sigma_v^2} dn + \chi^2(n_1) \cdot \frac{S_v(n_1)}{\sigma_v^2} \cdot \int_0^\infty |H_0(n)|^2 dn \right) = \\ &= [4 \cdot X_m^2 \cdot I_v^2 \cdot (B^2 + R^2)] = \sigma_B^2 + \sigma_R^2 \end{aligned} \quad (\text{E.5.19})$$

în care

$$B^2 = \int_0^\infty \chi^2(n) \cdot \frac{S_v(n)}{\sigma_v^2} dn \quad (\text{E.5.20})$$

și

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(n_1) \cdot \chi^2(n_1) \quad (\text{E.5.21})$$

și unde:

$S_L(n_1)$  este valoarea densității spectrale de putere unilaterale și normalizate determinată pentru frecvența  $n_1$

$\delta$  - decrementul logaritmic al amortizării; acesta se determină cu relația  $\delta \cong 2 \cdot \pi \cdot \xi$ , unde

$\xi$  este fracțiunea din amortizarea critică.

Integrala din relația (E.5.19) este evaluată ca suma a două componente ce reprezintă partea nerezonantă (de fond) și, respectiv, partea rezonantă a răspunsului fluctuant:

$$\sigma_X^2 = \sigma_B^2 + \sigma_R^2 \quad (\text{E.5.22}).$$

Factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static),  $B^2$  ia în considerare corelația efectivă a valorilor de vârf ale presiunilor pe suprafața expusă la vânt a construcției și este reprezentat în Figura E.5.5. Când suprafața construcției expusă la vânt este mică, atunci  $B^2 \rightarrow 1$  (corelație perfectă). Odată cu creșterea suprafeței construcției expuse la vânt, datorită nesimultaneității valorilor de vârf ale presiunilor,  $B^2$  scade progresiv și tinde la zero.

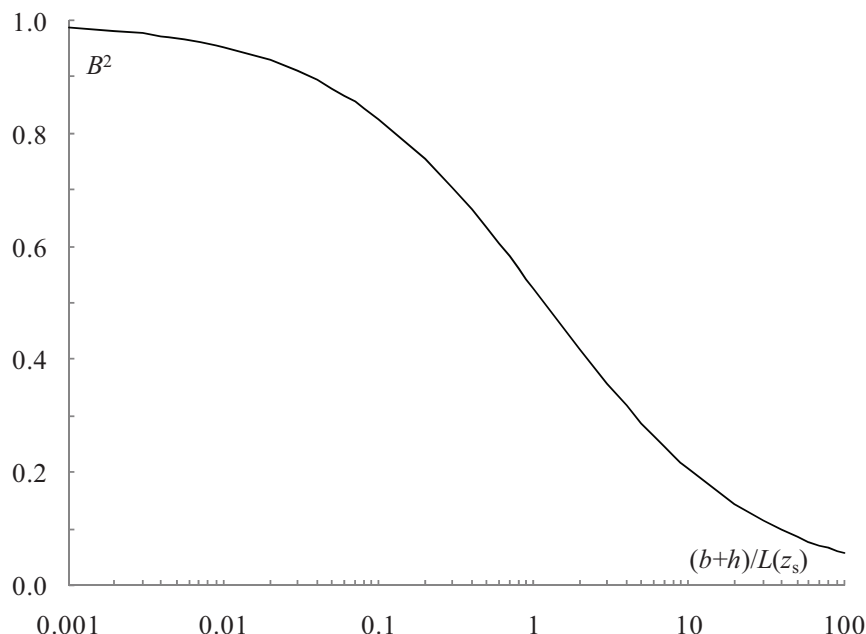


Figura E.5.5 Factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static),  $B^2$

Factorul de răspuns rezonant  $R^2$  depinde de aria  $A$  expusă la vânt și de frecvența proprie fundamentală  $n_l$  și crește sensibil pentru valori reduse ale fracțiunii din amortizarea critică a structurii,  $\xi$ .

Factorul de rafală al răspunsului este definit ca raportul între valoarea maximă așteptată a răspunsului structural într-o perioadă definită de timp (conform prezentului cod, 10 minute) și valoarea medie a răspunsului în aceeași perioadă de timp:

$$G = \frac{X_p}{X_m} = \frac{X_m + k_p \cdot \sigma_X}{X_m} = 1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v \cdot \sqrt{B^2 + R^2} \quad (\text{E.5.23})$$

unde:

$k_p$  – este factorul de vârf al răspunsului ce depinde esențial de intervalul de timp pentru care este calculată valoarea maximă (10 min în cod) și de frecvența proprie a structurii în modul fundamental;

$\sigma_X$  - este abaterea standard a răspunsului structural.

Factorul de rafală  $G$  depinde de dimensiunile, de rigiditatea și de amortizarea structurii. Acesta este cu atât mai mare cu cât structura este mai zveltă, mai flexibilă și/sau mai slab amortizată; factorul de rafală este mic în cazul în care structura este rigidă și puternic amortizată.

Factorul de vârf este dat de expresia [3]:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \geq 3 \quad (\text{E.5.24})$$

unde  $\nu$  este frecvența medie a vibrațiilor structurii expusă vântului incident (frecvență ce se aproximează practic, pentru structuri cu amortizare redusă, cu frecvența de vibrație a construcției în modul fundamental) și  $T$  este intervalul de timp pentru care se determină valoarea maximă așteptată a răspunsului. Factorul de vârf pentru determinarea răspunsului extrem maxim al structurii,  $k_p$  este reprezentat în Figura E.5.7.

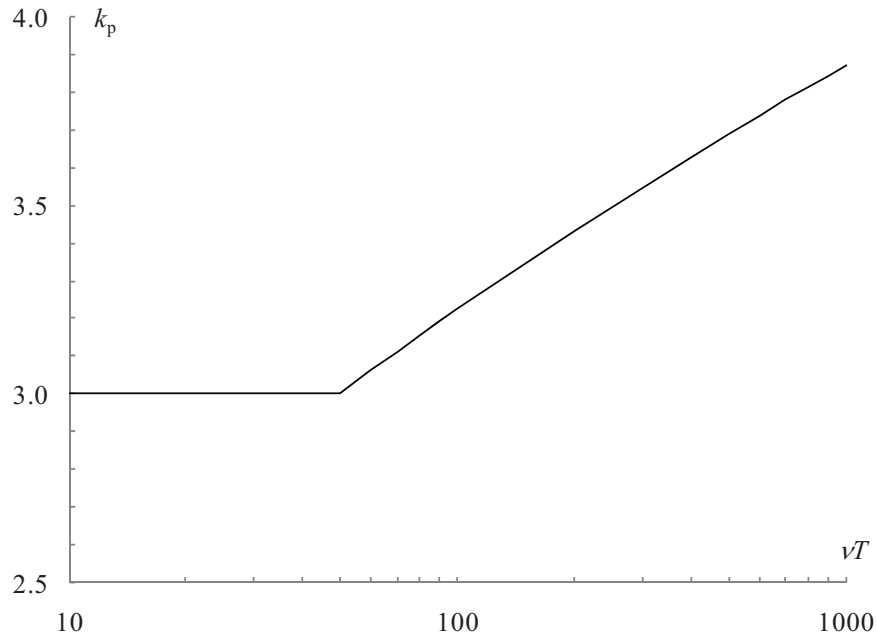


Figura E.5.6 Factorul de vârf,  $k_p$

Coeficientul de răspuns dinamic este definit ca raportul între valoarea maximă așteptată a răspunsului deplasare laterală a structurii ce ține cont de efectele (cvazi-)rezonante și de corelația rafalelor pe aria expusă a construcției și valoarea maximă așteptată a răspunsului deplasare laterală a structurii fără aceste efecte:

$$c_d = \frac{G \cdot X_m}{c_{pq} \cdot X_m} = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 2 \cdot g \cdot I_v} \quad (\text{E.5.25}).$$

Coeficientul de răspuns dinamic se aplică forțelor rezultante (globale) și presiunilor exterioare în direcția vântului. Este important de observat că, spre deosebire de factorul de rafală al răspunsului  $G$ , coeficientul de răspuns dinamic longitudinal  $c_d$  poate fi mai mare, mai mic sau egal cu 1. Condiția  $c_d > 1$  implică  $G > c_{pq}$  și conduce la acțiuni statice echivalente mai mari decât acțiunile aerodinamice de vârf; condiția este valabilă pentru structuri flexibile slab amortizate. Condiția  $c_d < 1$  implică  $G < c_{pq}$  și conduce la acțiuni statice echivalente mai mici decât acțiunile aerodinamice de vârf; condiția este valabilă pentru structuri rigide puternic amortizate [1].

Ordinea operațiilor pentru evaluarea coeficientului  $c_d$  este sintetizată în Tabelul E.5.1.

Tabel E.5.1 Calculul coeficientului de răspuns dinamic la vânt

<i>Pasul</i>	<i>Operațiunea</i>
1	Alegerea unui model structural de referință
2	Determinarea parametrilor geometrici $b, h, z_e$
3	Evaluarea vitezei medii a vântului $v_m(z_s)$
4	Evaluarea intensității turbulenței $I_v(z_s)$
5	Evaluarea scării integrale a turbulenței $L(z_s)$
6	Evaluarea decrementului logaritmic al amortizării structurale, $\delta_s$
7	Evaluarea vectorului propriu fundamental de încovoiere, $\Phi_I$
8	Evaluarea masei echivalente pe unitatea de lungime, $m_e$
9	Evaluarea decrementului logaritmic al amortizării aerodinamice, $\delta_a$
10	Evaluarea decrementului logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale (mase acordate, amortizori cu lichid etE.), $\delta_d$
11	Determinarea parametrilor dinamici $n_I$ și $\delta$
12	Evaluarea factorului de răspuns nerezonant (cvasi-static) $B^2$
13	Evaluarea densității spectrale de putere normalizate a fluctuațiilor față de medie a componentei longitudinale a rafalelor, $S_L(z_s, n_I)$
14	Evaluarea parametrilor $\eta_h$ și $\eta_b$
15	Evaluarea funcțiilor de corelație verticală, $R_h$ și transversală, $R_b$
16	Evaluarea factorului de răspuns rezonant $R^2$
17	Evaluarea frecvenței așteptate $\nu$
18	Evaluarea factorului de vârf $k_p$
19	Evaluarea coeficientului de răspuns dinamic $c_d$

#### E.5.4 Depasări și accelerații pentru starea limită de serviciu a construcției

Coeficientul adimensional  $K_x$  este aproximat prin relația (5.13) din cod și este reprezentat în Figura E.5.7.

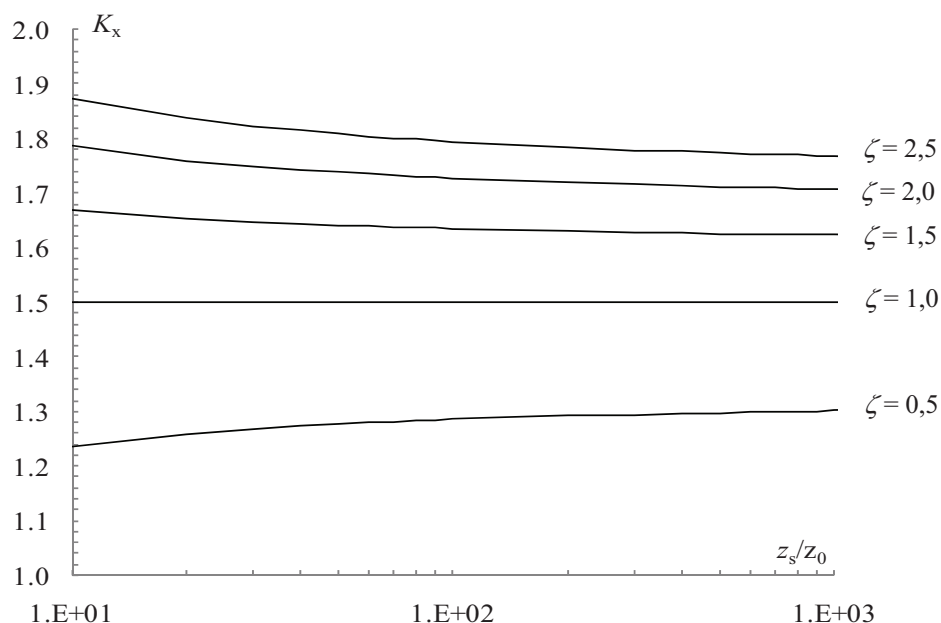


Figura E.5.7. Coeficientului adimensional  $K_x$  conform relației (5.13)

### E.5.5 Criterii de confort

Accelerația limită superioară de confort pentru ocupanții clădirii,  $a_{lim}$  este reprezentată în Figura E.5.8. în funcție de frecvența fundamentală de vibrație a structurii în direcția vântului.

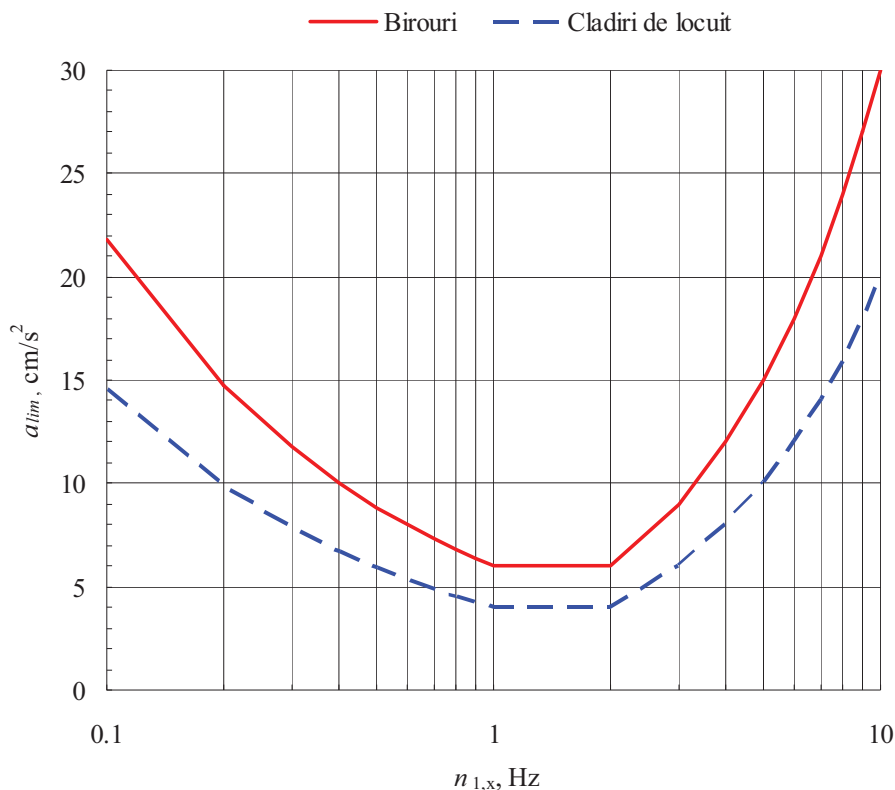


Fig. E.5.8 Valori limită ale accelerației clădirii conform relației (5.16)

### Bibliografie

1. CNR-DT 207/2008 - Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
2. Davenport, A.G., 1963. 'The buffeting of structures by gusts', Proceedings, International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington U.K., 26–8 June, 358–91.
3. Davenport, A.G., 1964. 'Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading', Proceedings, Institution of Civil Engineers 28: 187–96
4. EN 1991-1-4 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, CEN
5. J. D. Holmes, 2004. Wind Loading of Structures, Taylor & Francis
6. SR EN 1991-1-4:2006/NB:2007 - Eurocod 1: Acțiuni asupra structurilor - Partea 1-4: Acțiuni generale – Acțiuni ale vântului. Anexa națională



### E.6 FENOMENE DE INSTABILITATE AEROELASTICĂ GENERATE DE VÂRTEJURI

Curgerea aerului produce efecte de antrenare a corpului imersat. Antrenarea este de natură vâscoasă, generată de frecarea aerului de corp și de natură inerțială, generată de presiunea dinamică a aerului asupra corpului.

Dacă antrenarea generată de frecarea aerului este dominantă, atunci forma corpului este aerodinamică; dacă antrenarea generată de presiunea aerului este dominantă, atunci forma corpului nu este aerodinamică.

Mișcarea aerului se produce în două moduri:

- mișcarea laminară, caracterizată de deplasarea aerului în straturi paralele;
- mișcarea turbulentă, caracterizată de amestecarea violentă a straturilor de aer.

Pentru valori mici ale vitezelor aerului, forțele vâscoase sunt suficient de mari pentru ca să mențină mișcarea acestuia în straturi paralele. La valori mari ale vitezelor, apar efecte inerțiale importante, mișcarea devenind turbulentă. Apariția unuia din cele două moduri de mișcare este caracterizată de numărul Reynolds,  $Re$  ce se definește ca raportul între forțele de inerție și forțele vâscoase dezvoltate în masa de aer în timpul curgerii:

$$Re = \frac{\text{Forța de inerție}}{\text{Forța viscoasă}} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (\text{E.6.1})$$

unde  $\rho$  este densitatea aerului,  $V$  este viteza curentului de aer,  $\mu$  este coeficientul de vâscozitate sau vâscozitatea dinamică a aerului și  $L$  este o dimensiune caracteristică a volumului de aer. Pentru aer la 20°C,  $Re = 67000 \cdot V \cdot L$  ( $V$  în m/s și  $L$  în m). Dacă numărul Reynolds este mare, predomină efectele inerțiale și mișcarea este turbulentă. Dacă numărul Reynolds este mic, predomină efectele vâscoase și mișcarea este laminară.

Pentru construcții zvelte (coșuri de fum, turnuri, cabluri ș.a.) este necesar să se ia în considerare efectul dinamic provocat de desprinderea alternantă a vârtejurilor vântului ce produce o acțiune fluctuantă perpendiculară pe direcția vântului a cărei frecvență depinde de viteza medie a vântului, precum și de forma și de dimensiunile secțiunii în plan ale construcției. În cazul în care frecvența de desprindere a vârtejurilor este apropiată de o frecvență proprie de vibrație a construcției se realizează condițiile de cvasi-rezonanță ce produc amplificări ale amplitudinii oscilațiilor construcției, cu atât mai mari cu cât amortizarea și masa structurii sau a elementului sunt mai mici. Condiția de rezonanță este indeplinită atunci când viteza vântului este teoretic egală cu viteza critică a vântului ce provoacă desprinderea vârtejurilor. În general, viteza critică a vântului pentru multe construcții curențe este o viteză frecventă a acestuia, ceea ce face ca numărul de cicluri de încărcare-descărcare și fenomenul de oboseală să devină importante.

Corpurile ne-aerodinamice produc fenomenul de desprindere alternantă a vârtejurilor. În general, un corp imersat într-un curent de aer produce în urma sa un siaj format din trenuri de

vârtejuri alternante (ciclice) care se desprind de corp (Figura E.6.1) cu o frecvență medie de desprindere dată de relația:

$$n_s = \frac{St \cdot v_m}{b} \quad (E.6.2)$$

unde

$St$  este un parametru adimensional numit numărul lui Strouhal, ce depinde de forma secțiunii și de numărul Reynolds;

$v_m$  este viteza medie a vântului;

$b$  este o dimensiune caracteristică (de referință) a secțiunii corpului.



Figura E.6.1 Sîjalul von Karman pentru o secțiune circulară [1]

Fenomenul de producere și de separare a vârtejurilor depinde de numărul Reynolds în sensul că turbulența crește odată cu numărul Reynolds (Figura E.6.2).

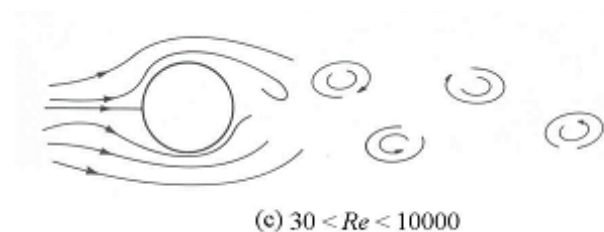


Figura E.6.2. Cilindru de lungime infinită cu secțiune circulară scufundat într-un fluid [1]

Numărul lui Scruton,  $Sc$  (definit de relația 6.4 din cod) este un parametru adimensional ce depinde de masa echivalentă, de fracțiunea din amortizarea critică și de dimensiunea de referință a secțiunii. Când vârtejurile se desprind în rezonanță cu oscilațiile unei structuri ușoare și / sau slab amortizate și caracterizată de un număr Scruton scăzut, fenomenul tinde să devină auto-excitat (sau de interacțiune aer-structură) și dă naștere efectului de sincronizare. În aceste cazuri, tendința nu mai este ca desprinderea de vârtejuri să excite structura, ci ca structura însăși să coomande desprinderea de vârtejuri cvasi-rezonante dând naștere, astfel, unui fenomen de amplificare semnificativ [1].

Conform relației (E.6.2), dependența între frecvența de desprindere a vârtejurilor,  $n_s$  și viteza medie a vântului,  $v_m$  este liniară (Figura E.6.3a). În realitate, această lege nu mai este valabilă pentru viteze mai mari ca  $v_{crit,i}$  (definită de relația 6.2 din cod) într-un interval de viteze  $\Delta v_{crit,i}$ ,

numit de auto-control (sau de sincronizare), ce este cu atât mai mare cu cât numărul lui Scruton este mai mic, Figura E.6.3b [1].

Când numărul Scruton este mare (Figura E.6.3a), desprinderea vârtejurilor provoacă o forță alternantă transversală care, la rândul său, produce o vibrație cvasi-rezonantă. În cazul în care numărul Scruton este mic, desprinderea vârtejurilor produce vibrații atât de ample încât acestea devin principalul mecanism de control al desprinderii alternante de vârtejuri. Prin urmare, desprinderea vârtejurilor se manifestă cu frecvența proprie de vibrație a structurii pentru intervalul de viteze indicat în Figura E.6.3b [1].

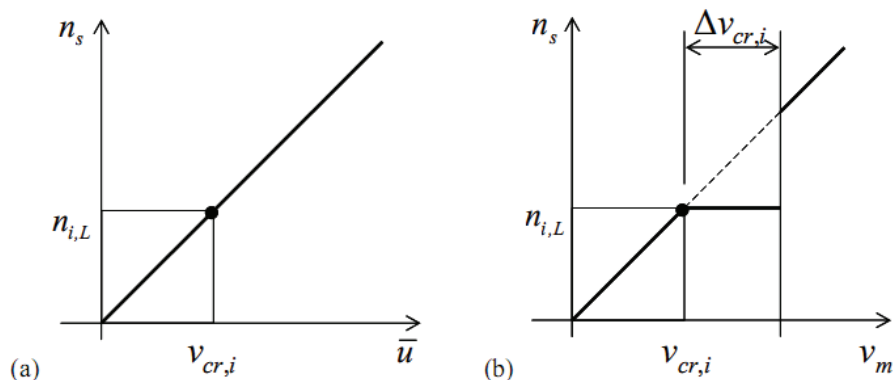


Figura E.6.3 Legea lui Strouhal pentru numere Scruton mari (a) și mici (b)

În condiții de rezonanță, cu cât numărul Scruton este mai mic (deci, cu cât structura este mai ușoară și/sau mai slab amortizată), cu atât amplificarea răspunsului este mai mare. Se pot distinge următoarele situații [1]:

- pentru  $Sc > 30$ , fenomenul de desprindere de vârtejuri nu produce, în general, efecte severe; totuși, este recomandată efectuarea unei verificări;
- pentru  $5 \leq Sc \leq 30$ , fenomenul de desprindere de vârtejuri este sensibil, în primul rând la intensitatea turbulenței; valorile ridicate ale intensității turbulenței reduc riscul de vibrații violente iar valorile reduse ale intensității turbulenței pot amplifica acest fenomen;
- pentru  $Sc < 5$ , vibrațiile induse de desprinderea de vârtejuri pot fi de amplitudine mare și foarte periculoase.

Pentru clădiri zvelte ( $h/d > 4$ ) și pentru coșuri de fum ( $h/d > 6,5$ ) dispuse în perechi sau grupate se va considera sporirea efectelor vântului produse de siajul turbulent. Efectele sporite produse de siajul turbulent asupra unei clădiri sau asupra unui coș de fum pot fi, în mod simplificat, considerate neglijabile dacă cel puțin una dintre condițiile următoare este verificată:

- distanța dintre două clădiri sau coșuri de fum este de 25 ori mai mare decât dimensiunea clădirii sau a coșului amplasat în amonte față de direcția de curgere a aerului, măsurată perpendicular pe direcția vântului;

- frecvența proprie fundamentală de vibrație a clădirii sau a coșului (pentru care se evaluează efectele produse de turbulența vântului) este mai mare de 1 Hz.

Dacă nu sunt îndeplinite condițiile precedente este necesară efectuarea de teste în tunelul aerodinamic de vânt.

Amplitudinile vibrațiilor induse de desprinderea vârtejurilor se pot reduce prin montarea de dispozitive aerodinamice (doar în condiții speciale, de exemplu pentru numere Scruton mai mari ca 8) sau dispozitive de amortizare pe structură. Astfel de aplicații necesită consultanță de specialitate.

### *Bibliografie*

1. CNR-DT 207/2008 Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

## E. ANEXA A ZONAREA ACȚIUNII VÂNTULUI ÎN ROMÂNIA

Generația de standarde de acțiuni din țările avansate din anii '70 ai secolului XX a introdus conceptele inovative ale teoriei statistice a valorilor extreme și a definit intensitățile acțiunilor din hazard natural (cutremur, vânt, zăpadă ș.a.) cu anumite intervale medii de recurență (perioade medii de revenire), în ani.

În prezent, practica internațională utilizează valori caracteristice ale acțiunilor din vânt având intervalul mediu de recurență standard de 50 ani,  $IMR = 50$  ani. Aceste valori au probabilitatea de depășire 64% în 50 ani și 2% într-un an.

Față de ediția precedentă a codului (Normativ *NP 082-2004*), baza de date meteorologice privind viteza vântului a fost completată cu valorile maxime anuale ale vitezelor vântului înregistrate în România între anii 1989-2005. Ca urmare, pentru zonarea hazardului natural din vânt s-au utilizat ca date de intrare valorile maxime anuale ale vitezei vântului măsurate la 10 m deasupra terenului până în anul 2005, la peste 140 de stații meteorologice ale Administrației Naționale de Meteorologie. Rezultatele analizei statistice sunt valorile caracteristice ale vitezei vântului având  $IMR = 50$  ani, determinate în repartiția de valori extreme tip I, Gumbel pentru maxime. Repartiția de probabilitate Gumbel pentru maxime este recomandată în ultimele 4 ediții ale standardului american *ASCE 7/(1988, 1993, 2000, 2005) - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Documentul *Joint Committee on Structural Safety, Wind Loads*, 1995, 2000 și în Documentul *ISO/TC 98/SC3/WG 2/N 129 rev, Draft for DP 4354, Wind Actions on Structures* și este justificată de corelația între coeficienții de oblicitate și de variație ai maximelor anuale măsurate în stațiile meteorologice din România pe o durată de peste 50 de ani.

Rezultatele calculelor statistice efectuate au fost sintetizate în harta de zonare a valorilor de referință ale presiunii dinamice a vântului mediate pe 10 minute, independent de direcția de acțiune a vântului ( $c_{dir} = 1,0$ ), și având un interval mediu de recurență de 50 ani (vezi Figura 2.1 din prezentul cod).

Cu titlu informativ, în Tabelul E.A.1 sunt prezentate valorile factorului direcțional  $c_{dir}$  pentru vitezele maxime ale vântului pe 16 direcții înregistrate în Câmpia Română, pentru orașul București.

Tabelul E.A.1. București. Factorul direcțional al vitezei vântului având un interval mediu de recurență de 50 ani,  $c_{dir}$  [3]

Direcția	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
$c_{dir}$	0,34	0,52	0,97	0,83	0,48	0,38	0,38	0,34
Direcția	S	SSV	SV	VSV	V	VNV	NV	NNV
$c_{dir}$	0,41	0,41	0,52	0,52	0,55	0,42	0,31	0,38

Relațiile (A.2) și (A.3) din cod au fost calibrate pe baza datelor obținute în stațiile meteorologice din România situate la peste 1000 m altitudine.

În Tabelul E.A.2 sunt prezentate valorile de referință ale presiunii dinamice a vântului pentru 10 stații meteorologice situate la peste 1000 m altitudine, care au fost determinate pe baza maximelor anuale ale vitezei medii a vântului măsurate la o înălțime de 10 m și mediate pe 10 minute.

Tabelul E.A.2. Valori caracteristice ale presiunii dinamice a vântului în stații meteorologice din România situate la altitudini de peste 1000 m

Nr. crt.	Stația meteorologică	Altitudinea, m	$q_b$ , Pa
1.	Băișoara	1360	307
2.	Fundata	1384	833
3.	Semenic	1432	1027
4.	Cuntu	1450	626
5.	Păltiniș	1453	1094
6.	Rarău	1536	822
7.	Parang	1548	501
8.	Lăcăuți	1776	1052
9.	Iezer	1785	871
10.	Vlădeasa	1836	978

Relațiile (A.4) și (A.5) din codul de proiectare au la bază rapoarte de fractili determinate în repartitia Gumbel pentru maxime pentru diferite valori ale coeficientului de variație a valorilor maxime anuale ale vitezelor vântului. Rezultatele analizei sunt prezentate în Figura E.A.1.

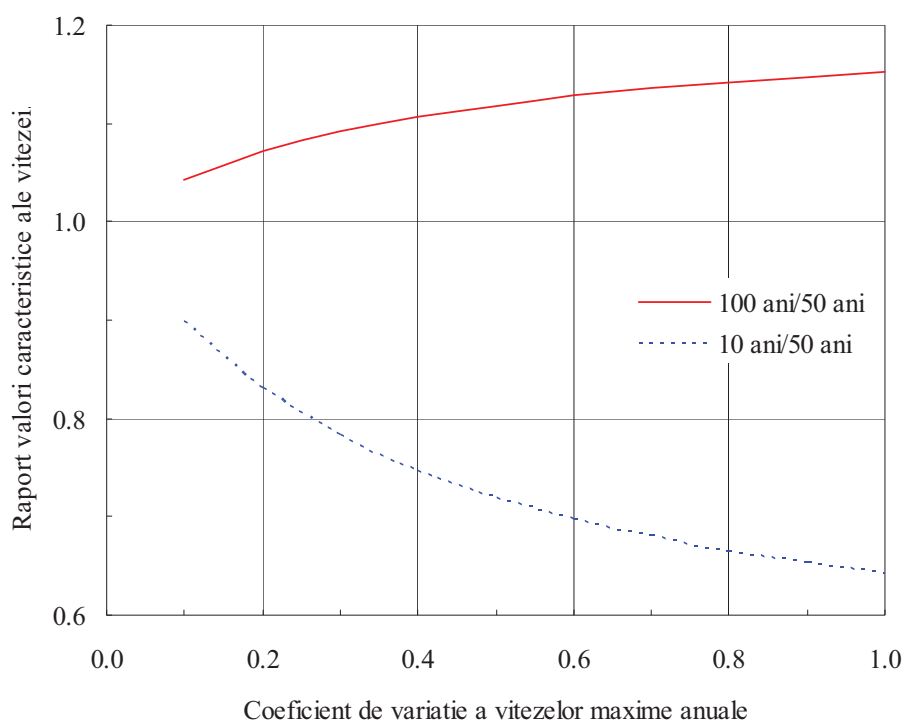


Figura E.A.1. Rapoarte ale valorilor caracteristice ale vitezei maxime anuale a vântului

$$\frac{v_{b,IMR=100\text{ ani}}}{v_{b,IMR=50\text{ ani}}} \text{ și } \frac{v_{b,IMR=10\text{ ani}}}{v_{b,IMR=50\text{ ani}}}$$

### Bibliografie

1. D. Ghiocel, D. Lungu, 1975. *Wind, snow and temperature effects on structures, based on probability*, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, U.K.
2. D. Lungu, R. Văcăreanu, A. Aldea, C. Arion, 2000. *Advanced Structural Analysis*, Editura CONSPRESS, 177 p., ISBN 973-8165-15-6
3. Lungu D., Demetriu S., Aldea A., 1994. *Basic code parameters for environmental actions in Romania harmonised with EUROCODE 1*, Scientific Bulletin of Technical University of Civil Engineering Bucharest, Vol.2/1994, p.35-44
4. Lungu D., van Gelder P., Trandafir R., 1996. *Comparative study of Eurocode 1, ISO and ASCE procedures for calculating wind loads*. IABSE Colloquium, Basis of Design and Actions on Structures, Background and Application of EUROCODE 1. Delft University of Technology, March 27-29, p.345-354
5. Lungu, D., Aldea, A., Demetriu, S., 1998. *Probabilistic wind and snow hazards assessment for Romania*, Proceedings of the 1st International Scientific-Technical Conference – Technical Meteorology of the Carpathians, Ukraine, p.35-40

**ANEXA nr. 2**

**ANEXA F (informativă) – EXEMPLE DE CALCUL**



## CUPRINS

### F.1 EVALUAREA VITEZEI ȘI A PRESIUNII DINAMICE A VÂNTULUI

F.1.1 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului

F.1.2 Valori medii ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului

F.1.3 Valori de vârf ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului

### F.2 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O HALĂ INDUSTRIALĂ

F.2.1 Informații generale

F.2.2 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului pe amplasament

F.2.3 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide exterioare

F.2.3.1 *Cazul 1*. Vântul acționează perpendicular pe latura scurtă a halei

F.2.3.2 *Cazul 2*. Vântul acționează perpendicular pe latura lungă a halei

F.2.4 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide interioare

F.2.4.1 Distribuția presiunilor interioare pe pereții halei

F.2.4.2 Distribuția presiunilor interioare pe acoperișul halei

F.2.5 Presiuni totale

F.2.5.1 *Cazul 1*

F.2.5.2 *Cazul 2*

F.2.5.3 *Cazul 3*

F.2.5.4 *Cazul 4*

F.2.6 Forța de frecare

F.2.6.1 *Cazul 1*. Vântul acționează perpendicular pe latura scurtă a halei

F.2.6.2 *Cazul 2*. Vântul acționează perpendicular pe latura lungă a halei

F.2.7 Forța globală pe direcția vântului

F.2.7.1 *Cazul 1*

F.2.7.2 *Cazul 2*

F.2.7.3 *Cazul 3*

F.2.7.4 *Cazul 4*

### F.3 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O CLĂDIRE DE LOCUIT CU REGIM MIC DE ÎNĂLȚIME

F.3.1 Informații generale

F.3.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

F.3.3 Distribuția presiunilor / succionilor pe suprafețele rigide exterioare

F.3.4 Forța globală pe direcția vântului

F.3.4.1 *Cazul I* (direcția vântului  $\theta = 0^\circ$  - vânt perpendicular pe coamă – acțiune pe pereți)

F.3.4.2 *Cazul II* (direcția vântului  $\theta = 90^\circ$ )

### F.4 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O CLĂDIRE MULTIETAJATĂ DE BIROURI

F.4.1 Informații generale

F.4.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

F.4.3 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide exterioare

F.4.4 Coeficientul aerodinamic de forță

F.4.5 Coeficientul de răspuns dinamic

#### F.4.6 Forța globală pe direcția vântului

F.4.6.1 *Cazul I* (vânt perpendicular pe latura lungă - direcția vântului  $\theta = 0^\circ$ )

F.4.6.2 *Cazul II* (vânt perpendicular pe latura lungă - direcția vântului  $\theta = 90^\circ$ )

### F.5 EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC LA ACȚIUNEA VÂNTULUI PENTRU O CLĂDIRE CU REGIM MARE DE ÎNĂLȚIME

#### F.5.1 Informații generale

F.5.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

F.5.3 Coeficientul de răspuns dinamic

F.5.4 Forța globală pe direcția vântului

F.5.5 Accelerația longitudinală la vârful clădirii

### F.6. EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC LA ACȚIUNEA VÂNTULUI PENTRU UN COȘ DE FUM INDUSTRIAL

#### F.6.1 Informații generale

F.6.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

F.6.3 Parametrii dinamici și aerodinamici

F.6.4 Coeficientul de răspuns dinamic

F.6.5 Forța globală pe direcția vântului

F.6.6 Viteza critică de desprindere a vârtejurilor

F.6.7 Valoarea de vârf a deplasării pe direcția transversală vântului

F.6.8 Forța statică echivalentă transversală

### F.7 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI ASUPRA UNEI COPERTINE

#### F.7.1 Informații generale

F.7.2 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului pe amplasament

F.7.3 Forța globală din vânt ce acționează asupra copertinei

F.7.4 Presiunea totală ce acționează pe suprafața copertinei

F.7.5 Forța de frecare

### F.8. EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PENTRU UN POD

#### F.8.1 Informații generale

F.8.2 Evaluarea vitezei și presiunii dinamice a vântului în amplasament

F.8.3 Evaluarea acțiunii vântului pe suprastructura podului

## *F.1 EVALUAREA VITEZEI ȘI A PRESIUNII DINAMICE A VÂNTULUI*

### *F.1.1 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului*

În acest exemplu de calcul se evaluează valorile vitezelelor și presiunilor dinamice ale vântului la o înălțime  $z = 20$  m deasupra terenului pentru categoria de teren III (zone acoperite uniform cu vegetație, sau cu clădiri și cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,3$  m) în municipiul Călărași.

Conform hărții de zonare din Figura 2.1, presiunea de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri cu o probabilitate de depășire într-un an de 0,02 (interval mediu de recurență de 50 de ani) este  $q_b = 0,6$  kPa, iar viteza de referință a vântului se determină cu relația (A.3) ( $q_b$  exprimat în Pa):

$$v_b = \sqrt{\frac{2q_b}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 600}{1,25}} = 31 \text{ m/s}$$

unde  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  este densitatea aerului.

### *F.1.2 Valori medii ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului*

Viteza medie a vântului,  $v_m(z)$ , la o înălțime  $z$  deasupra terenului depinde de rugozitatea terenului și de viteza de referință a vântului,  $v_b$  (fără a lua în considerare orografia amplasamentului) și se determină cu relația (2.3)

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot v_b$$

unde  $c_r(z)$  este factorul de rugozitate pentru viteza vântului care se determină cu relația (2.4)

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{pentru } z_{\min} < z \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ c_r(z = z_{\min}) & \text{pentru } z \leq z_{\min} \end{cases}$$

unde factorul de teren  $k_r$  este dat de relația (2.5)

$$k_r(z_0) = 0,189 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$$

Valorile  $z = 0,3\text{m}$  și  $z_{\min} = 5\text{m}$  sunt date în Tabelul 2.1, iar valoarea  $k_r(z_0) = 0,214$  este indicată în Tabelul 2.2.

Pentru municipiul Călărași viteza medie a vântului la o înălțime  $z = 20$  m deasupra terenului și pentru categoria de teren III (zone acoperite uniform cu vegetație, sau cu clădiri și cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,3$  m) este:

$$c_r(20) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,214 \cdot \ln\left(\frac{20}{0,3}\right) = 0,214 \cdot 4,2 = 0,90$$

$$v_m(20) = c_r(20) \cdot v_b = 0,90 \cdot 31 = 28 \text{ m/s}$$

Valoarea medie a presiunii dinamice a vântului,  $q_m(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului (fără a lua în considerare orografia amplasamentului) depinde de rugozitatea terenului și de valoarea de referință a presiunii dinamice a vântului,  $q_b$  și se determină cu relația (2.7):

$$q_m(z) = c_r^2(z) \cdot q_b$$

unde  $c_r^2(z)$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului ce se determină cu relația (2.9)

$$c_r^2(z) = \begin{cases} k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 & \text{pentru } z_{\min} < z \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ c_r^2(z = z_{\min}) & \text{pentru } z \leq z_{\min} \end{cases}$$

Valorile  $k_r^2(z_0) = 0,046$  pentru categoria III de teren este indicată în Tabelul 2.2.

Pentru amplasamentul Călărași, presiunea dinamică medie a vântului la o înălțime  $z = 20$  m deasupra terenului și pentru categoria de teren III (zone acoperite uniform cu vegetație, sau cu clădiri și cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,3$  m) este:

$$c_r^2(20) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 = 0,046 \cdot \left[ \ln\left(\frac{20}{0,3}\right) \right]^2 = 0,046 \cdot 17,63 = 0,81$$

$$q_m(20) = c_r^2(20) \cdot q_b = 0,81 \cdot 0,6 = 0,49 \text{ kPa}$$

### F.1.3 Valori de vârf ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.13):

$$v_p(z) = c_{pv}(z) \cdot v_m(z)$$

unde  $c_{pv}(z)$  este factorul de rafală pentru viteza medie a vântului la o înălțime  $z$  deasupra terenului ce se definește conform relației (2.14)

$$c_{pv}(z) = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z)$$

unde  $g$  este factorul de vârf a cărui valoare recomandată este  $g = 3,5$ .

Intensitatea turbulenței vântului,  $I_v$  la înălțimea  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.11):

$$I_v(z) = \begin{cases} \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} & \text{pentru } z_{\min} < z \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ I_v(z = z_{\min}) & \text{pentru } z \leq z_{\min} \end{cases}$$

Valorile factorului de proporționalitate  $\beta$  pot fi considerate conform relației (2.12):

$$4,5 \leq \beta = 4,5 - 0,856 \ln(z_0) \leq 7,5$$

Conform tabelului 2.3, pentru categoria de teren III, valoarea  $\sqrt{\beta} = 2,35$ .

Valoarea de vârf a vitezei vântului la o înălțime  $z=20$  m deasupra terenului și pentru categoria de teren III în municipiul Călărași se determină după cum urmează:

$$I_v(20) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{2,35}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{20}{0,3}\right)} = \frac{2,35}{10,5} = 0,224$$

$$c_{pv}(20) = 1 + g \cdot I_v(20) = 1 + 3,5 \cdot I_v(20) = 1 + 3,5 \cdot 0,224 = 1,784$$

$$v_p(20) = c_{pv}(20) \cdot v_m(20) = 1,784 \cdot 28 = 49,74 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului,  $q_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.15)

$$q_p(z) = c_{pq}(z) \cdot q_m(z)$$

unde  $c_{pq}(z)$  este factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului la înălțimea  $z$  deasupra terenului ce se definește cu relația (2.16):

$$c_{pq}(z) = 1 + 2g \cdot I_v(z) = 1 + 7 \cdot I_v(z)$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului la o înălțime  $z = 20$  m deasupra terenului și pentru categoria de teren III în municipiul Călărași se calculează după cum urmează:

$$c_{pq}(20) = 1 + 2g \cdot I_v(20) = 1 + 7 \cdot I_v(20) = 1 + 7 \cdot 0,224 = 2,568$$

$$q_p(20) = c_{pq}(20) \cdot q_m(20) = 2,568 \cdot 0,49 = 1,25 \text{ kPa}$$

## F.2 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O HALĂ INDUSTRIALĂ

### F.2.1 Informații generale

- *Caracteristici geometrice*: hala are o formă dreptunghiulară în plan având dimensiunile laturilor de 60 m respectiv 150 m și o înălțime la nivelul aticului de 11,9 m; înălțimea aticului este de 0.9 m; hala are o ușă de 16 m lungime și de 8 m înălțime pe una dintre cele două laturi scurte; greutatea totală a halei este de 76500 kN;
- *Caracteristici structurale*: hală cu structura metalică în cadre contravântuite; închiderile laterale sunt realizate din panouri prefabricate;
- *Caracteristici dinamice ale structurii halei*:
  - prima perioadă de vibrație pe direcția scurtă a halei  $T_{1x} = 0,65$  s ( $n_{1x} = 1,54$ Hz)
  - prima perioadă de vibrație pe direcția lungă a halei  $T_{1y} = 0,54$  s ( $n_{1y} = 1,85$ Hz)
- *Clasa de importanță-expunere pentru acțiunea vântului*: II (parcuri industriale cu construcții unde au loc procese tehnologice de producție și alte construcții de aceeași natură); factor de importanță-expunere  $\gamma_{Iw}=1,15$ ;
- *Condiții de amplasament*: hala este amplasată în municipiul Iași, categoria de teren II (câmp deschis-terenuri cu iarbă și/sau cu obstacole izolate – copaci, clădiri – aflate la distanțe de cel puțin de 20 de ori înălțimea obstacolului –  $z_0=0.05$ m).

### F.2.2 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului pe amplasament

Conform hărții de zonare a valorilor de referință ale presiunii dinamice a vântului având  $IMR = 50$  ani (Figura 2.1) valoarea de referință a presiunii dinamice a vântului pentru municipiul Iași este  $q_b = 0,7$  kPa.

Viteza de referință a vântului în amplasament se determină cu relația (A.3) ( $q_b$  exprimat în Pa):

$$v_b = \sqrt{\frac{2q_b}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 700}{1,25}} = 33,47 \text{ m/s}$$

unde  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  este densitatea aerului.

### F.2.3 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide exterioare

Presiunea / suucțiunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide exterioare ale halei industriale (pereți exteriori, atic, acoperiș) se determină cu relația (3.1):

$$w_e = \gamma_{Iw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

unde

$q_p(z_e)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_e$ ;  
 $z_e$  este înălțimea de referință pentru presiunea exterioară;

$c_{pe}$  este coeficientul aerodinamic de presiune / sucțiune pentru suprafețe exterioare;  
 $\gamma_{Iw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

Conform pct. 4.2.2 înălțimea de referință  $z_e$  în cazul acoperișului halei considerate este:

$$z_e = h + h_p = 11 \text{ m} + 0,9 \text{ m} = 11,9 \text{ m}$$

unde

$h_p = 0,9 \text{ m}$  – înălțimea aticului și

$h = 11,0 \text{ m}$  este înălțimea halei.

Deoarece înălțimea  $h$  a halei este mai mică decât dimensiunea în plan a acesteia perpendiculară pe direcția vântului,  $b = 60 \text{ m}$ , rezultă o distribuție de presiuni / sucțiuni pentru suprafețe exterioare ca în Figura F.2.1.

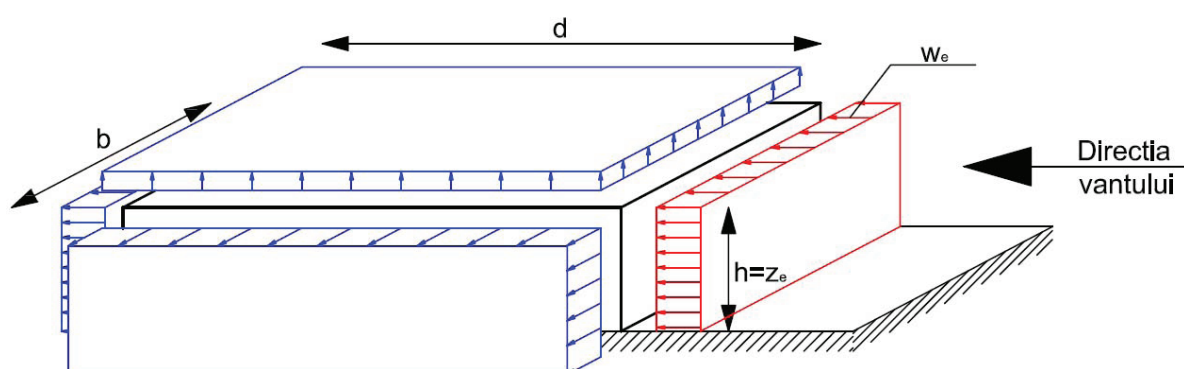


Figura F.2.1. Distribuția de presiuni / sucțiuni pe suprafețele exterioare ale halei

Valoarea medie a presiunii dinamice a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină după cum urmează (folosind relațiile 2.7 și 2.9 și Tabelul 2.2):

$$k_r^2(z_0) = 0,036 \text{ (teren categoria II)}$$

$$c_r^2(z_e) = k_r^2(z_0) \left( \ln \frac{z_e}{z_0} \right)^2$$

$$c_r^2(z_e) = 0,036 \left( \ln \frac{11,9}{0,05} \right)^2 = 1,078$$

$$q_m(z_e) = c_r^2(z_e) \cdot q_b$$

$$q_m(z_e) = 1,078 \cdot 0,7 = 0,754 \text{ kPa}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină după cum urmează (folosind relațiile 2.11, 2.15 și 2.16 și Tabelul 2.3):

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$I_v(z_e) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_e}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln \left( \frac{11,9}{0,05} \right)} = 0,194$$

$$c_{pq}(z_e) = 1 + 2g \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot 0,194 = 2,361$$

$$q_p(z_e) = c_{pq}(z_e) \cdot q_m(z_e) = 2,361 \cdot 0,754 = 1,781 \text{ kPa}$$

Presiunea/sucțiunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide exterioare ale halei industriale:

$$w_e = \gamma_{lw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e) = 1,15 \cdot 1,781 \cdot c_{pe} = 2,049 \cdot c_{pe} \text{ [kPa]}$$

#### F.2.3.1 Cazul 1. Vântul acționează perpendicular pe latura scurtă a halei

- Distribuția presiunilor / suucțiunilor pe pereții exteriori ai halei

Conform pct. 4.2.2 rezultă:

$$e = \min(b, 2h) = \min(60 \text{ m}, 22 \text{ m}) = 22 \text{ m}, e < d$$

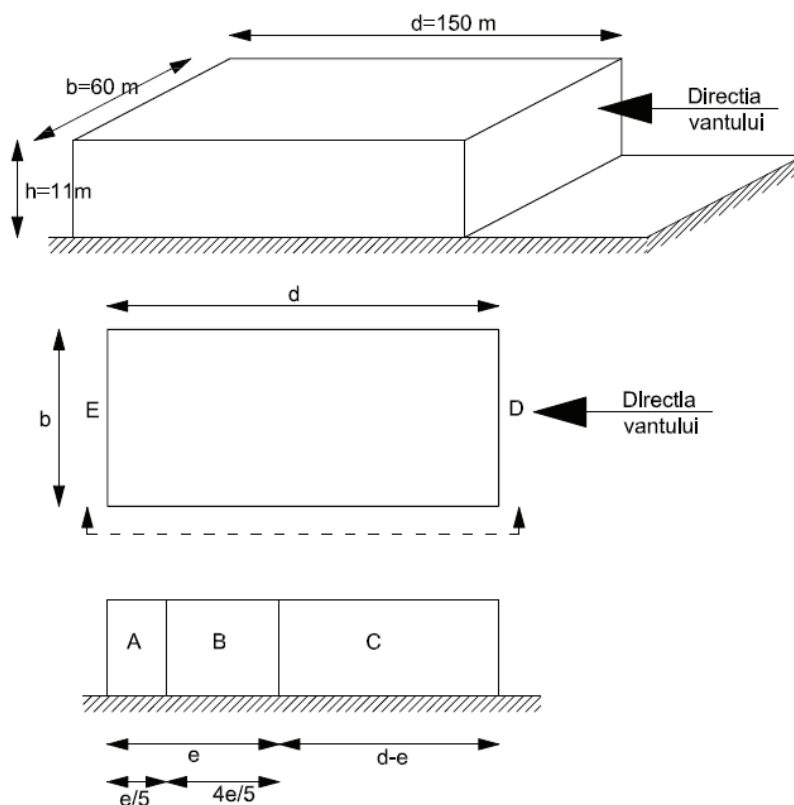


Figura F.2.2. Definirea zonelor A, B, C, D și E pentru pereții verticali ai halei pentru care se determină coeficienții de presiune / suucțiune exterioară  $c_{pe}$

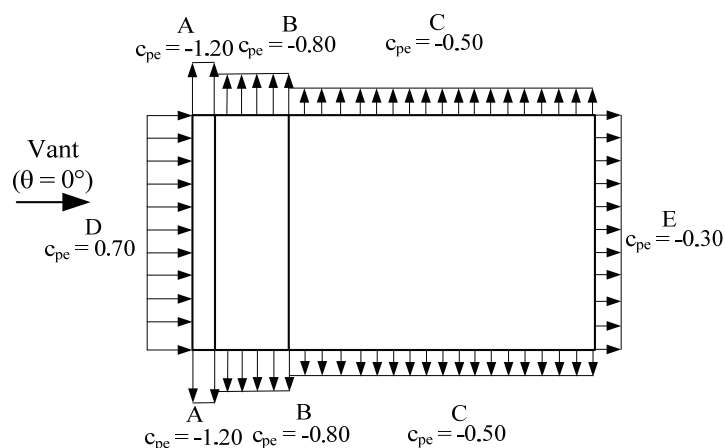
Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune exterioară  $c_{pe,10}$  se obțin din Tabelul 4.1 în funcție de raportul  $h/F$ . Pentru hala considerată (vezi Tabel F.2.1 și Figura F.2.3):

$$\frac{h}{d} = \frac{11,0}{150} = 0,073 < 0,25$$



Tabel F.2.1. Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / sucțiune exterioară  $c_{pe}$ 

Zona	A	B	C	D	E
$h/d$	$c_{pe}$				
0,073	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3

Figura F.2.3 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune / sucțiune pe suprafețele rigide ( $\theta = 0^\circ$ )

Întrucât

$$w_e = 2,049 \cdot c_{pe} \text{ [kPa]}$$

rezultă valorile presiunilor / sucțiunilor pe pereții exteriori ai halei din Tabelul F.2.2.

Tabel F.2.2. Valorile presiunilor/sucțiunilor pe pereții exteriori ai halei

Zona	A	B	C	D	E
$c_{pe}$	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3
$w_e$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615

- Distribuția presiunilor pe aticul halei

Aticul halei nu prezintă goluri și conform paragrafului (1) de la subcapitolul 4.4 coeficientul de obstrucție  $\varphi = 1$ . Din Tabelul 4.9 se aleg coeficienții  $c_{p,net}$  pentru coeficientul de obstrucție egal cu 1 și pentru cazul peretelui cu colț (aticul halei este închis pe toate laturile). Valorile coeficienților aerodinamici de presiune rezultantă  $c_{p,net}$  sunt date în Tabelul F.2.3 pentru zonele din Figura F.2.4.

Tabel F.2.3. Valorile coeficienților  $c_{p,net}$ 

Zona	A	B	C	D
$\varphi = 1$	2,1	1,8	1,4	1,2

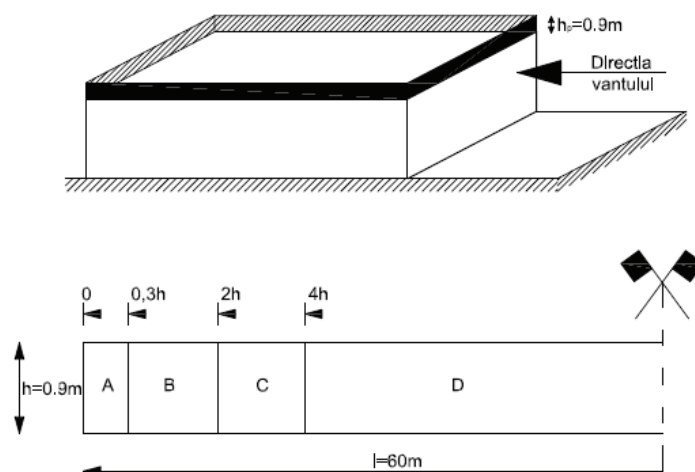


Figura F.2.4. Definierea zonelor A, B, C și D pentru aticul halei

Valorile presiunilor rezultante (totale) distribuite pe aticul halei (Tabel F.2.4) se evaluează cu următoarea expresie:

$$w_e = \gamma_{Iw} \cdot c_{p,net} \cdot q_p(z_e) = 1,5 \cdot 1,781 \cdot c_{p,net} = 2,049 \cdot c_{p,net} \text{ [kPa]}$$

Tabel F.2.4. Valorile presiunilor totale pe aticul halei

Zona	A	B	C	D
$c_{p,net}$	2,1	1,8	1,4	1,2
$w_e$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

- Distribuția presiunilor / sucțiunilor pe acoperișul halei

Acoperișul halei prezintă pante de 4% pentru scurgerea apelor pluviale, rezultând un unghi de înclinare  $\alpha = 2,3^0 < 5^0$ , deci conform paragrafului (1) din subcapitolul 4.2.3 se consideră acoperiș plat și este împărțit în zone de expunere ca în Figura F.2.5. Înălțimea de referință pentru calculul presiunilor pe acoperișul halei prevăzută cu atic este  $z_e = h + h_p = 11,9$  m și  $e = \min(b, 2h) = \min(60\text{m}, 22\text{m}) = 22\text{m}$ , unde  $b$  este latura perpendiculară pe direcția vântului.

Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune pe acoperișul halei (Tabel F.2.5 și Figura F.2.6) se determină prin interpolare liniară pentru valoarea raportului  $\frac{h_p}{h} = \frac{0,9\text{m}}{11\text{m}} = 0,082$  în Tabelul 4.2.

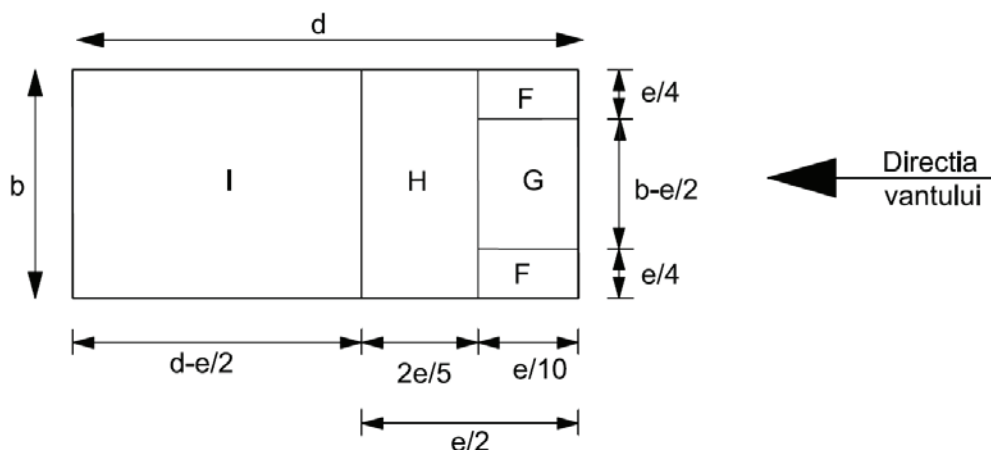


Figura F.2.5. Definirea zonelor de expunere pentru acoperișul halei

Tabel F.2.5. Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune pentru zonele de pe acoperiș

$h/h_p$	Coeficienți aerodinamici $c_{pe}$			
	F	G	H	I
0,082	-1,272	-0,836	-0,7	+0,2
				-0,2

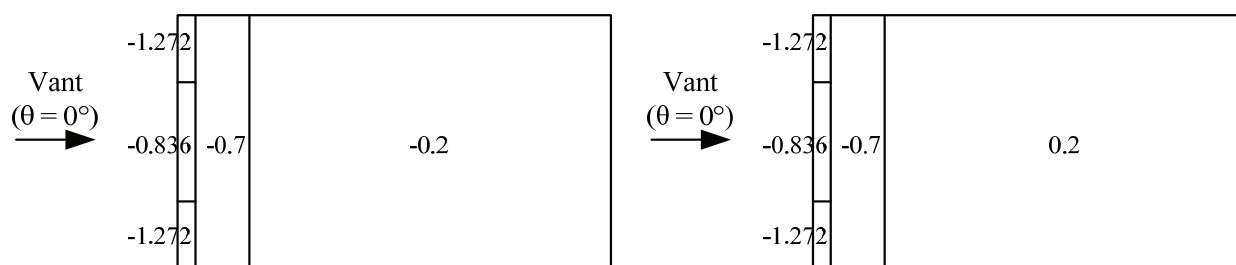


Figura F.2.6 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune pe acoperiș ( $\theta = 0^\circ$ )

Valorile presiunilor / suucțiunilor pe acoperișul halei se evaluează cu următoarea expresie și sunt prezentate în Tabelul F.2.6:

$$w_e = \gamma_{Iw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e) = 1,15 \cdot 1,781 \cdot c_{pe} = 2,049 \cdot c_{pe} [\text{kPa}]$$

Tabel F.2.6. Valorile presiunilor / suucțiunilor pe acoperișului halei

	F	G	H	I
$c_{pe}$	-1,272	-0,836	-0,7	+0,2 -0,2
$w_e$	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410 -0,410

## F.2.3.2 Cazul 2. Vântul acționează perpendicular pe latura lungă a halei

- Distribuția presiunilor / suucțiunilor pe pereții exteriori ai halei

Definirea zonelor A, B, C, D și E (Figura F.2.7) pentru pereții verticali ai halei pentru care se calculează coeficienții de presiune exterioară  $c_{pe}$  se face conform pct. 4.2.2 pentru  $e = \min(b, 2h) = \min(60 \text{ m}, 22 \text{ m}) = 22 \text{ m}$ ,  $e < F$ .

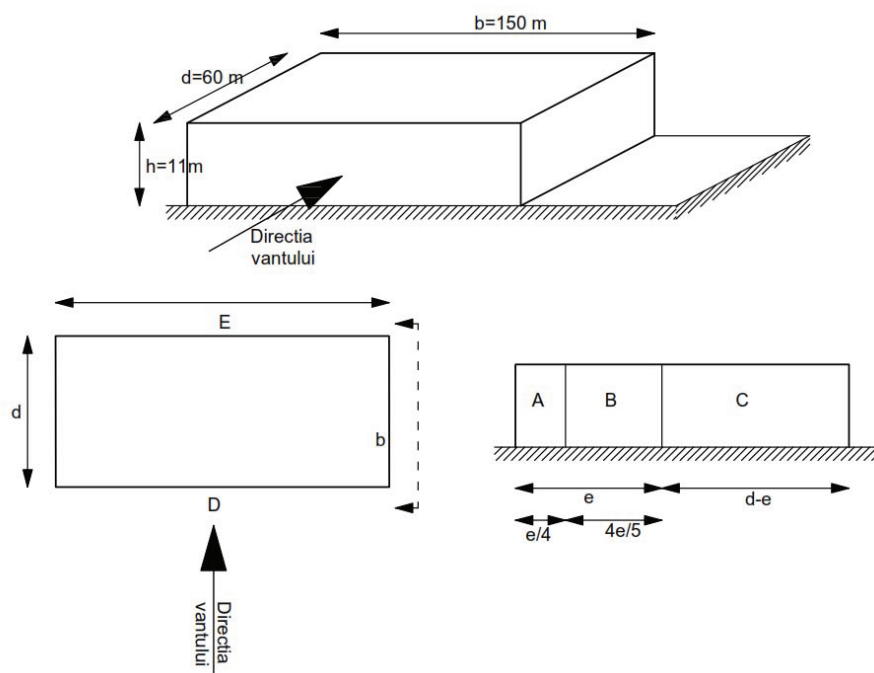


Figura F.2.7. Definirea zonelor A, B, C, D și E pentru pereții verticali ai halei pentru care se calculează coeficienții de presiune exterioară  $c_{pe}$

Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune exterioară  $c_{pe}$  (Tabel F.2.7 și Figura F.2.8) se obțin în funcție de raportul  $\frac{h}{d} = \frac{11,0}{60} = 0,183 < 0,25$  din Tabelul 4.1.

Tabel F.2.7. Valorile coeficienților  $c_{pe}$ 

Zona	A	B	C	D	E
$h/d$	$c_{pe}$				
0,183	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3

Întrucât

$$w_e = 2,049 \cdot c_{pe} \text{ [kPa]}$$

rezultă valorile presiunilor/sucțiunilor pe pereții exteriori ai halei din Tabelul F.2.8.

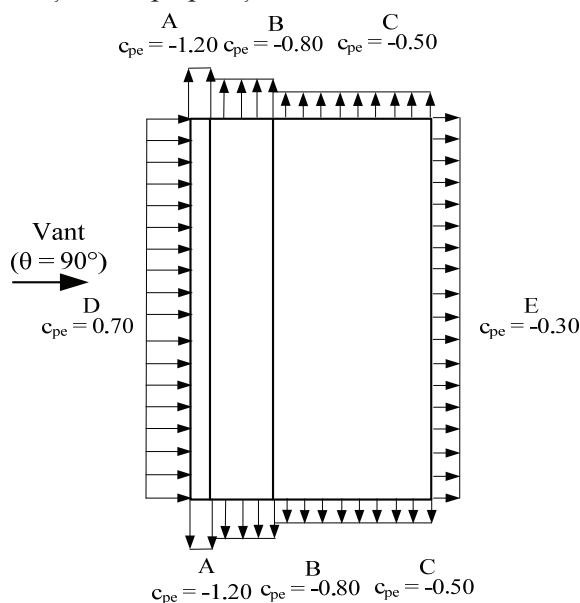


Figura F.2.8 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune / sucțiune pe suprafețele rigide  
( $\theta = 90^\circ$ )

Tabel F.2.8. Valorile presiunilor / sucțiunilor pe pereții exteriori ai halei

Zona	A	B	C	D	E
$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3
$w_e$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615

- Distribuția presiunilor pe aticul halei

Aticul halei nu prezintă goluri și conform paragrafului (1) de la subcapitolul 4.4 coeficientul de obstrucție  $\varphi = 1$ . Din Tabelul 4.9 se aleg coeficienții  $c_{p,net}$  pentru coeficientul de obstrucție egal cu 1 și pentru cazul peretelui cu colț (aticul halei este închis pe toate laturile). Valorile coeficienților aerodinamici de presiune rezultantă  $c_{p,net}$  sunt date în Tabelul F.2.9 pentru zonele din Figura F.2.9.

Tabel F.2.9. Valorile coeficienților  $c_{p,net}$

Zona	A	B	C	D
$\varphi = 1$	2,1	1,8	1,4	1,2

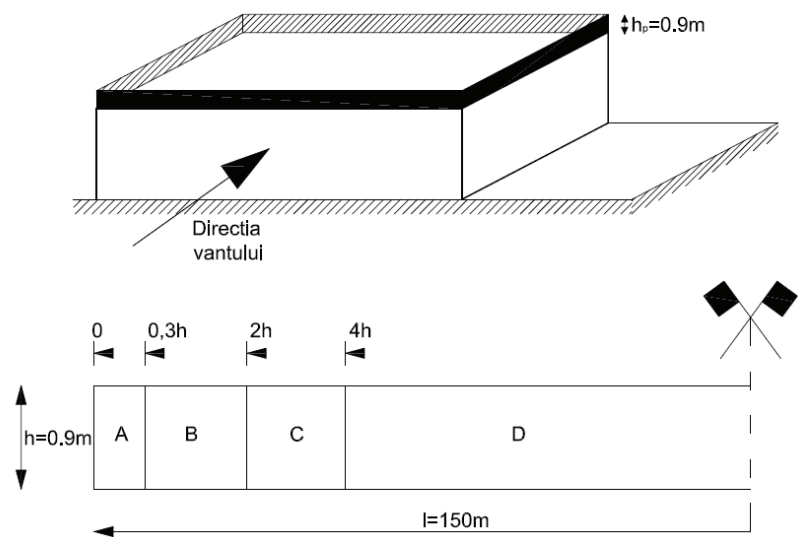


Figura F.2.9. Definirea zonelor A, B, C și D pentru aticul halei

Valorile presiunilor rezultante (totale) distribuite pe aticul halei (Tabel F.2.10) se evaluează cu următoarea expresie:

$$w_e = \gamma_{lw} \cdot c_{p,net} \cdot q_p(z_e) = 1,15 \cdot 1,781 \cdot c_{p,net} = 2,049 \cdot c_{p,net} \text{ [kPa]}$$

Tabel F.2.10. Valorile presiunilor pe aticul halei

Zona	A	B	C	D
$c_{p,net}$	2,1	1,8	1,4	1,2
$w_e$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

- Distribuția presiunilor pe acoperișul halei

Acoperișul halei prezintă pante de 4% pentru scurgerea apelor pluviale, rezultând un unghi de înclinare  $\alpha = 2.3^0 < 5^0$ , deci conform paragrafului (1) din subcapitolul 4.2.3 se consideră acoperiș plat și este împărțit în zone de expunere (Figura F.2.10). Înălțimea de referință pentru calculul presiunilor pe acoperișul halei prevăzută cu atic este  $z_e=h+h_p=11,9 \text{ m}$  și  $e=\min(b,2h)=\min(150m, 22m) = 22m$ , unde  $b$  este latura perpendiculară pe direcția vântului.

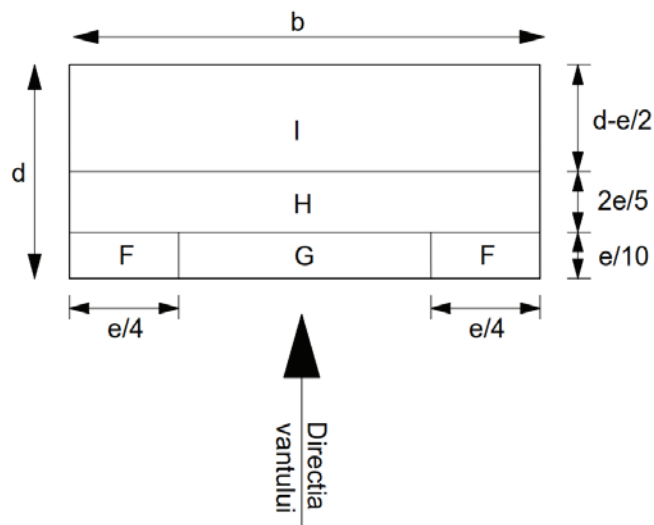


Figura F.2.10. Definirea zonelor de expunere pentru acoperișul halei

Valorile coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe acoperișul halei (Tabel F.2.11 și Figura F.2.11) se determină prin interpolare liniară pentru valoarea raportului  $\frac{h_p}{h} = \frac{0,9\text{m}}{11\text{m}} = 0,082$  folosind valorile din Tabelul 4.2.

Tabel F.2.11. Valorile coeficienților aerodinamici de presiune / sucțiune pentru zonele de expunere ale acoperișului halei

Coeficienți aerodinamici de presiune $c_{pe}$				
$h/h_p$	F	G	H	I
0,082	-1,272	-0,836	-0,7	+0,2
				-0,2

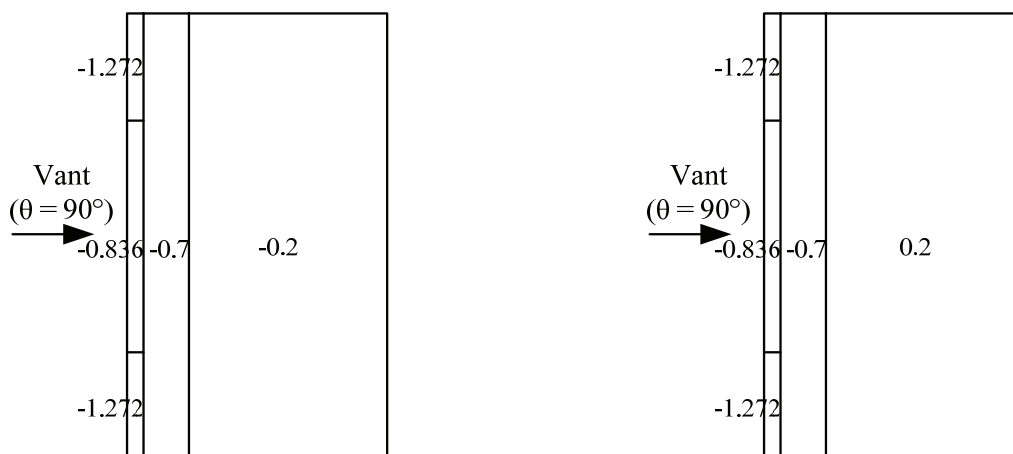


Figura F.2.11. Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune / sucțiune pe acoperiș ( $\theta = 90^\circ$ )

Valorile presiunilor / suucțiunilor pe acoperișul halei se evaluează cu următoarea expresie și sunt prezente în Tabelul F.2.12:

$$w_e = \gamma_{lw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e) = 1,15 \cdot 1,781 \cdot c_{pe} = 2,049 \cdot c_{pe} \text{ [kPa]}$$

Tabel F.2.12. Valorile presiunilor / suucțiunilor pe acoperișul halei

	F	G	H	I
$c_{pe}$	-1,272	-0,836	-0,7	+0,2
				-0,2
$w_e$	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410
				-0,410

#### F.2.4 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide interioare

Presiunile ce acționează pe suprafețele rigide interioare ale pereților exteriori și ale acoperișului halei se evaluează doar pentru cazul în care vântul acționează pe direcție perpendiculară pe latura halei pe care există ușa (latura dominantă) și aceasta este deschisă (Figura E2.12). În cazul în care se consideră că ușa este închisă nu apar presiuni pe suprafețe rigide interioare și se revine la calculele de la punctul F.2.3.

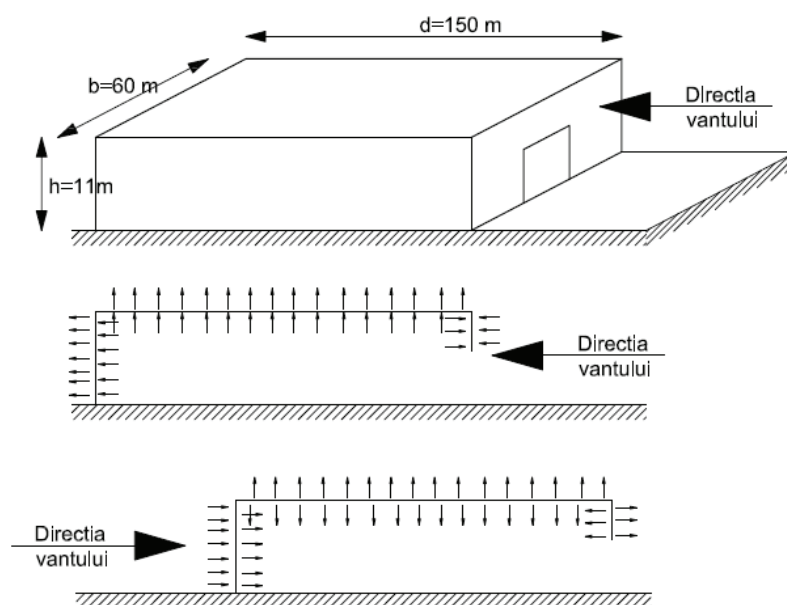


Figura F.2.12. Distribuția presiunilor / suucțiunilor pe suprafețele halei

Presiunea / suucțiunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide interioare ale clădirii / structurii se determină cu relația (3.2):

$$w_i = \gamma_{lw} \cdot c_{pi} \cdot q_p(z_i)$$



unde:

- $q_p(z_i)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_i$ ;  
 $z_i$  este înălțimea de referință pentru presiunea interioară;  
 $c_{pi}$  este coeficientul aerodinamic de presiune / sucțiune pentru suprafețe interioare;  
 $\gamma_{lw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

Hala are o latură dominantă în ceea ce privește acțiunea vântului (aria golurilor de pe aceasta este de două ori mai mare decât aria golurilor și deschiderilor de pe toate celelalte) și deci conform paragrafului (5) din subcapitolul 4.2.9:

$$c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pe}$$

$$z_i = z_e \text{ (paragraful (7) din subcapitolul 4.2.9)}$$

$$q_p(z_i) = q_p(z_e) = 1,781 \text{ kPa}$$

$$w_i = \gamma_{lw} \cdot c_{pi} \cdot q_p(z_i) = 1,15 \cdot c_{pi} \cdot 1,781 = 2,049 \cdot c_{pi}$$

#### F.2.4.1 Distribuția presiunilor interioare pe pereții halei

În Tabelul F.2.13 sunt evaluați coeficienții de presiuni interioare și valorile presiunilor interioare pe pereții halei pentru zonele A, B, C, D și E definite în Figura F.2.2. Semnul valorilor încărcării este pozitiv deoarece în toate zonele se exercită presiune.

Tabel F.2.13. Distribuția presiunilor pe pereții interiori ai halei

Zona	A	B	C	D	E
$c_{pe}$	1,2	0,8	0,5	0,7	0,3
$c_{pi}$	0,9	0,6	0,375	0,525	0,225
$w_i$ [kPa]	1,844	1,229	0,768	1,076	0,461

#### F.2.4.2 Distribuția presiunilor interioare pe acoperișul halei

Pentru evaluarea presiunilor interioare pe acoperișul halei se folosește împărțirea suprafeței acoperișului în zone (Figura F.2.13) conform subcapitolului 4.2.3. Presiunea interioară pe acoperișul halei se evaluează cu relația:

$$w_i = \gamma_{lw} \cdot c_{pi} \cdot q_p(z_i) = 1,15 \cdot c_{pi} \cdot 1,781 = 2,049 \cdot c_{pi}$$

unde  $c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pF}$ .

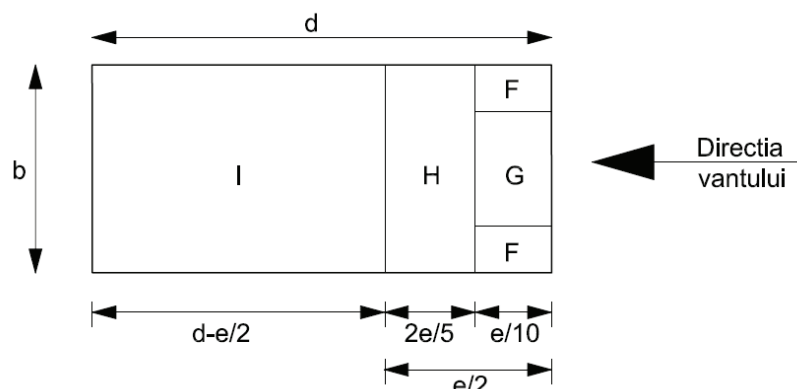


Figura F.2.13. Definirea zonelor de expunere pentru acoperișul halei (pentru presiuni interioare)

În Tabelul F.2.14 sunt calculați coeficienții aerodinamici de presiune pe suprafețe interioare pentru zonele de expunere a acoperișului halei F, G, H și I și presiunile interioare pe suprafața acoperișului. Semnul valorilor încărcării este pozitiv deoarece în toate zonele se exercită presiune.

Tabelul F.2.14. Distribuția presiunilor interioare pe acoperișul halei

	F	G	H	I
$c_{pe}$	1,272	0,836	0,7	0,2
$c_{pi}$	0,954	0,627	0,525	0,15
$w_i$ [kPa]	1,955	1,285	1,076	0,307

### F.2.5 Presiuni totale

Conform paragrafului (3) din subcapitolul 3.2, presiunea totală a vântului pe un element de construcție este diferența dintre presiunile (orientate către suprafață) și suucțiunile (orientate dinspre suprafață) pe cele două fețe ale elementului; presiunile și suucțiunile se iau cu semnul lor. Presiunile sunt considerate cu semnul (+) iar suucțiunile cu semnul (-). Pentru evaluarea presiunilor totale se vor considera următoarele cazuri:

- Cazul 1. Direcția vântului perpendiculară pe latura scurtă a halei (care cuprinde ușa), considerând ușa închisă;
- Cazul 2. Direcția vântului perpendiculară pe latura scurtă a halei (care cuprinde ușa), considerând ușa deschisă;
- Cazul 3. Direcția vântului perpendiculară pe latura scurtă a halei opusă celei cu ușa, considerând ușa deschisă;
- Cazul 4. Direcția vântului perpendiculară pe latura lungă a halei.

### F.2.5.1 Cazul 1

În acest caz, ușa fiind închisă, presiunile interioare sunt egale cu zero și se consideră doar presiunile ce acționează pe suprafețele exterioare ale halei. Zonele la care fac referire tabele de mai jos au fost definite la F.2.3 pentru evaluarea distribuției presiunilor exterioare pe suprafețele rigide ale halei.

a. Presiuni totale pe pereții halei:

Zona	A	B	C	D	E
$w$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615

b. Presiuni totale pe aticul halei:

Zona	A	B	C	D
$w$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

c. Presiuni totale pe acoperișul halei:

Zona	F	G	H	I
$w$ [kPa]	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410
				-0,410

### F.2.5.2 Cazul 2

În acest caz, ușa fiind deschisă, presiunile totale sunt calculate ca sumă vectorială a presiunilor exterioare și a celor interioare pe fiecare zonă a laturilor și acoperișului halei. Zonele la care fac referire tabele de mai jos au fost definite la evaluarea distribuției presiunilor interioare și exterioare pe suprafețele expuse ale halei. Pentru stabilirea sensului de acțiune a presiunilor interioare și exterioare se folosește Figura 3.1 din subcapitolul 3.2.

a. Presiuni totale pe pereții halei:

Zona	A	B	C	D	E
$ w_e $ [kPa]	2,459	1,639	1,025	1,434	0,615
$ w_i $ [kPa]	1,844	1,229	0,768	1,076	0,461
$w = w_e + w_i$ [kPa]	-4,303	-2,868	-1,793	+0,358	-1,076

b. Presiuni totale pe aticul hălei:

Zona	A	B	C	D
$w_e$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

c. Presiuni totale pe acoperișul hălei:

Zona	F	G	H	I
$ w_e $ [kPa]	2,606	1,713	1,434	0,410
				0,410
$ w_i $ [kPa]	1,955	1,285	1,076	0,307
$w = w_e + w_i$ [kPa]	-4,561	-2,998	-2,510	-0,717
				-0,103

### F.2.5.3 Cazul 3

În acest caz, ușa fiind deschisă, presiunile totale sunt calculate ca sumă vectorială a presiunilor exterioare și a celor interioare pe fiecare zonă a laturilor și a acoperișului hălei. Zonele la care fac referire tabele de mai jos au fost definite la evaluarea distribuției presiunilor interioare și exterioare pe suprafețele expuse ale hălei. Pentru stabilirea sensului de acționare a presiunilor interioare și exterioare se folosește Figura 3.1 din subcapitolul 3.2.

a. Presiuni totale pe pereții hălei:

Zona	A	B	C	D	E
$ w_e $ [kPa]	2,459	1,639	1,025	1,434	0,615
$ w_i $ [kPa]	1,844	1,229	0,768	1,076	0,461
$w = w_e + w_i$ [kPa]	-0,615	-0,410	-0,257	+2,510	-0,154

b. Presiuni totale pe aticul hălei:

Zona	A	B	C	D
$w_e$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

c. Presiuni totale pe acoperișul halei:

Zona	F	G	H	I
$ w_e $ [kPa]	2,606	1,713	1,434	0,410
				0,410
$ w_i $ [kPa]	1,955	1,285	1,076	0,307
$w = w_e + w_i$ [kPa]	-0,651	-0,428	-0,358	+0,717
				-0,103

#### F.2.5.4 Cazul 4

În acest caz vântul acționează pe latura lungă a halei, presiunile interioare sunt egale cu zero și se consideră doar presiunile ce acționează pe suprafețele exterioare ale halei. Zonele la care fac referire tabele de mai jos au fost definite la evaluarea distribuției presiunilor exterioare pe suprafețele expuse ale halei.

a. Presiuni totale pe pereții halei:

Zona	A	B	C	D	E
$w_e$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615

b. Presiuni totale pe aticul halei:

Zona	A	B	C	D
$w_e$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459

c. Presiuni totale pe acoperișul halei:

Zona	F	G	H	I
$w_e$ [kPa]	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410
				-0,410

### F.2.6 Forța de frecare

Forța de frecare pe suprafețele exterioare paralele cu direcția vântului se evaluează conform relației (3.7) din subcapitolul 3.3:

$$F_{fr} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

unde

- $c_{fr}$  este coeficientul de frecare;
- $A_{fr}$  este aria suprafeței exterioare orientată paralel cu direcția vântului;
- $\gamma_{lw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

Coeficienții de frecare  $c_{fr}$  pentru suprafețele pereților și acoperișurilor sunt prezentați în Tabelul 4.10 din subcapitolul 4.5:

$c_{fr} = 0,01$  pentru pereții halei (suprafață netedă)

$c_{fr} = 0,02$  pentru acoperișul halei (suprafață rugoasă - plăci bituminoase).

Aria de referință  $A_{fr}$  este cea din Figura 4.22 din subcapitolul 4.5. Forțele de frecare se vor aplica pe suprafețele exterioare paralele cu direcția vântului, localizate față de streșină sau colț la o distanță egală cu cea mai mică valoare dintre  $2 \cdot b$  sau  $4 \cdot h$ , unde  $h$  este înălțimea clădirii iar  $b$  este latura halei perpendiculară pe direcția de acțiune a vântului.

#### F.2.6.1 Cazul 1. Vântul acționează perpendicular pe latura scurtă a halei

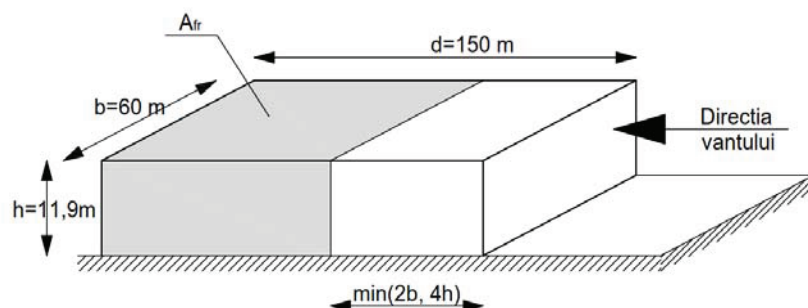


Figura F.2.14. Aria de referință pentru care se calculează forța de frecare

$$F_{fr} = F_{fr\_pereti} + F_{fr\_acoperis}$$

$$F_{fr\_pereti} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr\_pereti} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr\_pereti}$$

$$F_{fr\_acoperis} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr\_acoperis} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr\_acoperis}$$

$$c_{fr\_pereti} = 0,01$$

$$c_{fr\_acoperis} = 0,02$$

$$q_p(z_e) = 1,781 \text{ kPa}$$

$$\gamma_{lw} = 1,15$$

$$A_{fr\_pereti} = 2 \cdot h \cdot (d - \min(2b, 4h)) = 2 \cdot 11,9 \cdot (150 - 47,6) = 2437,12 \text{ m}^2$$

$$A_{fr\_acoperis} = b \cdot (d - \min(2b, 4h)) = 60 \cdot (150 - 47,6) = 6144 \text{ m}^2$$

$$F_{fr\_pereti} = 1,15 \cdot 0,01 \cdot 1,781 \cdot 2437,12 = 49,92 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperis} = 1,15 \cdot 0,02 \cdot 1,781 \cdot 6144 = 251,68 \text{ kN}$$

$$F_{fr} = 49,92 + 251,68 = 301,60 \text{ kN}$$

F.2.6.2 Cazul 2. Vântul acționează perpendicular pe latura lungă a halei

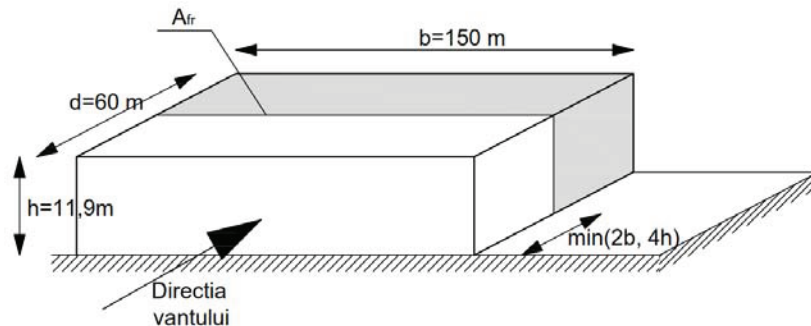


Figura F.2.15. Aria de referință pentru care se calculează forța de frecare

$$F_{fr} = F_{fr\_pereti} + F_{fr\_acoperis}$$

$$F_{fr\_pereti} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr\_pereti} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr\_pereti}$$

$$F_{fr\_acoperis} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr\_acoperis} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr\_acoperis}$$

$$c_{fr\_pereti} = 0,01$$

$$c_{fr\_acoperis} = 0,02$$

$$q_p(z_e) = 1,781 \text{ kPa}$$

$$\gamma_{lw} = 1,15$$

$$A_{fr\_pereti} = 2 \cdot h \cdot (d - \min(2b, 4h)) = 2 \cdot 11,9 \cdot (60 - 47,6) = 295,12 \text{ m}^2$$

$$A_{fr\_acoperis} = b \cdot (d - \min(2b, 4h)) = 150 \cdot (60 - 47,6) = 1860 \text{ m}^2$$

$$F_{fr\_pereti} = 1,15 \cdot 0,01 \cdot 1,781 \cdot 295,12 = 6,04 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperis} = 1,15 \cdot 0,02 \cdot 1,781 \cdot 1860 = 76,19 \text{ kN}$$

$$F_{fr} = 6,04 + 76,19 = 82,24 \text{ kN}$$

### F.2.7 Forța globală pe direcția vântului

Conform subcapitolului 3.3, paragraful (4), forța globală pe direcția vântului,  $F_w$  ce acționează pe hală sau pe un element structural poate fi determinată prin compunerea vectorială a forțelor  $F_{w,e}$ ,

$F_{w,i}$ , calculate pe baza presiunilor / suucțiunilor exterioare și interioare, cu forțele de frecare  $F_{fr}$  rezultate din frecarea aerului pe suprafețele exterioare paralele cu direcția vântului.

Pentru compunerea vectorială a forțelor se respectă conveția de semne (+) și (-) din cazul calculului presiunilor rezultante (totale), paragraful (3) din subcapitolul 3.2 și semnul rezultat al forței globale repecta aceeași convenție de semne ((+) pentru presiune și (-) pentru suucțiune).

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{suprafete} w_e(z_e) \cdot A_{ref}$$

$$F_{w,i} = \sum_{suprafete} w_i(z_i) \cdot A_{ref}$$

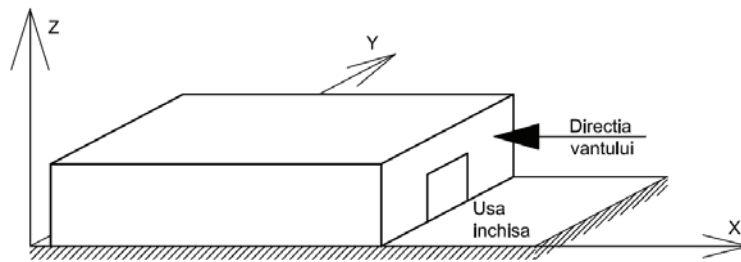
$$F_{fr} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

unde

$c_d$  este coeficientul de răspuns dinamic al construcției.

Forța globală pe direcția vântului se evaluează pentru aceleași 4 situații de acțiune a vântului ca în cazul evaluării presiunii totale.

#### F.2.7.1 Cazul 1



Deoarece dimensiunile în plan ale halei nu se încadrează în prevederile de la 3.4.21. (1) și depășesc valorile date în Tabelele 5.1 și 5.2 din cod, se aplică procedura detaliată de evaluare a coeficientului de răspuns dinamic prezentată în subcapitolul 5.2. Astfel:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

unde

$z_s$  este înălțimea de referință pentru determinarea coeficientului de răspuns dinamic; aceasta înălțime se determină conform Figura 3.2;

$k_p$  este factorul de vârf pentru răspunsul extrem maxim al structurii;

$I_v$  este intensitatea turbulenței vântului definită în subcapitolul 2.4;

$B^2$  este factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static), ce evaluează corelația presiunilor din vânt pe suprafața construcției (evaluează componenta nerezonantă a răspunsului);

$R^2$  este factorul de răspuns rezonant, ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural produse de conținutul de frecvențe al turbulenței în cvasi-



rezonanță cu frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii (evaluează componenta rezonantă a răspunsului).

$$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 11 = 6,6 \text{ m}$$

$$I_v(z_s) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_s}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln \left( \frac{6,6}{0,05} \right)} = 0,218$$

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}}$$

$$b = 60 \text{ m}$$

$$h = 11 \text{ m}$$

$L(z_s)$  este lungimea scării integrale a turbulenței (subcapitolul 5.1, paragraful (1))

$$L(z_s) = \begin{cases} L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha, & \text{pentru } z_{\min} \leq z_s \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ L(z_{\min}), & \text{pentru } z < z_{\min} \end{cases}$$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,05) = 0,52$$

$z_t = 200 \text{ m}$  – înălțimea de referință

$$L_t = 300 \text{ m}$$

$$z_{\min} = 2 \text{ m (Tabelul 2.1)}$$

$$z_{\min} < z_s = 6,6 \text{ m} < z_{\max}$$

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha = 300 \cdot \left( \frac{6,6}{200} \right)^{0,52} = 50,9$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{60+11}{50,9} \right)^{0,63}} = 0,474$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

unde:

- $\delta$  este decrementul logaritmic al amortizării dat în Anexa C, la C.5;
- $S_L$  este densitatea spectrală de putere unilaterală și normalizată, evaluată la înălțimea  $z_s$  pentru frecvența  $n_{1,x}$ ;
- $R_h, R_b$  sunt funcțiile de admitanță aerodinamică date de relațiile (5.7) și (5.8).

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x}))^{5/3}}$$

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{1,54 \cdot 50,9}{30,89} = 2,54$$

$n_{1,x}$  – este frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii pe direcția vântului turbulent

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot 2,54}{(1 + 10,2 \cdot 2,54)^{5/3}} = 0,072$$

Decrementul logaritmic al amortizării se determină cu relația din Anexa C

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

unde

$\delta_s$  este decrementul logaritmic al amortizării structurale;

$\delta_a$  este decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental; pentru clădiri rigide ( $n_1 > 1$  Hz) cu regim mic de înălțime și masă mare, valoarea decrementului logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental se poate lua aproximativ egală cu zero;

$\delta_d$  este decrementul logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale (mase acordate, amortizori cu lichid etc.), dacă este cazul.

Astfel:

$$\delta_s = 0,05 \text{ (conform Tabel C.2 pentru clădire cu structura de oțel)}$$

$$\delta_a = 0$$

$$\delta_d = 0$$

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0,05$$

Funcțiile de admitanță aerodinamică se determină cu relațiile (5.7) și (5.8). Astfel:

$$R_h(\eta_h) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_h = 0 \\ \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) & \text{pentru } \eta_h > 0 \end{cases}$$

unde

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)}$$

$$v_b = 33,47 \text{ m/s}$$

$$k_r(z_0) = 0,189 \text{ (teren categoria II)}$$

$$c_r(z_s) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) = 0,189 \cdot \ln\left(\frac{6,6}{0,05}\right) = 0,923$$

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot v_b = 0,923 \cdot 33,47 = 30,89 \text{ m/s}$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 11 \cdot 1,54}{30,89} = 2,52$$

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{2,52} - \frac{1}{2 \cdot 2,52^2} (1 - e^{-2 \cdot 2,52}) = 0,318$$

$$R_b(\eta_b) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_b = 0 \\ \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) & \text{pentru } \eta_b > 0 \end{cases}$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 60 \cdot 1,54}{30,89} = 13,76$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{13,76} - \frac{1}{2 \cdot 13,76^2} (1 - e^{-2 \cdot 13,76}) = 0,07$$

Valoarea factorului de răspuns rezonant este:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{3,14^2}{2 \cdot 0,05} \cdot 0,072 \cdot 0,318 \cdot 0,07 = 0,158$$

Valoarea factorului de vârf pentru răspunsul extrem maxim al structurii este

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3$$

unde

- $v$  este frecvența medie a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent;
- $T$  este durata de mediere a vitezei de referință a vântului,  $T = 600$  s (aceeași ca pentru viteza medie a vântului);
- $\gamma = 0,5772$ , este constanta lui Euler.

Rezultă:

$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$$

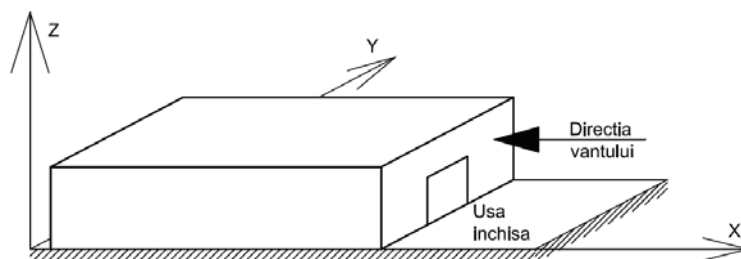
$$v = 1,54 \cdot \sqrt{\frac{0,158}{0,474 + 0,158}} = 0,77 \text{ Hz}$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,77 \cdot 600)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,77 \cdot 600)}} = 3,668$$

Valoarea coeficientului de răspuns dinamic este:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,668 \cdot 0,218 \cdot \sqrt{0,474 + 0,158}}{1 + 7 \cdot 0,218} = 0,899$$

Coeficientul de răspuns dinamic nu se aplică la valorile de presiune/sucțiune exterioară ce apar pe fețele laterale paralele cu direcția vântului, la valorile forțelor de frecare și la valorile de presiune/sucțiune interioară.



Valorile forțelor globale din vânt sunt:

- pe direcția vântului  $F_x = F_{wD} + F_{wE} + F_{fr\_acoperis} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$
- perpendicular pe direcția vântului  $F_y = F_{wA} + F_{wB} + F_{wC} - F_{wA} - F_{wB} - F_{wC} = 0$
- pe direcția verticală  $F_z = F_{wF} + F_{wG} + F_{wH} +/- F_{wI}$

Forțe pe pereții halei

Zona	A	B	C	D	E
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	52,36	209,44	1523,2	660	714
$w$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615
$c_d$	-	-	-	0,899	0,899
$F_w$ [kN]	-128,69	-343,27	-1561,28	850,85	-394,76

Forțe pe aticul halei

Zona	A	B	C	D
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	0,49	2,75	3,24	47,52
$w$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459
$c_d$	0,899	0,899	0,899	0,899
$F_w$ [kN]	1,90	9,12	8,36	105,05

## Forțe pe acoperișul halei

Zona	F	G	H	I
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	24,2	107,8	528,0	8340,0
$w$ [kPa]	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410 -0,410
$c_d$	0,899	0,899	0,899	0,899
$F_w$ [kN]	-58,70	-166,01	-680,68	+3074,04 -3074,04

$$F_{atic} = 1,90 + 9,12 + 8,36 + 105,05 = 124,42 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_pereti} = 49,92 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperiș} = 251,68 \text{ kN}$$

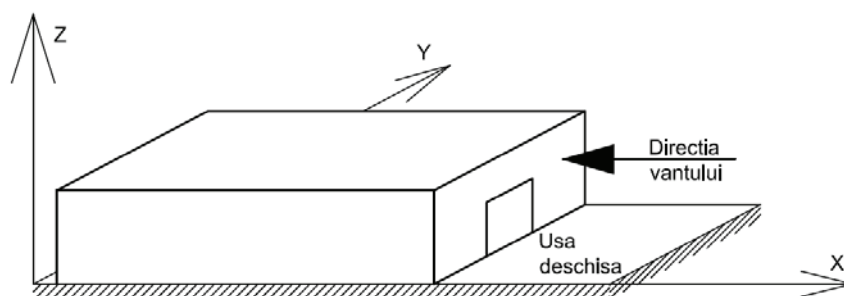
$$F_x = F_{wD} + F_{wE} + F_{fr\_acoperiș} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic} = 850,85 + 394,76 + 49,92 + 251,68 + 124,42 = 1671,63 \text{ kN}$$

$$F_y = F_A + F_B + F_C - F_A - F_B - F_C = 0 \text{ kN}$$

$$F_z = F_F + F_G + F_H \pm F_I = 58,70 + 166,01 + 680,68 \pm 3074,04 = +3979,43 / -2168,65 \text{ kN}$$

Pentru direcția verticală, în mod convențional, se consideră pozitive forțele orientate în sus (în sensul axei  $z$ ) și negative cele orientate în jos.

## F.2.7.2 Cazul 2



Coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  este același cu cel evaluat în Cazul 1:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,668 \cdot 0,218 \cdot \sqrt{0,474 + 0,158}}{1 + 7 \cdot 0,218} = 0,899$$

Coeficientul de răspuns dinamic nu se aplică la valorile de presiune / suucțiune exterioară ce apar pe fețele laterale paralele cu direcția vântului, la valorile forțelor de frecare și la valorile de presiune / suucțiune interioară.

$$F_x = F_{weD} + F_{weE} + F_{wiD} + F_{wiE} + F_{fr\_acoperiș} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$$

$$F_y = F_{weA} + F_{weB} + F_{weC} - F_{weA} - F_{weB} - F_{weC} + F_{wiA} + F_{wiB} + F_{wiC} - F_{wiA} - F_{wiB} - F_{wiC} = 0$$

$$F_z = F_{weF} + F_{weG} + F_{weH} +/- F_{weI} + F_{wiF} + F_{wiG} + F_{wiH} +/- F_{wiI}$$

Forțe pe pereții halei

Zona	A	B	C	D	E
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	52,36	209,44	1523,2	532	714
$ w_e $ [kPa]	2,459	1,639	1,025	1,434	0,615
$ w_i $ [kPa]	1,844	1,229	0,768	1,076	0,461
$F_{we}$ [kN]	128,69	343,27	1561,28	685,84	394,76
$F_{wi}$ [kN]	96,51	257,40	1169,82	572,43	329,15

Forțe pe aticul halei

Zona	A	B	C	D
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	0,49	2,75	3,24	47,52
$w$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459
$c_d$	0,899	0,899	0,899	0,899
$F_w$ [kN]	1,90	9,12	8,36	105,05

Forțe pe acoperișul halei

Zona	F	G	H	I
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	24,2	107,8	528,0	8340,0
$ w_e $ [kPa]	2,606	1,713	1,434	0,410
				0,410
$ w_i $ [kPa]	1,955	1,285	1,076	0,307
$F_{we}$ [kN]	58,70	166,01	680,68	+3074,04
				-3074,04
$F_{wi}$ [kN]	47,31	138,52	568,13	2560,38

$$F_{w\_atic} = 1,90 + 9,12 + 8,36 + 105,05 = 124,42 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_pereti} = 49,92 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperiș} = 251,68 \text{ kN}$$

$$F_x = F_{weD} + F_{weE} + F_{wiD} + F_{wiE} + F_{fr\_acoperiș} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$$

$$F_x = 685,84 + 394,76 - 572,43 + 329,15 + 251,68 + 49,92 + 124,42 = 1263,34 \text{ kN}$$

$$F_y = F_{weA} + F_{weB} + F_{weC} - F_{weA} - F_{weB} - F_{weC} + F_{wiA} + F_{wiB} + F_{wiC} - F_{wiA} - F_{wiB} - F_{wiC} = 0$$

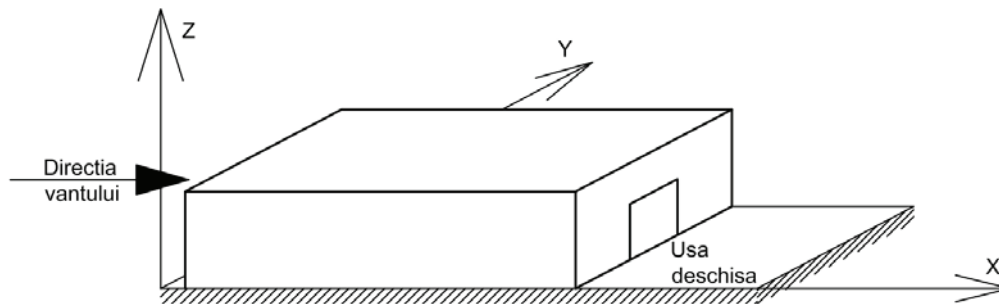
$$F_z = F_{weF} + F_{weG} + F_{weH} +/- F_{weI} + F_{wiF} + F_{wiG} + F_{wiH} +/- F_{wiI}$$

$$F_z = 58,70 + 166,01 + 680,68 +/- 3074,04 + 47,31 + 138,52 + 568,13 + 2560,38$$

$$F_z = +7193,78 / -1045,70 \text{ kN}$$

Pentru direcția verticală, în mod convențional, se consideră pozitive forțele orientate în sus (în sensul axei  $z$ ) și negative cele orientate în jos.

### F.2.7.3 Cazul 3



Coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  este același cu cel evaluat în Cazul 1:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,668 \cdot 0,218 \cdot \sqrt{0,474 + 0,158}}{1 + 7 \cdot 0,218} = 0,899$$

Coeficientul de răspuns dinamic nu se aplică la valorile de presiune/sucțiune exterioară ce apar pe fețele laterale paralele cu direcția vântului, la valorile forțelor de frecare și la valorile de presiune/sucțiune interioară.

$$F_x = F_{weD} + F_{weE} + F_{wiD} + F_{wiE} + F_{fr\_acoperiș} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$$

$$F_y = F_{weA} + F_{weB} + F_{weC} - F_{weA} - F_{weB} - F_{weC} + F_{wiA} + F_{wiB} + F_{wiC} - F_{wiA} - F_{wiB} - F_{wiC} = 0$$

$$F_z = F_{weF} + F_{weG} + F_{weH} +/- F_{weI} + F_{wiF} + F_{wiG} + F_{wiH} +/- F_{wiI}$$

## Forțe pe pereții halei

Zona	A	B	C	D	E
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	52,36	209,44	1523,2	660	586
$ w_e $ [kPa]	2,459	1,639	1,025	1,434	0,615
$ w_i $ [kPa]	1,844	1,229	0,768	1,076	0,461
$F_{we}$ [kN]	128,69	343,27	1561,28	850,85	323,99
$F_{wi}$ [kN]	96,51	257,40	1169,82	710,16	270,15

## Forțe pe aticul halei

Zona	A	B	C	D
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	0,49	2,75	3,24	47,52
$w$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459
$c_d$	0,899	0,899	0,899	0,899
$F_w$ [kN]	1,90	9,12	8,36	105,05

## Forțe pe acoperișul halei

Zona	F	G	H	I
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	24,2	107,8	528,0	8340,0
$ w_e $ [kPa]	2,606	1,713	1,434	0,410
				0,410
$ w_i $ [kPa]	1,955	1,285	1,076	0,307
$F_{we}$ [kN]	58,70	166,01	680,68	+3074,04
				-3074,04
$F_{wi}$ [kN]	47,31	138,52	568,13	2560,38

$$F_{w\_atic} = 1,90 + 9,12 + 8,36 + 105,05 = 124,42 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_pereti} = 49,92 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperiș} = 251,68 \text{ kN}$$



$$F_x = F_{weD} + F_{weE} + F_{wiD} + F_{wiE} + F_{fr\_acoperis} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$$

$$F_x = 850,85 + 323,99 + 710,16 - 270,15 + 251,68 + 49,92 + 124,42 = 240,87 \text{ kN}$$

$$F_y = F_{weA} + F_{weB} + F_{weC} - F_{weA} - F_{weB} - F_{weC} + F_{wiA} + F_{wiB} + F_{wiC} - F_{wiA} - F_{wiB} - F_{wiC} = 0$$

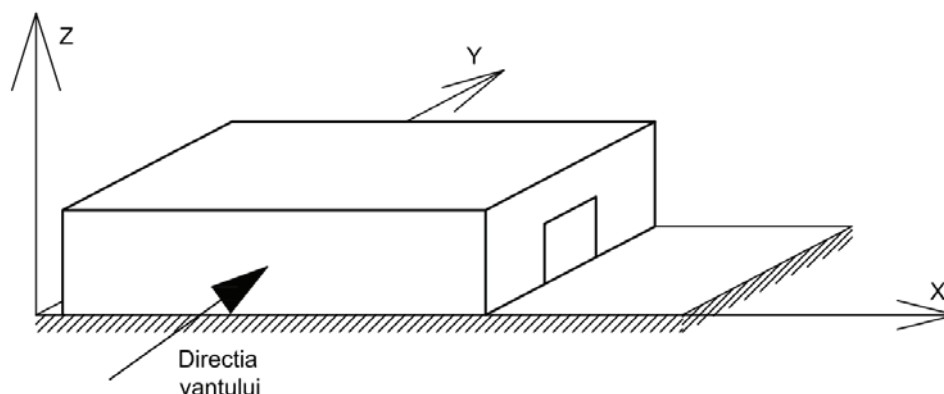
$$F_z = F_{weF} + F_{weG} + F_{weH} +/- F_{weI} + F_{wiF} + F_{wiG} + F_{wiH} +/- F_{wiI}$$

$$F_z = 58,70 + 166,01 + 680,68 +/- 3074,04 - 47,31 - 138,52 - 568,13 - 2560,38$$

$$F_z = +565,10 / -5582,98 \text{ kN}$$

Pentru direcția verticală, în mod convențional, se consideră pozitive forțele orientate în sus (în sensul axei  $z$ ) și negative cele orientate în jos.

#### F.2.7.4 Cazul 4



Deoarece dimensiunile în plan ale halei depășesc valorile date în Tabelele 5.1 și 5.2, se aplică procedura detaliată de evaluare a coeficientului de răspuns dinamic prezentată în subcapitolul 5.2. Astfel:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

$$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 11 = 6,6 \text{ m}$$

$$I_v(z_s) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_s}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln \left( \frac{6,6}{0,05} \right)} = 0,218$$

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}}$$

$$b = 150 \text{ m}$$

$$h = 11 \text{ m}$$

$$L(z_s) = \begin{cases} L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha, & \text{pentru } z_{\min} \leq z_s \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ L(z_{\min}), & \text{pentru } z < z_{\min} \end{cases}$$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,05) = 0,52$$

$$z_t = 200 \text{ m} - \text{înlăţimea de referinţă}$$

$$L_t = 300 \text{ m}$$

$$z_{\min} = 2 \text{ m (Tabelul 2.1)}$$

$$z_{\min} < z_s = 6,6 \text{ m} < z_{\max}$$

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha = 300 \cdot \left( \frac{6,6}{200} \right)^{0,52} = 50,9 \text{ m}$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{150 + 11}{50,9} \right)^{0,63}} = 0,35$$

$$k_r(z_0) = 0,189 \text{ (teren categoria II)}$$

$$v_b = 33,47 \text{ m/s}$$

$$c_r(z_s) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) = 0,189 \cdot \ln\left(\frac{6,6}{0,05}\right) = 0,923$$

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot v_b = 0,923 \cdot 33,47 = 30,89 \text{ m/s}$$

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{1,85 \cdot 50,9}{30,89} = 3,05$$

unde  $n_{1,x}$  este frecvenţa proprie fundamentală de vibraţie a structurii pe direcţia vântului turbulent (=1,85Hz).

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x}))^{5/3}}$$

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot 3,05}{(1 + 10,2 \cdot 3,05)^{5/3}} = 0,064$$

Decrementul logaritm al amortizării structurale este

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

unde

$\delta_s$  este decrementul logaritm al amortizării structurale;

$\delta_a$  este decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental; pentru clădiri rigide ( $n_1 > 1$  Hz) cu regim mic de înălțime și masă mare valoarea decrementului logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental se poate lua aproximativ egală cu zero;

$\delta_d$  este decrementul logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale (mase acordate, amortizori cu lichid etc.), dacă este cazul.

Astfel:

$$\delta_s = 0,05 \text{ (conform Tabelului C.2 pentru clădire cu structura de oțel)}$$

$$\delta_a = 0$$

$$\delta_d = 0$$

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0,05$$

Funcțiile de admitanță aerodinamică se determină cu relațiile (5.7) și (5.8). Astfel:

$$R_h(\eta_h) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_h = 0 \\ \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) & \text{pentru } \eta_h > 0 \end{cases}$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 11 \cdot 1,85}{30,89} = 3,03 > 0$$

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{3,03} - \frac{1}{2 \cdot 3,03^2} (1 - e^{-2 \cdot 3,03}) = 0,276$$

$$R_b(\eta_b) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_b = 0 \\ \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) & \text{pentru } \eta_b > 0 \end{cases}$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 150 \cdot 1,85}{30,89} = 41,32 > 0$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{41,32} - \frac{1}{2 \cdot 41,32^2} (1 - e^{-2 \cdot 41,32}) = 0,024$$

Valoarea factorului de răspuns rezonant este:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{3,14^2}{2 \cdot 0,05} \cdot 0,064 \cdot 0,276 \cdot 0,024 = 0,042$$

Valoarea factorului de vârf pentru răspunsul extrem maxim al structurii este

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3$$

unde

$v$  este frecvența medie a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent;

$T$  este durata de mediere a vitezei de referință a vântului,  $T = 600$  s (aceeași ca pentru viteza medie a vântului);

$\gamma = 0,5772$ , este constanta lui Euler.

Rezultă:

$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$$

$$v = 1,85 \cdot \sqrt{\frac{0,042}{0,35 + 0,042}} = 0,61 \text{ Hz}$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,61 \cdot 600)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,61 \cdot 600)}} = 3,604$$

Valoarea coeficientul de răspuns dinamic este:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,604 \cdot 0,218 \cdot \sqrt{0,35 + 0,042}}{1 + 7 \cdot 0,218} = 0,785$$

Coeficientul de răspuns dinamic nu se aplică la valorile de presiune / suucțiune exterioară ce apar pe fețele laterale paralele cu direcția vântului, la valorile forțelor de frecare și la valorile de presiune / suucțiune interioară.

Valorile forțelor globale din vânt sunt:

- pe direcția vântului  $F_x = F_{wD} + F_{wE} + F_{fr\_acoperis} + F_{fr\_pereti} + F_{w\_atic}$
- perpendicular pe direcția vântului  $F_y = F_{wA} + F_{wB} + F_{wC} - F_{wA} - F_{wB} - F_{wC} = 0$
- pe direcția verticală  $F_z = F_{wF} + F_{wG} + F_{wH} +/- F_{wI}$

Forțe pe pereții halei

Zona	A	B	C	D	E
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	262,68	209,44	452,2	1650,0	1785,0
$w$ [kPa]	-2,459	-1,639	-1,025	+1,434	-0,615
$c_d$	-	-	-	0,785	0,785
$F_w$ [kN]	-645,93	-343,27	-463,51	1857,39	-861,75

## Forțe pe aticul hălei

Zona	A	B	C	D
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	0,49	2,75	3,24	128,52
$w$ [kPa]	4,303	3,688	2,869	2,459
$c_d$	0,785	0,785	0,785	0,785
$F_w$ [kN]	1,64	7,97	7,30	248,08

## Forțe pe acoperișul hălei

Zona	F	G	H	I
$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	242,0	305,8	1320,0	7350,0
$w$ [kPa]	-2,606	-1,713	-1,434	+0,410 -0,410
$c_d$	0,785	0,785	0,785	0,785
$F_w$ [kN]	-495,06	-411,21	-1485,91	+2365,60 -2365,60

$$F_{atic} = 1,64 + 7,97 + 7,30 + 248,08 = 265,00 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_pereti} = 6,04 \text{ kN}$$

$$F_{fr\_acoperiș} = 76,19 \text{ kN}$$

$$F_x = F_{weD} + F_{weE} + F_{fr\_acoperiș} + F_{fr\_pereti} + F_{watic} = 1857,39 + 861,75 + 76,19 + 6,04 + 265,00 = 3066,37 \text{ kN}$$

$$F_y = F_{weA} + F_{weB} + F_{weC} - F_{weA} - F_{weB} - F_{weC} = 0$$

$$F_z = F_{wF} + F_{wG} + F_{wH} +/- F_{wI} = 495,06 + 411,21 + 1485,91 +/- 2365,60 = +4757,78 / -26,58 \text{ kN}$$

Pentru direcția verticală, în mod convențional, se consideră pozitive forțele orientate în sus (în sensul axei z) și negative cele orientate în jos.

### F.3 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O CLĂDIRE DE LOCUIT CU REGIM MIC DE ÎNĂLȚIME

#### F.3.1 Informații generale

În acest exemplu de calcul se evaluează acțiunea vântului pe o clădire de locuit cu regim mic de înălțime. Se consideră o clădire cu structura de beton armat cu dimensiunile în plan  $b \times d = 14 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  și cu regim de înălțime P+2E (înălțimea de etaj = 3m). Acoperișul este în două ape cu o înălțime la coamă de 2 m. Clădirea este amplasată în Constanța în teren de categorie II.

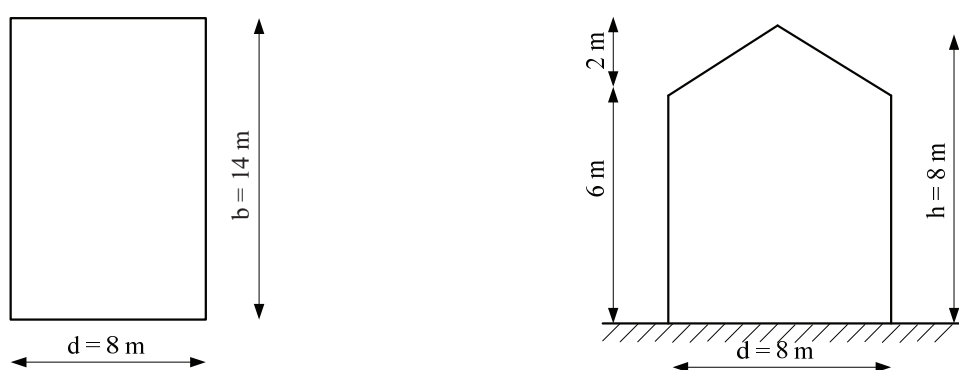


Figura F.3.1 Plan și elevație pentru structura analizată

#### F.3.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

Pentru municipiul Constanța, presiunea de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri cu o probabilitate de depășire într-un an de 0,02 (interval mediu de recurență de 50 de ani) este conform hărții de zonare din Figura 2.1,  $q_b = 0,5 \text{ kPa}$ , iar viteza de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri se determină cu relația (2.1):

$$q_b [\text{Pa}] = 0,625 \cdot v_b^2 [\text{m/s}]$$

$$v_b = \sqrt{\frac{q_b}{0,625}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 1000}{0,625}} = 28,3 \text{ m/s}$$

Categoria de teren în amplasamentul construcției este II – câmp deschis, cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,05 \text{ m}$  conform Tabel 2.1.

Valoarea medie a vitezei vântului,  $v_m(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.3):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot v_b$$

Factorul de rugozitate pentru viteza vântului,  $c_r(z)$  se determină cu relația (2.4):

$$c_r(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Factorul de teren  $k_r$  se calculează cu relația (2.5):

$$k_r(z_0) = 0,189 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$$

sau se pot lua valorile prezentate în Tabelul 2.2.

Astfel:

$$c_r(8) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,189 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,05}\right) = 0,189 \cdot 5,075 = 0,96$$

$$v_m(8) = c_r(8) \cdot v_b = 0,96 \cdot 28,3 = 27,2 \text{ m/s}$$

Presiunea medie a vântului la înălțimea  $z$  deasupra terenului, pe suprafețele rigide exterioare sau interioare ale structurii se determină cu relația (2.7):

$$q_m(z) = c_r^2(z) \cdot q_b$$

unde  $q_b = 0,5 \text{ kPa}$  este presiunea de referință a vântului pentru Constanța din harta de zonare din Figura 2.1, iar  $c_r^2(z)$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului.

Factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului,  $c_r^2(z)$  se determină cu relația (2.9):

$$c_r^2(z) = k_r^2(z_0) \cdot \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^2$$

unde:

$z_0$  – lungimea de rugozitate, în metri; pentru construcția amplasată în câmp deschis, conform Tabelului 2.1,  $z_0 = 0,05 \text{ m}$ ;

$z$  – înălțimea la care se evaluează viteza și presiunea dinamică a vântului (înălțimea clădirii  $z = 8 \text{ m}$ ).

Se obțin valorile:

$$c_r^2(8) = k_r^2(z_0) \cdot \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^2 = 0,036 \cdot \left[\ln\left(\frac{8}{0,05}\right)\right]^2 = 0,036 \cdot 25,76 = 0,93$$

$$q_m(8) = c_r^2(8) \cdot q_b = 0,93 \cdot 0,5 = 0,46 \text{ kPa}$$

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.13)

$$v_p(z) = c_{pv}(z) \cdot v_m(z)$$

unde  $c_{pv}(z)$  este factorul de rafală pentru viteza medie a vântului.

Factorul de rafală pentru viteza medie a vântului,  $c_{pv}(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se definește conform relației (2.14)

$$c_{pv}(z) = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z)$$

unde  $g$  este factorul de vârf a cărui valoare recomandată este  $g = 3,5$ .

Intensitatea turbulenței la înălțimea  $z$  se determină cu relația (2.11)

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

în care valorile factorului de proporționalitate  $\beta$  pot fi considerate conform relației (2.12):

$$4,5 \leq \beta = 4,5 - 0,856 \ln(z_0) \leq 7,5$$

În Tabelul 2.3 sunt date valorile  $\sqrt{\beta}$  pentru a fi utilizate în relația pentru calculul intensitatea turbulenței vântului,  $I_v$ .

Aplicând relațiile de calcul se obțin valorile:

$$I_v(8) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,05}\right)} = \frac{2,66}{12,69} = 0,209$$

$$c_{pv}(8) = 1 + g \cdot I_v(8) = 1 + 3,5 \cdot I_v(8) = 1 + 3,5 \cdot 0,209 = 1,732$$

$$v_p(8) = c_{pv}(8) \cdot v_m(8) = 1,732 \cdot 27,2 = 47,1 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului,  $q_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se obține cu relația (2.15):

$$q_p(z) = c_{pq}(z) \cdot q_m(z)$$

Factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului,  $c_{pq}(z)$  la înălțimea  $z$  deasupra terenului se definește cu relația (2.16):

$$c_{pq}(z) = 1 + 2g \cdot I_v(z) = 1 + 7 \cdot I_v(z)$$

Aplicând relațiile de calcul de mai sus se obține:

$$c_{pq}(8) = 1 + 2g \cdot I_v(8) = 1 + 7 \cdot I_v(8) = 1 + 7 \cdot 0,209 = 2,463$$



$$q_p(8) = c_{pq}(8) \cdot q_m(8) = 2,463 \cdot 0,46 = 1,13 \text{ kPa}$$

### F.3.3 Distribuția presiunilor / suucțiunilor pe suprafețele rigide exterioare

Presiunea / suucțiunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide exterioare ale clădirii/structurii se determină cu relația (3.1)

$$w_e = \gamma_{Iw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

unde:

$q_p(z_e)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_e$ ;

$z_e$  este înălțimea de referință pentru presiunea exterioară (Figura F.3.2);

$c_{pe}$  este coeficientul aerodinamic de presiune/suucțiune pentru suprafețe exterioare;

$\gamma_{Iw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

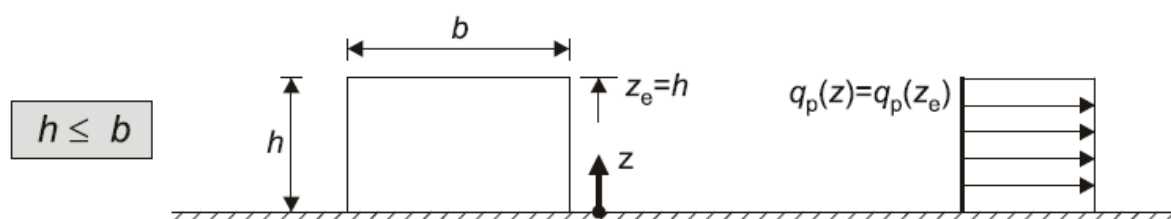


Figura F.3.2 Înălțimi de referință  $z_e$  și profilul corespondent al presiunii vântului în funcție de  $h$  și  $b$

Atunci când vântul acționează perpendicular pe latura lungă ( $\theta = 0^\circ$ , vânt perpendicular pe coamă),  $b = 14 \text{ m}$ ,  $d = 8 \text{ m}$  și  $h = 8 \text{ m}$ , deci  $h \leq b$  și  $z_e = h$ ; raportul  $h/d = 8/8 = 1$ .

Atunci când vântul acționează perpendicular pe latura scurtă ( $\theta = 90^\circ$ , vânt paralel cu coama),  $b = 8 \text{ m}$ ,  $d = 14 \text{ m}$  și  $h = 8 \text{ m}$ , deci  $h \leq b$  și  $z_e = h$ ; raportul  $h/d = 8/14 = 0,57$ .

Valorile coeficienților aerodinamici de presiune/suucțiune exterioară pentru pereții verticali ai clădirilor cu formă dreptunghiulară în plan se determină prin interpolare din Tabelul 4.1 în funcție de valoarea raportului  $h/d$  pentru zonele A...E definite în Figura F.3.3. Astfel se obțin valorile din Tabelul F.3.1.

Tabel F.3.1. Valorile coeficientului de presiune pe suprafețe exterioare

Zona	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
1 ( $\theta=0^\circ$ )	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
0,57 ( $\theta=90^\circ$ )	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,74	+1,0	-0,39	

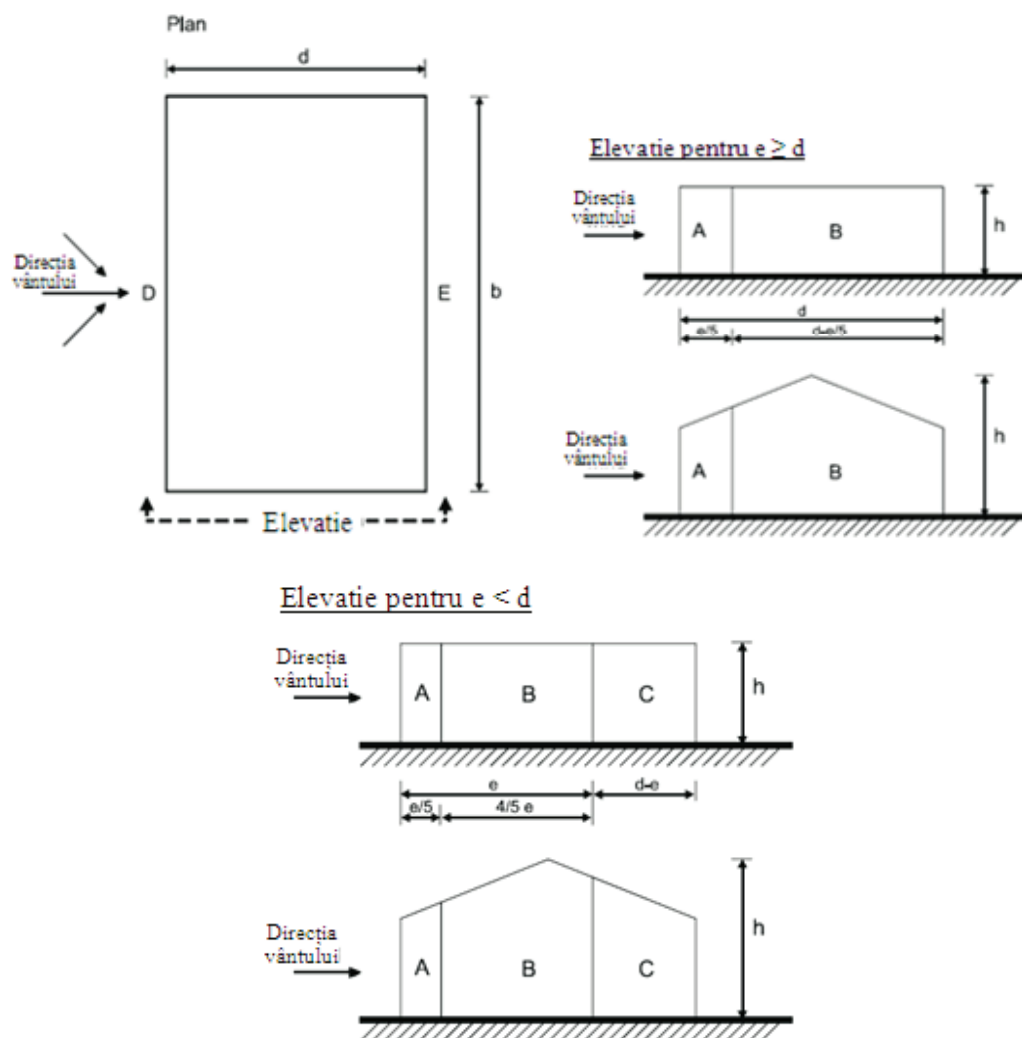
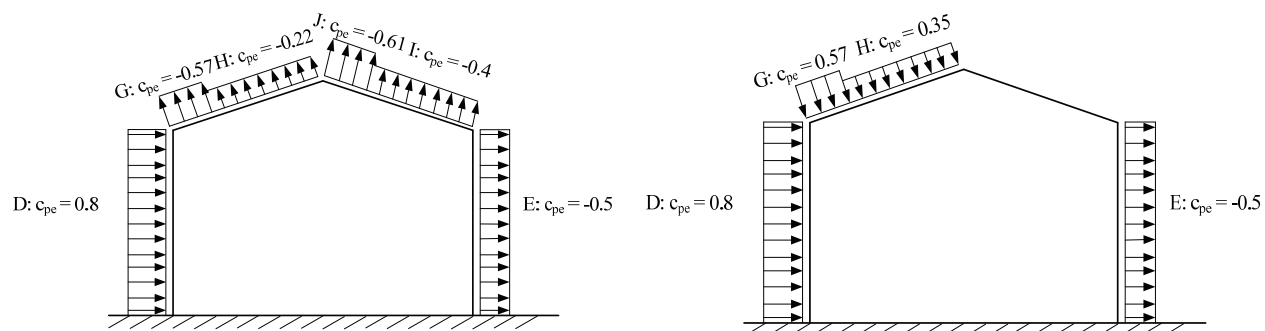


Figura F.3.3 Notății pentru pereții verticali

Figura F.3.4 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe suprafețele rigide exterioare ( $\theta = 0^\circ$ )

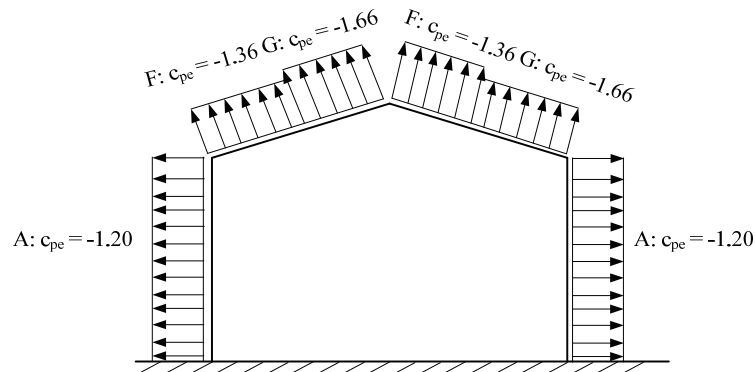


Figura F.3.5 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe suprafețele rigide exterioare ( $\theta = 90^\circ$ )

#### F.3.4 Forța globală pe direcția vântului

Forța globală pe direcția vântului,  $F_w$  ce acționează pe clădire poate fi determinată prin compunerea vectorială a forțelor  $F_{w,e}$  calculate pe baza presiunilor / suucțiunilor exterioare calculate cu relația (3.5) cu forțele de frecare,  $F_{fr}$  rezultate din frecarea aerului paralel cu suprafețele exterioare, calculate cu relația (3.7):

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{sup rafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref}$$

$$F_{fr} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

În relațiile de mai sus:

$c_d$  este coeficientul de răspuns dinamic al construcției;

$w_e(z_e)$  este presiunea vântului ce acționează pe o suprafață exterioară individuală la înălțimea  $z_e$ ;

$A_{ref}$  este aria de referință a suprafeței individuale;

$c_{fr}$  este coeficientul de frecare;  $c_{fr} = 0.01$  pentru o suprafață netedă;

$A_{fr}$  este aria suprafeței exterioare orientată paralel cu direcția vântului;

$\gamma_{lw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului din Tabelul 3.1.  
 $\gamma_{lw} = 1$  pentru o construcție din clasa III.

Forțele de frecare se vor aplica pe suprafețele exterioare paralele cu direcția vântului, localizate față de streșină sau colț la o distanță egală cu cea mai mică valoare dintre  $2 \cdot b$  sau  $4 \cdot h$ .

Deoarece clădirea analizată are o înălțime de cel mult 30m și dimensiunile în plan de cel mult 50m coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  poate fi determinat conform prevederilor din subcapitolul

5.3. Conform tabelului 5.1 pentru structuri de beton armat cu  $b=14$  m,  $h=8$  m și pentru un teren de categoria II – câmp deschis, cu lungimea de rugozitate  $z_0=0,05$  m,  $c_d=0,90$ .

F.3.4.1 *Cazul I* (direcția vântului  $\theta = 0^\circ$  - vânt perpendicular pe coamă – acțiune pe pereți)

Conform Figurilor F.3.3 și F.3.4:

$$e = \min(b; 2h) = 14 \text{ m}$$

$$e \geq d = 8 \text{ m}$$

Forța orizontală totală din vânt provine din integrarea presiunilor pe pereții perpendiculari pe direcția vântului și din forța de frecare pe pereții paraleli cu direcția vântului.

Forța orizontală din vânt ce provine din integrarea presiunilor pe pereții perpendiculari pe direcția vântului:

Zona D

$$\sum w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,8 \cdot 1,13 \cdot 14 \cdot 6) = 75,94 \text{ kN}$$

Zona E

$$\sum w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,5 \cdot 1,13 \cdot 14 \cdot 6) = -47,46 \text{ kN}$$

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = 0,90 \cdot (75,94 + 47,46) = 111,06 \text{ kN}$$

Forța de frecare pe pereții paraleli cu direcția vântului este:

$$F_{fr} = \gamma_{Iw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} = 1 \cdot 0,01 \cdot (2 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,13) = 1,09 \text{ kN}$$

Forța orizontală totală din vânt are valoarea:

$$F_w = F_{w,e} + F_{fr} = 111,06 + 1,09 = 112,15 \text{ kN}$$

Forța orizontală din vânt ce provine din integrarea sucțiunilor pe pereții paraleli cu direcția vântului (pe un singur perete, deoarece pe ambii pereți rezultanta pe clădire este egală cu zero):

Zona A

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-1,20 \cdot 1,13 \cdot 6,7 \cdot 2,8) \cdot 1 = -25,44 \text{ kN}$$

Zona B

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,80 \cdot 1,13 \cdot (7 \cdot 4 + 1,2 \cdot 7,7)) \cdot 1 = -33,66 \text{ kN}$$

Cazul Ia (direcția vântului  $\theta = 0^\circ$  - vânt perpendicular pe coamă – acțiune pe acoperiș)

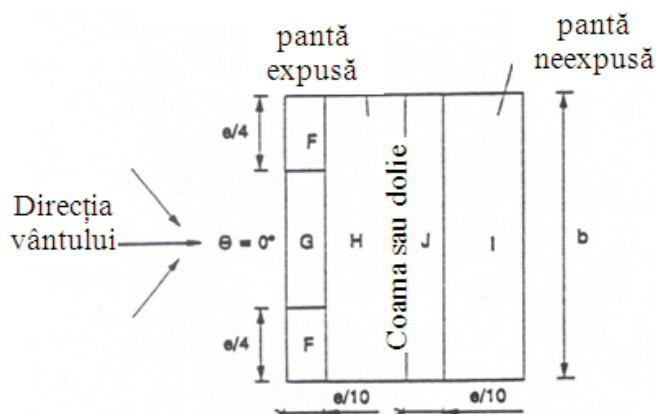


Figura F.3.6 Suprafețele de acoperiș aferente coeficienților aerodinamici

Tabel F.3.2. Valorile coeficientului de presiune/sucțiune pe suprafețe exterioare

Unghi de pantă $\alpha$	Zone pentru direcția vântului $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
26.58°	-0,59	-1,61	-0,57	-1,5	-0,22		-0,4		-0,61	-0,73
	+0,59		+0,59		+0,35		0		0	

$$c_{pe} = c_{pe,10} \quad \text{pentru } A \geq 10\text{m}^2$$

Tabel F.3.3 Forțe din vânt pe acoperiș

Zona	$\gamma_{Iw}$	$c_{pe}$	$q_p(z_e)$ , kN/m <sup>2</sup>	$A_{ref}$ , m <sup>2</sup>	$w_e \cdot A_{ref}$ , kN
F	1	-0,59	1,13	10,99	-7,33
G		-0,57		10,99	-7,08
H		-0,22		40,6	-10,09
I		-0,4		40,6	-18,35
J		-0,61		21,98	-15,15
			Total	125,16	-58,00

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{suprafete} w_e(z_e) \cdot A_{ref} \cdot \cos(26,58^\circ) = 0,90 \cdot (-58,00) \cdot 0,894 = -46,7\text{kN}$$

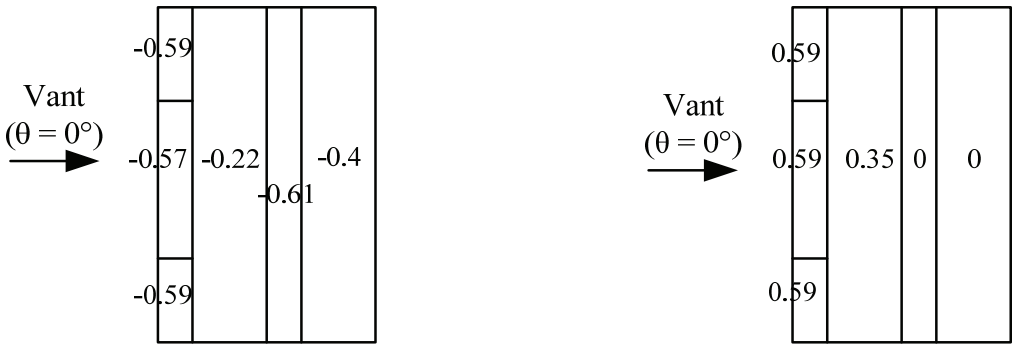


Figura F.3.7 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe acoperiș  
( $\theta = 0^\circ$ )

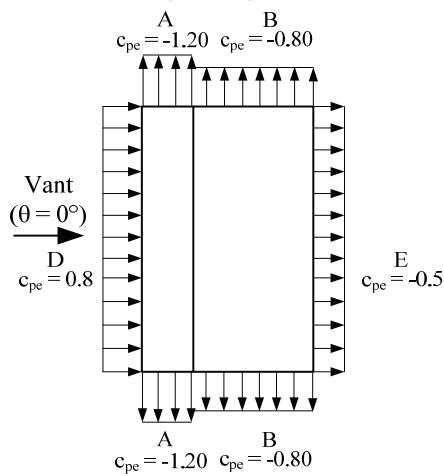


Figura F.3.8 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe suprafețele rigide  
( $\theta = 0^\circ$ )

Cazul Ib (direcția vântului  $\theta = 0^\circ$  - vânt perpendicular pe coamă – acțiune pe acoperiș)

Tabel F.3.4 Forțe din vânt pe acoperiș

Zona	$\gamma_{Iw}$	$c_{pe}$	$q_p(z_e)$ , kN/m <sup>2</sup>	$A_{ref}$ , m <sup>2</sup>	$w_e \cdot A_{ref}$ , kN
F	1	+0,59	1,13	10,99	7,33
G		+0,57		10,99	7,08
H		+0,35		40,6	16,06
I		0		40,6	0,00
J		0		21,98	0,00
			Total	125,16	30,46

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} \cdot \cos(26,58^\circ) = 0,90 \cdot (-30,46) \cdot 0,894 = -24,5 \text{ kN}$$

#### F.3.4.2 Cazul II (direcția vântului $\theta = 90^\circ$ )

Conform Figurilor F.3.3 și F.3.9:

$$e = \min(b; 2h) = 8 \text{ m}$$

$$e < d = 14 \text{ m}$$

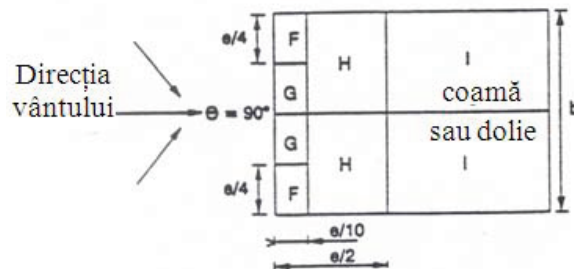


Figura F.3.9 Suprafețele de acoperiș aferente coeficienților aerodinamici [CR 1-1-4/2012]

Deoarece clădirea analizată are o înălțime de cel mult 30m și dimensiunile în plan de cel mult 50m, coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  poate fi determinat conform prevederilor din subcapitolul 5.3. Conform tabelului 5.1 pentru structuri de beton armat cu  $b = 8 \text{ m}$ ,  $h = 8 \text{ m}$  și pentru un teren de categoria II – câmp deschis, cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0.05 \text{ m}$ ,  $c_d = 0,93$ .

Forța orizontală totală din vânt provine din integrarea presiunilor pe pereții perpendiculari pe direcția vântului și din forța de frecare pe pereții paraleli cu direcția vântului.

Forța orizontală din vânt ce provine din integrarea presiunilor pe pereții perpendiculari pe direcția vântului:

Zona D

$$\sum w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,74 \cdot 1,13 \cdot 8 \cdot 6) = 40,14 \text{ kN}$$

Zona E

$$\sum w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,39 \cdot 1,13 \cdot 8 \cdot 6) = -21,15 \text{ kN}$$

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = 0,90 \cdot (40,14 + 21,15) = 55,16 \text{ kN}$$

Forța de frecare pe pereții paraleli cu direcția vântului este:

$$F_{fr} = \gamma_{Iw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} = 1 \cdot 0,01 \cdot (2 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,13) = 1,09 \text{ kN}$$

Forța orizontală totală din vânt are valoarea:

$$F_w = F_{w,e} + F_{fr} = 55,16 + 1,09 = 56,25 \text{ kN}$$

Forța orizontală din vânt ce provine din integrarea suucțiunilor pe pereții paraleli cu direcția vântului (pe un singur perete, deoarece pe ambii pereți rezultanta pe clădire este egală cu zero):

Zona A

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-1,20 \cdot 1,13 \cdot 1,6 \cdot 6) \cdot 1 = -13,02 \text{ kN}$$

Zona B

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,80 \cdot 1,13 \cdot 6,4 \cdot 6) \cdot 1 = -34,71 \text{ kN}$$

Zona C

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,50 \cdot 1,13 \cdot 6 \cdot 6) \cdot 1 = -20,34 \text{ kN}$$

Forțele din vânt pe acoperiș (Tabel F.3.6) se determină cu valorile coeficienților de presiune/sucțiune din Tabelul F.3.5. Valorile au fost obținute prin interpolare din Tabelul 4.4b.

Tabel F.3.5. Valorile coeficientului de presiune/sucțiune pe suprafețe exterioare

Unghi de pantă $\alpha$	Zone pentru direcția vântului $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
26,58°	-1,15	-1,61	-1,38	-2,0	-0,75	-1,2	-0,5	

$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \log_{10} A \quad 1\text{m}^2 < A < 10\text{m}^2$$

$$c_{pe} = c_{pe,10} \quad A \geq 10\text{m}^2$$

Tabel F.3.6 Forțe din vânt pe acoperiș

Zona	$\gamma_{Iw}$	$c_{pe}$	$q_p(z_e)$ , kN/m <sup>2</sup>	$A_{ref}$ , m <sup>2</sup>	$w_e \cdot A_{ref}$ , kN
F	1	-1,36	1,13	3,57	-5,49
G		-1,66		3,57	-6,70
H		-0,75		28,61	-24,25
I		-0,5		89,4	-50,51
			Total	125,16	-86,94

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} \cdot \cos(26,58^\circ) = 0,93 \cdot (-86,94) \cdot 0,894 = -72,28 \text{ kN}$$



Vant ( $\theta = 90^\circ$ ) →	-1.36	-0.75	-0.5
	-1.66		
	-1.66	-0.75	-0.5
	-1.36		

Figura F.3.10 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe acoperiș  
( $\theta = 90^\circ$ )

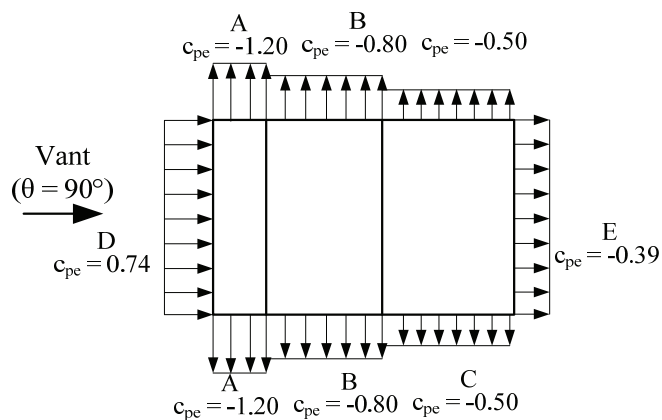


Figura F.3.11 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe suprafețele rigide  
( $\theta = 90^\circ$ )

#### F.4 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PE O CLĂDIRE MULTIETAJATĂ DE BIROURI

##### F.4.1 Informatii generale

În acest exemplu de calcul se evaluează acțiunea vântului pe o clădire multietajată de birouri cu structura de beton armat. Se consideră o clădire cu dimensiunile în plan  $b \times d = 25 \text{ m} \times 15 \text{ m}$  și cu regim de înălțime P + 7E (înălțimea de etaj = 3m). Clădirea este amplasată în Târgoviște în teren de categoria IV – zone urbane, cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 1,0 \text{ m}$ .

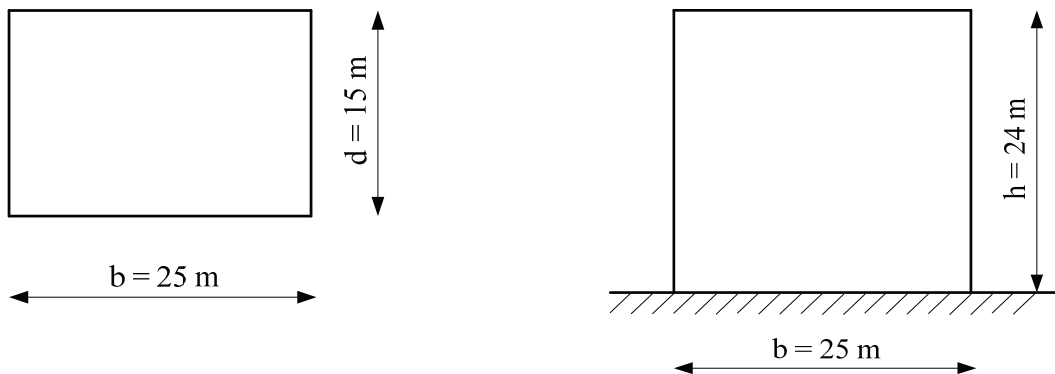


Figura F.4.1 Plan și elevație pentru structura analizată

##### F.4.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

Pentru municipiul Târgoviște, presiunea de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri cu o probabilitate de depășire într-un an de 0,02 (interval mediu de recurență de 50 de ani) este conform hărții de zonare din Figura 2.1,  $q_b = 0,4 \text{ kPa}$ , iar viteza de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri se determină cu relația (2.1):

$$q_b [\text{Pa}] = 0,625 \cdot v_b^2 [\text{m/s}]$$

$$v_b = \sqrt{\frac{q_b}{0,625}} = \sqrt{\frac{0,4 \cdot 1000}{0,625}} = 25,3 \text{ m/s}$$

Categoria de teren în amplasamentul construcției este IV – zone urbane, cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 1.0 \text{ m}$ .

Viteza medie a vântului,  $v_m(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.3):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot v_b$$

Factorul de rugozitate pentru viteza vântului,  $c_r(z)$  se determină cu relația (2.4):

$$c_r(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Factorul de teren  $k_r$  se calculează cu relația (2.5)

$$k_r(z_0) = 0,189 \cdot \left( \frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07}$$

sau se pot lua valorile din Tabelul 2.2.

Aplicând relațiile de calcul pentru înălțimea clădirii  $z = 24$  m rezultă:

$$c_r(24) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,233 \cdot \ln\left(\frac{24}{1}\right) = 0,233 \cdot 3,18 = 0,74$$

$$v_m(24) = c_r(24) \cdot v_b = 0,74 \cdot 25,3 = 18,74 \text{ m/s}$$

Presiunea medie a vântului la înălțimea  $z$  deasupra terenului, pe suprafețele rigide exterioare sau interioare ale structurii se calculează cu relația (2.7):

$$q_m(z) = c_r^2(z) \cdot q_b$$

unde  $q_b = 0,4$  kPa este presiunea de referință a vântului pentru Târgoviște din harta de zonare din Figura 2.1, iar  $c_r^2(z)$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului.

Factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului,  $c_r^2(z)$  se obține cu relația (2.9):

$$c_r^2(z) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2$$

Valorile  $k_r^2(z_0)$  sunt prezentate în Tabelul 2.2. Se obține:

$$c_r^2(24) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 = 0,054 \cdot \left[ \ln\left(\frac{24}{1}\right) \right]^2 = 0,054 \cdot 10,10 = 0,55$$

$$q_m(24) = c_r^2(24) \cdot q_b = 0,55 \cdot 0,4 = 0,22 \text{ kPa}$$

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.13):

$$v_p(z) = c_{pv}(z) \cdot v_m(z)$$

unde  $c_{pv}(z)$  este factorul de rafală pentru viteza medie a vântului.

Factorul de rafală pentru viteza medie a vântului,  $c_{pv}(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.14):

$$c_{pv}(z) = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z)$$

unde  $g$  este factorul de vârf a cărui valoare recomandată este  $g = 3,5$ .

Intensitatea turbulenței la înălțimea  $z$  se determină cu relația (2.11):

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Valorile factorului de proporționalitate  $\beta$  pot fi considerate conform relației (2.12):

$$4,5 \leq \beta = 4,5 - 0,856 \ln(z_0) \leq 7,5$$

În Tabelul 2.3 sunt date valorile  $\sqrt{\beta}$  pentru a fi utilizate în relația pentru calculul intensității turbulenței vântului,  $I_v$ . Folosind relațiile 2.11, 2.14 și 2.13 rezultă:

$$I_v(24) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{2,12}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{24}{1}\right)} = \frac{2,12}{7,95} = 0,267$$

$$c_{pv}(24) = 1 + g \cdot I_v(24) = 1 + 3,5 \cdot I_v(24) = 1 + 3,5 \cdot 0,267 = 1,934$$

$$v_p(24) = c_{pv}(24) \cdot v_m(24) = 1,934 \cdot 18,74 = 36,25 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului,  $q_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.15):

$$q_p(z) = c_{pq}(z) \cdot q_m(z)$$

Factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului,  $c_{pq}(z)$  la înălțimea  $z$  deasupra terenului se definește cu relația (2.16). Astfel, pentru  $z=24$  m se obține:

$$c_{pq}(z) = 1 + 2g \cdot I_v(z) = 1 + 7 \cdot I_v(z)$$

$$c_{pq}(24) = 1 + 2g \cdot I_v(24) = 1 + 7 \cdot I_v(24) = 1 + 7 \cdot 0,267 = 2,869$$

$$q_p(24) = c_{pq}(24) \cdot q_m(24) = 2,869 \cdot 0,22 = 0,63 \text{ kPa}$$

#### F.4.3 Distribuția presiunilor pe suprafețele rigide exterioare

Presiunea/sucțiunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide exterioare ale clădirii de birouri se determină cu relația (3.1):

$$w_e = \gamma_{lw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

unde

- $q_p(z_e)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_e$ ;
- $z_e$  este înălțimea de referință pentru presiunea exterioară;
- $c_{pe}$  este coeficientul aerodinamic de presiune / sucțiune pentru suprafețe exterioare;
- $\gamma_{lw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

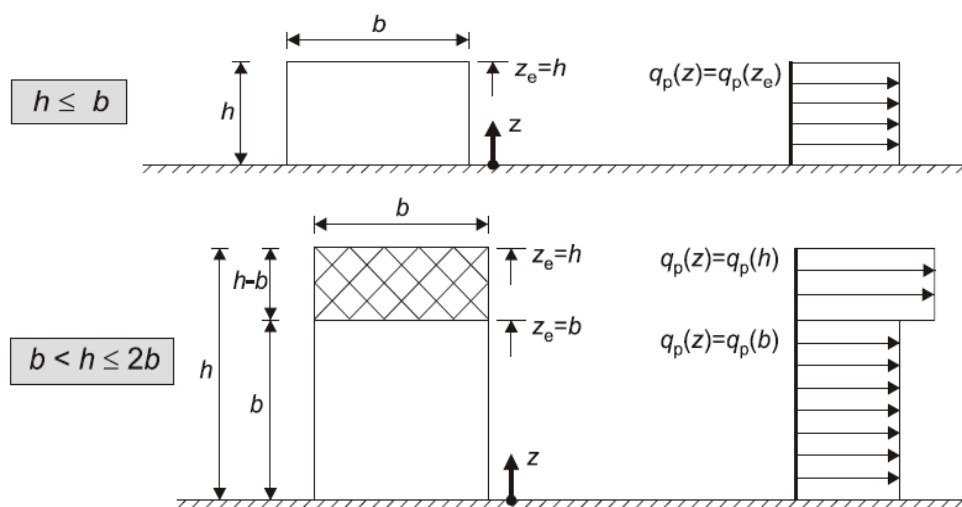


Figura F.4.2 Înălțimi de referință  $z_e$  și profilul corespunzător al presiunii vântului în funcție de  $h$  și  $b$

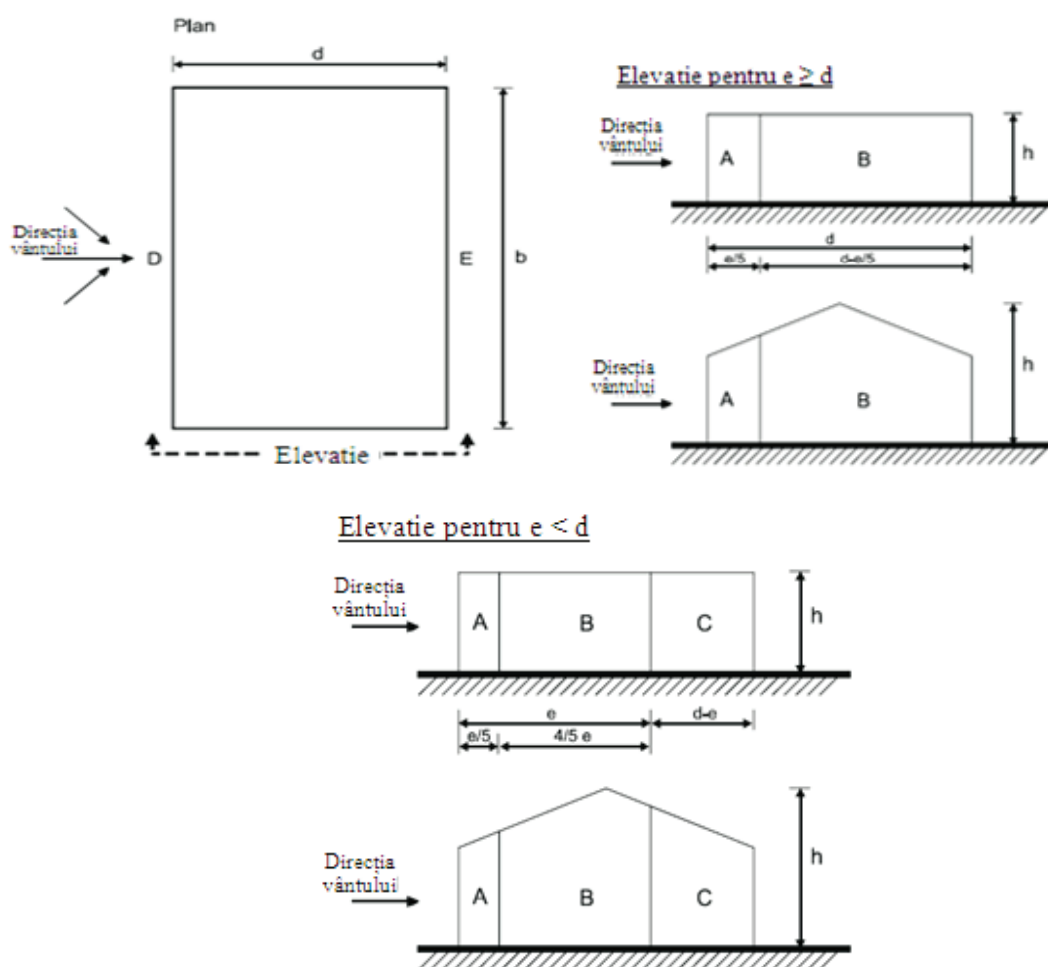


Figura F.4.3 Notății pentru pereții verticali

În Figurile F.4.2 și F.4.3  $e = \min(b; 2h)$ ; în cazul în care vântul bate perpendicular pe latura lungă ( $b = 25\text{ m}$  și  $d = 15\text{ m}$ ),  $e = 25\text{ m}$ , iar în cazul în care vântul bate perpendicular pe latura scurtă ( $b = 15\text{ m}$  și  $d = 25\text{ m}$ )  $e = 15\text{ m}$ . În primul caz  $e \geq d$ , iar în cazul al doilea  $e < F$ . În primul caz  $h/d = 24/15 = 1,6$ , iar în cazul al doilea  $h/d = 24/25 = 0,96$ .

Tabel F.4.1. Valorile coeficientului de presiune/sucțiune pe suprafețe exterioare

Zona	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,l}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,l}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,l}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,l}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,l}$
1,6	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,53	
0,96	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,79	+1,0	-0,49	

Pentru  $A \geq 10\text{m}^2$ ,  $c_{pe} = c_{pe,10}$ .

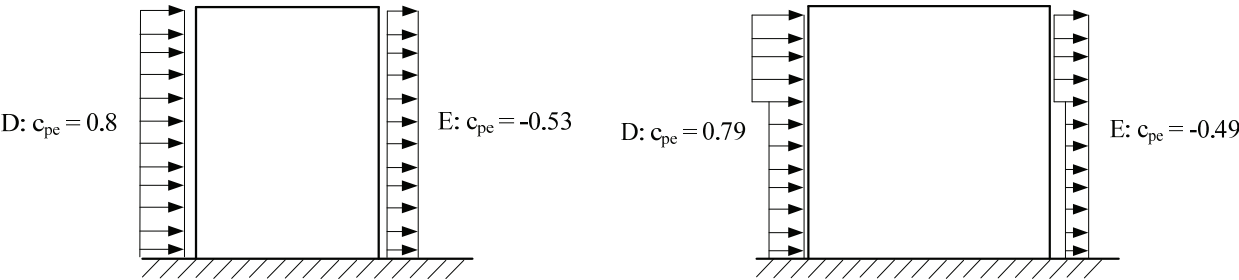


Figura F.4.4 Distribuția presiunilor pe suprafețele exterioare perpendiculare pe direcția vântului și valorile coeficientului de presiune/sucțiune pe suprafețe exterioare

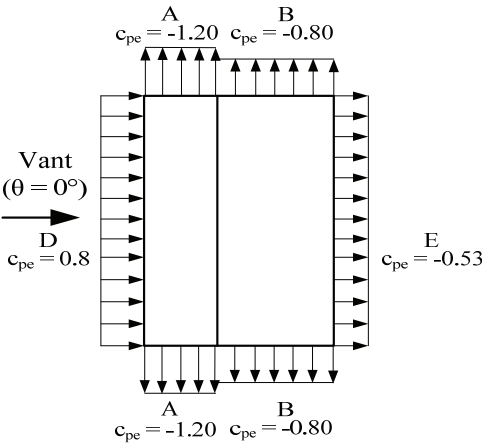


Figura F.4.5 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune/sucțiune pe suprafețele rigide

F.4.4 Coeficientul aerodinamic de forță

Coeficientul aerodinamic de forță,  $c_f$  se determină cu relația (4.9):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

unde:

$c_{f,0}$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru secțiuni rectangulare cu colțuri ascuțite și fără curgere liberă a aerului la capete (element de lungime infinită) din Figura 4.23;

$\psi_r$  este factorul de reducere pentru secțiuni pătrate cu colțuri rotunjite, dependent de numărul Reynolds; conform Figurii 4.24,  $\psi_r = 1,0$ ;

$\psi_\lambda$  este factorul de reducere pentru elemente cu curgere liberă a aerului la capete (reducerea apare ca urmare a căilor suplimentare de curgere a aerului în jurul unui element de lungime finită).

În primul caz (vânt perpendicular pe latura lungă) raportul  $d/b=0,6$ , deci din Figura 4.23 rezultă  $c_{f,0} = 2,35$ . Conform Tabelului 4.16,  $\lambda = \min(1,4 \cdot l/b; 70) = 1,34$ ,  $\varphi=1,0$ , deci din Figura 4.36 rezultă  $\psi_\lambda = 0,62$ . Valoarea coeficientului aerodinamic de forță,  $c_f$  rezultă:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 2,35 \cdot 1,0 \cdot 0,62 = 1,46$$

În al doilea caz (vânt perpendicular pe latura scurtă) raportul  $d/b=1,67$ , deci din Figura 4.23 rezultă  $c_{f,0} = 1,80$ . Conform Tabelului 4.16,  $\lambda = \min(1,4 \cdot l/b; 70) = 2,24$ ,  $\varphi = 1,0$ , deci din Figura 4.36 rezultă  $\psi_\lambda = 0,64$ . Valoarea coeficientului aerodinamic de forță,  $c_f$  rezultă:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 1,80 \cdot 1,0 \cdot 0,64 = 1,15$$

#### F.4.5 Coeficientul de răspuns dinamic

Deoarece clădirea analizată are o înălțime de cel mult 30 m și dimensiunile în plan de cel mult 50 m coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  poate fi determinat conform prevederilor din subcapitolul 5.3. Conform tabelului 5.1 pentru structuri de beton armat cu  $h \leq 30$  m și  $b \leq 50$  m și pentru un teren de categoria IV – zone urbane, cu lungimea de rugozitate  $z_0=1,0$  m,  $c_d = 0,85$ .

#### F.4.6 Forța globală pe direcția vântului

Forța din vânt ce acționează asupra unei clădiri / structuri sau asupra unui element structural poate fi determinată în două moduri:

- i. ca forță globală utilizând coeficienții aerodinamici de forță, sau
- ii. prin sumarea presiunilor / suucțiunilor ce acționează pe suprafețele (rigide) ale clădirii / structurii utilizând coeficienții aerodinamici de presiune / suucțiune.

- i. Forța globală pe direcția vântului  $F_w$ , ce acționează pe structură sau pe un element structural având aria de referință  $A_{ref}$  orientată perpendicular pe direcția vântului, se determină cu relația generală:

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

- ii. Forța globală pe direcția vântului,  $F_w$  ce acționează pe clădire poate fi determinată prin compunerea vectorială a forțelor  $F_{w,e}$  calculate pe baza presiunilor / sujeciunilor exterioare calculate cu relația (3.5) cu forțele de frecare,  $F_{fr}$  rezultate din frecarea aerului paralel cu suprafețele exterioare, calculate cu relația (3.7):

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{suprafete} w_e(z_e) \cdot A_{ref}$$

$$F_{fr} = \gamma_{Iw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

În relațiile de mai sus:

$c_d$  este coeficientul de răspuns dinamic al construcției;

$w_e(z_e)$  - presiunea vântului ce acționează pe o suprafață exterioară individuală la înălțimea  $z_e$ ;

$A_{ref}$  - aria de referință a suprafeței individuale;

$c_{fr}$  - coeficientul de frecare.  $c_{fr} = 0.01$  pentru o suprafață netedă;

$A_{fr}$  - aria suprafeței exterioare orientată paralel cu direcția vântului;

$\gamma_{Iw}$  - factorul de importanță – expunere pentru acțiunea vântului din Tabelul 3.1;  $\gamma_{Iw} = 1$  pentru o construcție din clasa III.

Presiunea / sujeciunea vântului ce acționează pe suprafețele rigide exterioare ale clădirii se determină cu relația (3.1):

$$w_e = \gamma_{Iw} \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

#### F.4.6.1 Cazul I (vânt perpendicular pe latura lungă - direcția vântului $\theta = 0^\circ$ )

- (i) Forță globală utilizând coeficienții aerodinamici de forță

Deoarece  $h < b$ , conform Figurii F.4.2, valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului se evaluează la cota  $z_e = h$ . Valoarea forței globale din vânt este:

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1 \cdot 0,85 \cdot 1,46 \cdot (0,63 \cdot 25 \cdot 24) = 469,10 \text{ kN}$$



- (ii) Prin sumarea presiunilor / suucțiunilor ce acționează pe suprafețele (rigide) ale clădirii utilizând coeficienții aerodinamici de presiune / suucțiune

Zona D

$$\sum w_e \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,8 \cdot 25 \cdot 24 \cdot 0,63) = 302,4 \text{ kN}$$

Zona E

$$\sum w_e \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,53 \cdot 25 \cdot 24 \cdot 0,63) = 200,34 \text{ kN}$$

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = 0,85 \cdot 502,74 = 427,33 \text{ kN}$$

$$F_{fr} = \gamma_{Iw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} = 1 \cdot 0,01 \cdot (2 \cdot 15 \cdot 24 \cdot 0,63) = 4,54 \text{ kN}$$

$$F_w = F_{w,e} + F_{fr} = 427,33 + 4,54 = 431,87 \text{ kN}$$

Sucțiunea pe pereții paraleli cu direcția vântului (pe un singur perete, deoarece pe ambii pereți rezultanta pe clădire este egală cu zero):

Zona A

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-1,20 \cdot 0,63 \cdot 5 \cdot 24) \cdot 1 = -90,72 \text{ kN}$$

Zona B

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,80 \cdot 0,63 \cdot 10 \cdot 24) \cdot 1 = -120,96 \text{ kN}$$

#### F.4.6.2 Cazul II (vânt perpendicular pe latura lungă - direcția vântului $\theta = 90^\circ$ )

- (i) Forță globală utilizând coeficienții aerodinamici de forță

$$c_r^2(15) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 = 0,054 \cdot \left[ \ln\left(\frac{15}{1}\right) \right]^2 = 0,054 \cdot 7,33 = 0,40$$

$$q_m(15) = c_r^2(15) \cdot q_b = 0,40 \cdot 0,4 = 0,16 \text{ kPa}$$

$$I_v(15) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{2,12}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{15}{1}\right)} = \frac{2,12}{6,77} = 0,313$$

$$c_{pq}(15) = 1 + 2g \cdot I_v(15) = 1 + 7 \cdot I_v(15) = 1 + 7 \cdot 0,313 = 3,191$$

$$q_p(15) = c_{pq}(15) \cdot q_m(15) = 3,191 \cdot 0,16 = 0,51 \text{ kPa}$$

Deoarece  $b < h < 2b$ , conform Figurii F.4.2, valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului se evaluează la cotele  $z_e=b$  și  $z_e=h$ . Valoarea forței globale din vânt este:

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1 \cdot 0,85 \cdot 1,15 \cdot (0,51 \cdot 15 \cdot 15 + 0,63 \cdot 15 \cdot 9) = 195,30 \text{ kN}$$

(ii) Prin sumarea presiunilor / suucțiunilor ce acționează pe suprafețele (rigide) ale clădirii utilizând coeficienții aerodinamici de presiune / suucțiune

Zona D

$$\sum w_e \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,79 \cdot 15 \cdot 15 \cdot 0,51 + 0,79 \cdot 15 \cdot 9 \cdot 0,63) = 157,84 \text{ kN}$$

Zona E

$$\sum w_e \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (0,49 \cdot 15 \cdot 15 \cdot 0,51 + 0,49 \cdot 15 \cdot 9 \cdot 0,63) = 97,90 \text{ kN}$$

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = 0,85 \cdot 255,74 = 217,38 \text{ kN}$$

$$F_{fr} = \gamma_{Iw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} = 1 \cdot 0,01 \cdot (2 \cdot 25 \cdot 24 \cdot 0,63) = 7,56 \text{ kN}$$

$$F_w = F_{w,e} + F_{fr} = 217,38 + 7,56 = 224,94 \text{ kN}$$

Zona A

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-1,20 \cdot 0,51 \cdot 15 \cdot 3 - 1,20 \cdot 0,51 \cdot 9 \cdot 3) \cdot 1 = -44,06 \text{ kN}$$

Zona B

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,80 \cdot 0,51 \cdot 15 \cdot 12 - 0,80 \cdot 0,63 \cdot 9 \cdot 12) \cdot 1 = -127,87 \text{ kN}$$

Zona C

$$F_{w,e} = \sum_{\text{suprafete}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} = \gamma_{Iw} \cdot \left( \sum c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \right) = 1 \cdot (-0,50 \cdot 0,63 \cdot 15 \cdot 10 - 0,50 \cdot 0,63 \cdot 9 \cdot 10) \cdot 1 = -75,60 \text{ kN}$$

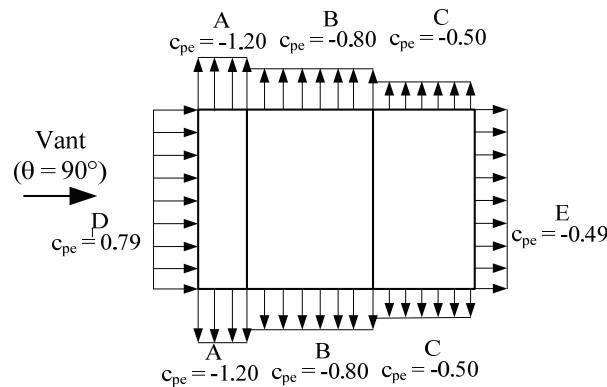


Figura F.4.6 Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune / suucțiune pe suprafețele rigide (θ = 90°)

Tabel F.4.2. Forțe globale din vânt calculate prin cele două metode de calcul

θ [°]	0°	90°
$F_w$ [kN] - I	469,10	195,30
$F_w$ [kN] - II	431,87	224,94

*F.5 EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC LA ACȚIUNEA VÂNTULUI PENTRU O CLĂDIRE CU REGIM MARE DE ÎNĂLȚIME*

*F.5.1 Informații generale*

În acest exemplu de calcul se evaluează acțiunea vântului pe o clădire de birouri cu regim mare de înălțime. Se consideră o clădire cu structură metalică cu dimensiunile în plan 30 m x 30 m și cu regim de înălțime P+29E (înălțimea de etaj = 3,80 m). Clădirea este amplasată în municipiul București în teren de categoria III caracterizat de o lungime de rugozitate  $z_0 = 0,3\text{m}$ .

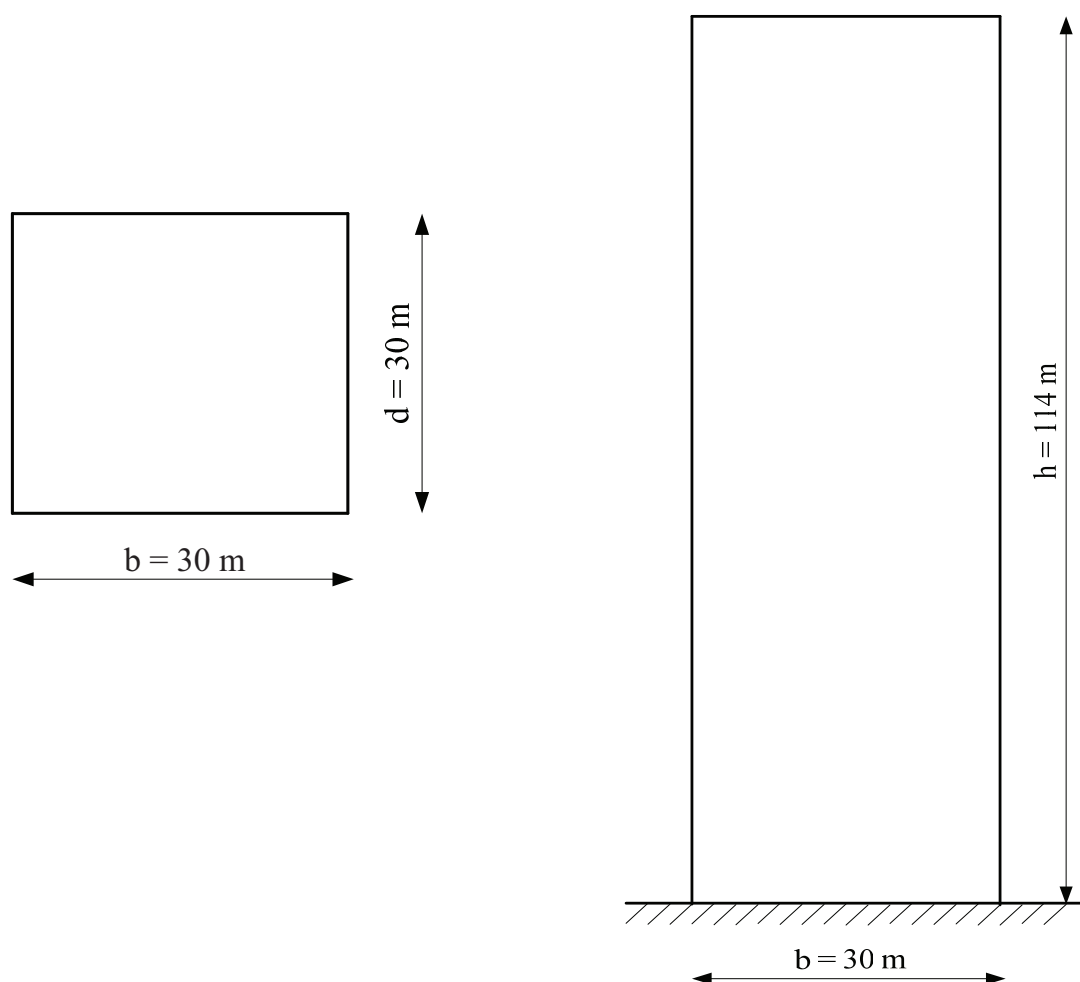


Figura F.5.1 Plan și elevație pentru structura analizată

### F.5.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

Pentru municipiul București, presiunea de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri cu o probabilitate de depășire într-un an de 0,02 (interval mediu de recurență de 50 de ani) este conform hărții de zonare din Figura 2.1,  $q_b = 0,5$  kPa, iar viteza de referință a vântului mediată pe 10 minute la 10 metri se determină cu relația (2.1):

$$q_b [\text{Pa}] = 0,625 \cdot v_b^2 [\text{m/s}]$$

$$v_b = \sqrt{\frac{q_b}{0,625}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 1000}{0,625}} = 28,3 \text{ m/s}$$

Categoria de teren în amplasamentul construcției este III cu lungimea de rugozitate  $z_0 = 0,3$  m. Valorile vitezelor și presiunilor se determină la înălțimea  $z_s = 0,6 \cdot h = 68,40$  m.

Viteza medie a vântului,  $v_m(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.3):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot v_b$$

Factorul de rugozitate pentru viteza vântului,  $c_r(z)$  se determină cu relația (2.4):

$$c_r(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Factorul de teren  $k_r$  se calculează cu relația (2.5):

$$k_r(z_0) = 0,189 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$$

sau se pot lua valorile prezentate în Tabelul 2.2.

Viteza medie a vântului,  $v_m(z)$  la înălțimea  $z_s = 68,4$  m deasupra terenului este:

$$c_r(68,4) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,214 \cdot \ln\left(\frac{68,4}{0,3}\right) = 0,214 \cdot 5,43 = 1,16$$

$$v_m(68,4) = c_r(68,4) \cdot v_b = 1,16 \cdot 28,3 = 32,83 \text{ m/s}$$

Presiunea medie a vântului la înălțimea  $z$  deasupra terenului se calculează cu relația (2.7)

$$q_m(z) = c_r^2(z) \cdot q_b$$

unde  $q_b = 0,5$  kPa este presiunea de referință a vântului pentru municipiul București din harta de zonare din Figura 2.1, iar  $c_r^2(z)$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului.

Factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului,  $c_r^2(z)$  se determină cu relația (2.9)

$$c_r^2(z) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2$$

Valorile  $k_r^2(z_0)$  sunt prezentate în Tabelul 2.2.

Presiunea medie a vântului,  $q_m(z)$  la înălțimea  $z_s = 68,4$  m deasupra terenului este:

$$c_r^2(68,4) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^2 = 0,046 \cdot \left[ \ln\left(\frac{68,4}{0,3}\right) \right]^2 = 0,046 \cdot 29,48 = 1,36$$

$$q_m(68,4) = c_r^2(68,4) \cdot q_b = 1,36 \cdot 0,5 = 0,68 \text{ kPa}$$

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.13)

$$v_p(z) = c_{pv}(z) \cdot v_m(z)$$

unde  $c_{pv}(z)$  este factorul de rafală pentru viteza medie a vântului.

Factorul de rafală pentru viteza medie a vântului,  $c_{pv}(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului se determină cu relația (2.14)

$$c_{pv}(z) = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z)$$

unde  $g$  este factorul de vârf a cărui valoare recomandată este  $g = 3,5$ .

Intensitatea turbulenței la înălțimea  $z$  se determină cu relația (2.11):

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Valorile factorului de proporționalitate  $\beta$  pot fi considerate conform relației (2.12):

$$4,5 \leq \beta = 4,5 - 0,856 \ln(z_0) \leq 7,5$$

În Tabelul 2.3 sunt date valorile  $\sqrt{\beta}$  pentru a fi utilizate în relația pentru calculul intensității turbulenței vântului,  $I_v$ . Intensitatea turbulenței la înălțimea  $z_s = 68,4$  m este:

$$I_v(68,4) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{2,35}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{68,4}{0,3}\right)} = \frac{2,35}{13,57} = 0,173$$

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la înălțimea  $z_s = 68,4$  m este:

$$c_{pv}(68,4) = 1 + g \cdot I_v(68,4) = 1 + 3,5 \cdot I_v(68,4) = 1 + 3,5 \cdot 0,173 = 1,61$$

$$v_p(68,4) = c_{pv}(68,4) \cdot v_m(68,4) = 1,61 \cdot 32,83 = 52,86 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului,  $q_p(z)$  la o înălțime  $z$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.15):

$$q_p(z) = c_{pq}(z) \cdot q_m(z)$$

Factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului,  $c_{pq}(z)$  la înălțimea  $z$  deasupra terenului se definește cu relația (2.16):

$$c_{pq}(z) = 1 + 2g \cdot I_v(z) = 1 + 7 \cdot I_v(z)$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului,  $q_p(z)$  la înălțimea  $z_s=68,4$  m este:

$$c_{pq}(68,4) = 1 + 2g \cdot I_v(68,4) = 1 + 7 \cdot I_v(68,4) = 1 + 7 \cdot 0,173 = 2,21$$

$$q_p(68,4) = c_{pq}(68,4) \cdot q_m(68,4) = 2,21 \cdot 0,68 = 1,50 \text{ kPa}$$

### F.5.3 Coeficientul de răspuns dinamic

Deoarece înălțimea clădirii este mai mare de 50 m nu se poate aplica metoda simplificată și coeficientul de răspuns dinamic  $c_d$  se va determina folosind procedura de evaluare detaliată de la pct. 3.4.2.2.

Valoarea coeficientului de răspuns dinamic,  $c_d$  se determină cu relația (3.8):

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

unde:

$z_s$  este înălțimea de referință pentru determinarea coeficientului de răspuns dinamic;

$k_p$  factorul de vârf pentru răspunsul extrem maxim al structurii.

Lungimea scării integrale a turbulenței,  $L(z)$  se poate determina cu relația (5.1) aplicată la înălțimea  $z_s$ :

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha = 300 \cdot \left( \frac{68,4}{200} \right)^{0,67+0,05 \ln(0,3)} = 155,94 \text{ m}$$

unde înălțimea de referință  $z_t = 200$  m,  $L_t = 300$  m și  $\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$ .

Factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static),  $B^2$ , ce ia în considerare corelația efectivă a valorilor de vârf ale presiunilor pe suprafața expusă a clădirii/structurii, se determină cu relația (5.3)

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}}$$

unde

$b, h$  sunt lăţimea şi înălţimea structurii;

$L(z_s)$  este lungimea scării integrale a turbulenţei dată de relaţia (5.1) la înălţimea de referinţă,  $z_s$ .

Valoarea factorului de răspuns nerezonant este:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{30+114}{155,94} \right)^{0,63}} = 0,539$$

Frecvenţa proprie fundamentală  $n_{1x}$  pentru această clădire multietajată metalică este evaluată cu relaţia (E.2b):

$$n_{1x} = \frac{40}{h} = \frac{40}{114} = 0,35 \text{ Hz}$$

Funcţiile de admitanţă aerodinamică  $R_h$  şi  $R_b$ , pentru vectorul propriu fundamental, se determină cu relaţiile (5.7) şi (5.8):

$$R_h(\eta_h) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_h = 0 \\ \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) & \text{pentru } \eta_h > 0 \end{cases}$$

$$R_b(\eta_b) = \begin{cases} 1 & \text{pentru } \eta_b = 0 \\ \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) & \text{pentru } \eta_b > 0 \end{cases}$$

Valorile  $\eta_h$  şi  $\eta_b$  sunt calculate cu relaţiile (5.9) şi (5.10):

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)}$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)}.$$

Din relaţiile (5.9) şi (5.10) obţinem:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 114 \cdot 0,35}{32,83} = 5,59$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b \cdot n_{1,x}}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 30 \cdot 0,35}{32,83} = 1,47$$

Funcțiile de admitanță aerodinamică  $R_h$  și  $R_b$ , se determină cu relațiile (5.7) și (5.8):

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{5,59} - \frac{1}{2 \cdot 5,59^2} (1 - e^{-2 \cdot 5,59}) = 0,163$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{1,47} - \frac{1}{2 \cdot 1,47^2} (1 - e^{-2 \cdot 1,47}) = 0,461$$

Frecvența adimensională  $f_L(z_s, n_{1x})$ , calculată în funcție de frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii pe direcția vântului turbulent  $n_{1x}$ , de viteza medie a vântului la cota  $z_s$ ,  $v_m(z_s)$  și de lungimea scării integrale a turbulenței,  $L(z_s)$  are valoarea:

$$f_L(z_s, n_{1x}) = \frac{n_{1x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{0,35 \cdot 155,94}{32,83} = 1,66$$

Densitatea spectrală de putere unilaterală și normalizată dată de relația (5.2), evaluată la înălțimea  $z_s$  pentru frecvența  $n_{1x}$  are valoarea:

$$S_L(z_s, n_{1x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1x}))^{5/3}} = \frac{6,8 \cdot 1,66}{(1 + 10,2 \cdot 1,66)^{5/3}} = 0,092$$

Decrementul logaritmic al amortizării,  $\delta$  pentru modul fundamental de vibrație este estimat cu relația (C.8)

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

unde

$\delta_s$  este decrementul logaritmic al amortizării structurale;

$\delta_a$  decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental;

$\delta_d$  decrementul logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale (mase acordate, amortizori cu lichid etc.), dacă este cazul. În acest caz,  $\delta_d = 0$ .

În Tabelul C.2 sunt date valori aproximative ale decrementului logaritmic al amortizării structurale,  $\delta_s$ . Pentru structuri metalice,  $\delta_s = 0,05$ .

Decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice,  $\delta_a$  pentru modul fundamental de încovoiere produs de vibrațiile în direcția vântului este estimat cu relația (C.9)

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$$

unde:

$c_f$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru acțiunea vântului pe direcție longitudinală;

$\rho$  este densitatea aerului, egală cu  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ;

$b$  este lățimea structurii;



$v_m(z_s)$  este viteza medie a vântului pentru  $z = z_s$ ;

$z_s$  este înălțimea de referință;

$n_1$  este frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii în direcția vântului;

$m_e$  este masa echivalentă pe unitate de lungime a structurii.

Masa echivalentă pe unitate de lungime,  $m_e$  pentru modul fundamental de vibrație este dată de relația (E.7):

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds}$$

unde:

$m$  este masa construcției pe unitatea de lungime;

$\ell$  este înălțimea sau deschiderea structurii sau a elementului structural.

Pentru clădiri, turnuri și coșuri, modelate ca structuri în consolă încastrate la bază, vectorul propriu fundamental de încovoiere,  $\Phi_1(z)$  poate fi aproximat cu o relație de forma (C.6):

$$\Phi_1(z) = \left( \frac{z}{h} \right)^\zeta$$

unde  $\zeta = 1,0$  pentru clădiri cu stâlpi și contravântuiri verticale.

Se consideră o greutate de  $8 \text{ kN/m}^2$  de planșeu al clădirii, deci greutatea totală a clădirii este  $8 \times (30 \times 30) \times 30 = 216000 \text{ kN}$ . Greutatea pe unitate de lungime (înălțime) este egală cu  $216000/114 = 1894,7 \text{ kN/m}$ . Deoarece masa pe unitate de lungime este constantă pe înălțimea clădirii (nu depinde de  $s$  în relația (C.7)),  $m_e = (1894700 \text{ N/m}) / (9,81 \text{ m/s}^2) = 193140 \text{ kg/m}$ .

Coeficientul aerodinamic de forță,  $c_f$  se determină cu relația (4.9):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_T \cdot \psi_\lambda$$

unde:

$c_{f,0}$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru secțiuni rectangulare cu colțuri ascuțite și fără curgere liberă a aerului la capete (element de lungime infinită) din Figura 4.23;

$\psi_T$  este factorul de reducere pentru secțiuni pătrate cu colțuri rotunjite; conform Figurii 4.24,  $\psi_T = 1,0$ ;

$\psi_\lambda$  este factorul de reducere pentru elemente cu curgere liberă a aerului la capete (reducerea apare ca urmare a căilor suplimentare de curgere a aerului în jurul unui element de lungime finită).

Deoarece raportul  $d/b = 1,0$ , din Figura 4.23 rezultă  $c_{f,0} = 2,1$ . Conform Tabelului 4.16,  $\lambda = \min(1,4 \cdot l/b; 70) = 5,3$ ,  $\phi = 1,0$ , deci din Figura 4.36, rezultă  $\psi_\lambda = 0,67$ . Astfel:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_f \cdot \psi_\lambda = 2,1 \cdot 1,0 \cdot 0,67 = 1,41$$

Din relația (C.9), rezultă:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = \frac{1,41 \cdot 1,25 \cdot 30 \cdot 32,83}{2 \cdot 0,35 \cdot 193140} = 0,013$$

Conform relației (C.8) rezultă:

$$\delta = 0,05 + 0,013 + 0 = 0,063$$

$R^2$  este factorul de răspuns rezonant ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural produse de conținutul de frecvențe al turbulenței în cvasi-rezonanță cu frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii (evaluează componenta rezonantă a răspunsului).  $R^2$  se determină cu relația (5.6):

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

și are valoarea:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,063} \cdot 0,092 \cdot 0,163 \cdot 0,461 = 0,542$$

Frecvența medie  $\nu$  a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent se calculează cu relația (5.5)

$$\nu = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$$

și are valoarea:

$$\nu = 0,35 \cdot \sqrt{\frac{0,542}{0,539 + 0,542}} = 0,248$$

Factorul de vârf pentru determinarea răspunsului extrem maxim al structurii,  $k_p$ , definit ca raportul dintre valoarea extremă maximă a componentei fluctuante a răspunsului structural și abaterea sa standard, se obține cu relația (5.4):

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \geq 3$$

unde:

$\nu$  este frecvența medie a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent;

$T$  este durata de mediere a vitezei de referință a vântului,  $T = 600$  s (aceeași ca pentru viteza medie a vântului);

$\gamma = 0,5772$ , este constanta lui Euler.

Din (5.4) se calculează valoarea factorului de vârf  $k_p$ :

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,248 \cdot 600)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,248 \cdot 600)}} = 3,345$$

În final, se obține coeficientul de răspuns dinamic,  $c_d$  cu relația (3.8):

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,345 \cdot 0,173 \cdot \sqrt{0,539 + 0,542}}{1 + 7 \cdot 0,173} = 0,997$$

#### F.5.4 Forța globală pe direcția vântului

Forța globală pe direcția vântului  $F_w$ , ce acționează pe structură sau pe un element structural având aria de referință  $A_{ref}$  orientată perpendicular pe direcția vântului, se determină cu relația generală

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

unde:

$q_p(z_e)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_e = z_s$ ;

$c_d$  este coeficientul de răspuns dinamic al construcției;

$c_f$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru clădire / structură sau element structural, ce include și efectele frecării;

$A_{ref}$  este aria de referință, orientată perpendicular pe direcția vântului;

$\gamma_{Iw}$  este factorul de importanță – expunere pentru acțiunea vântului; conform Tabelului 3.1 această clădire se consideră a fi în clasa II de importanță-expunere cu  $\gamma_{Iw} = 1,15$ .

Astfel forța globală pe direcția vântului este:

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1,15 \cdot 0,997 \cdot 1,41 \cdot 1,50 \cdot 114 \cdot 30 = 8293 \text{ kN}$$

Înălțimile de referință  $z_e$  și profilul presiunilor pe fața expusă este cel din Figura 4.4 (pentru cazul clădirii analizate cu  $h > 2b$ ).

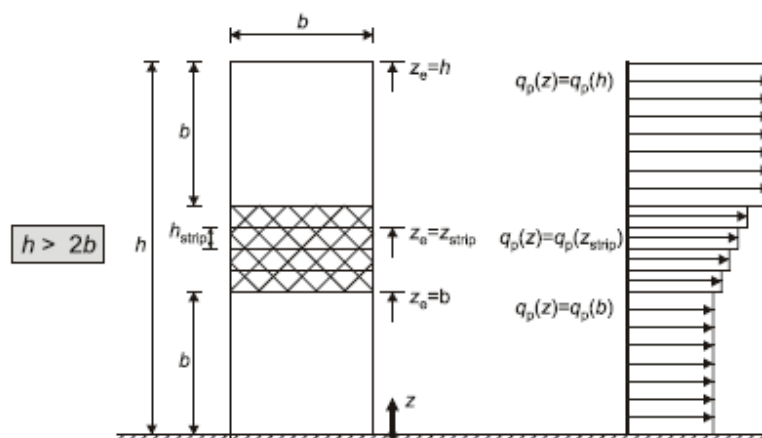


Figura F.5.2 Înălțimi de referință  $z_e$  și profilul corespunzător al presiunii vântului în funcție de  $h$  și  $b$

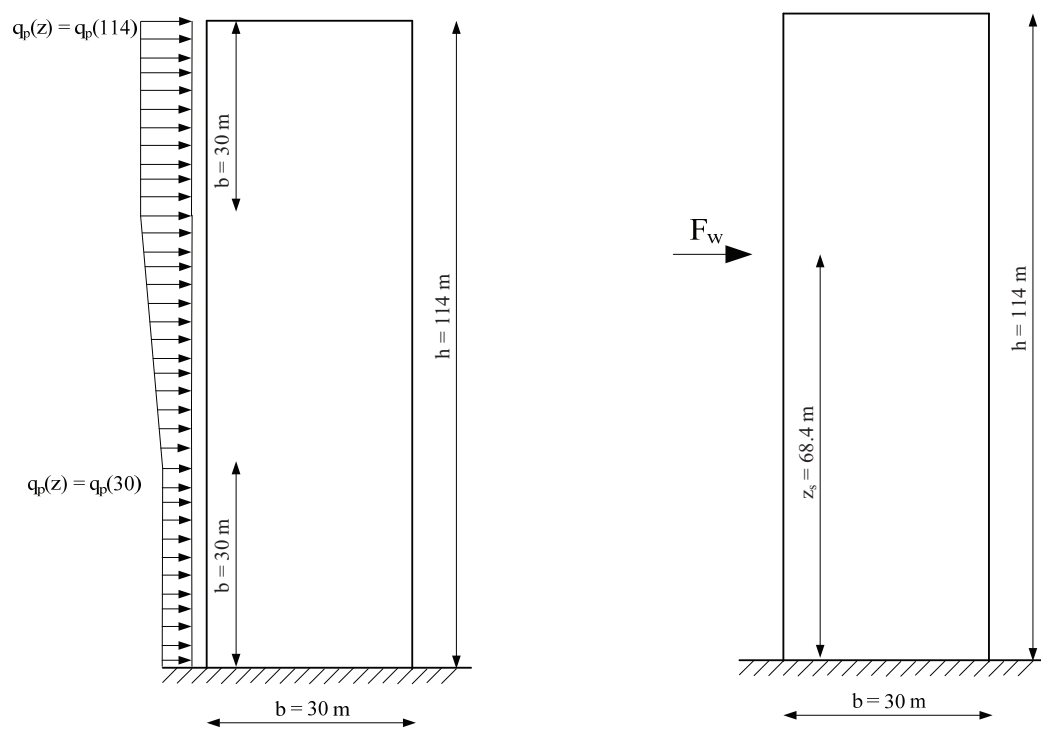


Figura F.5.3 Distribuția presiunilor pe suprafețele exterioare și înălțimea de referință  $z_s$  pentru calculul dinamic la vânt

### F.5.5 Accelerația longitudinală la vârful clădirii

Pentru clădiri înalte sau flexibile (înălțimea  $h \geq 30$  m sau frecvența proprie de vibrație  $n_1 \leq 1$  Hz), pentru verificarea la starea limită de serviciu se utilizează valoarea maximă a accelerației clădirii pe direcția vântului evaluată la înălțimea  $z = h$ .

Abaterea standard,  $\sigma_{a,x}$  a accelerației caracteristice a structurii pe direcția vântului la cota  $z$  se obține cu relația (5.11):

$$\sigma_{a,x} = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot I_v(z_s) \cdot v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} \cdot R \cdot K_x \cdot \Phi_{1,x}(z)$$

unde:

- $c_f$  este coeficientul aerodinamic de forță;
- $\rho$  este densitatea aerului, egală cu  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ;
- $b$  este lățimea structurii;
- $d$  este lungimea structurii;
- $h$  este înălțimea structurii;
- $I_v(z_s)$  este intensitatea turbulenței la înălțimea  $z = z_s$  deasupra terenului;
- $v_m(z_s)$  este viteza medie a vântului pentru  $z = z_s$  pentru o viteză de referință a vântului cu  $IMR = 10$  ani;
- $z_s$  este înălțimea de referință;
- $R$  este rădăcina pătrată a factorului răspunsului rezonant;
- $K_x$  este un coeficient adimensional;
- $m_{1,x}$  este masa echivalentă pentru modul fundamental de vibrație în direcția vântului;
- $n_{1,x}$  este frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii în direcția vântului;
- $\Phi_{1,x}(z)$  este ordonata vectorului propriu fundamental de vibrație pe direcția vântului la cota  $z$ .

Coeficientul adimensional  $K_x$  se determină cu relația generală (5.12):

$$K_x = \frac{\int_0^h v_m^2(z) \cdot \Phi_{1,x}(z) dz}{v_m^2(z_s) \cdot \int_0^h \Phi_{1,x}^2(z) dz}$$

Dacă  $\Phi_{1,x}(z) = (z/h)^\zeta$  și  $c_o(z) = 1$  (teren plat) relația (5.12) poate fi aproximată prin relația (5.13):

$$K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot \left\{ (\zeta + 1) \cdot \left[ \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) + 0,5 \right] - 1 \right\}}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right)}$$

Pentru  $\zeta = 1$ , rezultă:

$$K_x = \frac{(2 \cdot \zeta + 1) \cdot \left\{ (\zeta + 1) \cdot \left[ \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) + 0,5 \right] - 1 \right\}}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right)} = \frac{(2 \cdot 1 + 1) \cdot \left\{ (1 + 1) \cdot \left[ \ln \left( \frac{68,4}{0,3} \right) + 0,5 \right] - 1 \right\}}{(1 + 1)^2 \cdot \ln \left( \frac{68,4}{0,3} \right)} = 1,50$$

Viteza medie a vântului la înălțimea  $z = z_s$  deasupra terenului este:

$$v_m(68,4) = c_r(68,4) \cdot v_b = 1,16 \cdot 28,3 = 32,83 \text{ m/s}$$

Viteza medie a vântului pentru  $z = z_s$  pentru o viteză de referință a vântului cu  $IMR = 10$  ani este (relația A.5):

$$v_{m,IMR=10 \text{ ani}} \cong 0,75 \cdot v_{m,IMR=50 \text{ ani}} = 0,75 \cdot 32,83 = 24,62 \text{ m/s}$$

Abaterea standard,  $\sigma_{a,x}$  a accelerației caracteristice a structurii pe direcția vântului la cota  $z = h$ :

$$\sigma_{a,x} = \frac{1,41 \cdot 1,25 \cdot 30 \cdot 0,173 \cdot 24,62^2}{193140} \cdot 0,736 \cdot 1,50 \cdot 1 = 0,0317 \text{ m/s}^2$$

Valoarea de vârf a accelerației caracteristice a clădirii,  $a_{\max,x}$  este obținută din relația (5.14) prin înmulțirea abaterii standard cu factorul de vârf calculat cu frecvența  $\nu = n_{1,x}$ :

$$\sqrt{2 \cdot \ln(n_{1,x} \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(n_{1,x} \cdot T)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(0,35 \cdot 600)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,35 \cdot 600)}} = 3,447$$

$$a_{\max,x} = \left( \sqrt{2 \cdot \ln(n_{1,x} \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(n_{1,x} \cdot T)}} \right) \cdot \sigma_{a,x} = 3,447 \cdot 0,0317 = 0,1092 \text{ m/s}^2$$

Accelerația limită superioară de confort pentru  $n_{1,x} < 1$  Hz este calculată cu relația (5.16)

$$a_{\lim} = \frac{a_0}{n_{1,x}^{0,56}}$$

unde:

$$a_0 = 6 \text{ cm/s}^2 \text{ pentru clădiri de birouri;}$$

$n_{1,x}$  este frecvența proprie a clădirii corespunzătoare primului mod de vibrație de încovoiere în direcția vântului.

Astfel, valoarea accelerației limită superioară de confort este:

$$a_{\text{lim}} = \frac{6}{0,35^{0,56}} = 10,8 \text{ cm/s}^2$$

La verificarea condiției (5.5)  $a_{\text{max},x} \leq a_{\text{lim}}$  se observă o ușoară depășire a accelerației limită superioară de confort (în jur de 1%), ceea ce poate fi considerat acceptabil.

## F.6. EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC LA ACȚIUNEA VÂNTULUI PENTRU UN COȘ DE FUM INDUSTRIAL

### F.6.1 Informații generale

- *Caracteristici geometrice și inerțiale:*
  - Înălțimea coșului de fum  $H = 110$  m
  - Diametrul exterior al coșului de fum  $D = 7,80 \dots 7,00$  m (de la bază la înălțimea de 30m, de unde diametrul este constant)
  - Grosimea peretelui de beton: 22cm
  - Greutatea totală a coșului de fum  $G_{\text{tot}} = 13250$  kN
  - Greutatea totală a structurii coșului de fum  $G_{\text{str}} = 12770$  kN
  - Greutatea totală a căptușelii coșului de fum  $G_{\text{cap}} = 480$  kN.
- *Condiții de amplasament:* coșul este amplasat în municipiul Craiova, categoria de teren II (câmp deschis-terenuri cu iarbă și/sau cu obstacole izolate – copaci, clădiri – aflate la distanțe de cel puțin de 20 de ori înălțimea obstacolului –  $z_0=0,05$ m).
- *Clasa de importanță-expunere pentru acțiunea vântului:* II; factor de importanță-expunere  $\gamma_{Iw}=1,15$ .
- *Caracteristici structurale:* coșul de fum are structura de rezistență din beton armat.

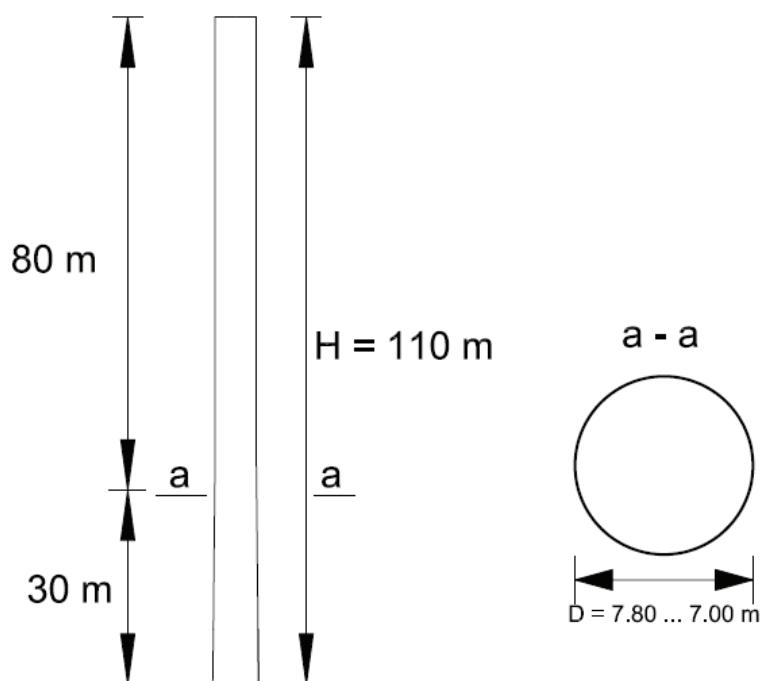


Figura F.6.1 Elevația și secțiunea transversală a coșului de fum



### F.6.2 Viteza și presiunea dinamică a vântului pe amplasament

Din harta de zonare a valorilor de referință ale presiunii dinamice a vântului având  $IMR = 50$  ani (Figura 2.1) se ia valoarea presiunii dinamice a vântului pentru amplasamentul coșului de fum considerat (municipiul Craiova)  $q_b = 0,5$  kPa.

Viteza de referință a vântului în amplasament se determină cu relația (A.3) ( $q_b$  exprimat în Pa):

$$v_b = \sqrt{\frac{2q_b}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 500}{1.25}} = 28,28 \text{ m/s}$$

unde  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  este densitatea aerului.

Viteza medie a vântului,  $v_m(z)$  la o înălțime  $z=z_e$  deasupra terenului se calculează cu relația (2.3):

$$v_m(z_e) = c_r(z_e) \cdot v_b$$

$$v_b = 28,28 \text{ m/s}$$

$$k_r(z_0) = 0,189 \text{ (teren categoria II)}$$

$$z_e = 0,6 \cdot H = 66 \text{ m}$$

$$c_r(z_e) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) = 0,189 \cdot \ln\left(\frac{66}{0,05}\right) = 1,358$$

$$v_m(z_e) = c_r(z_e) \cdot v_b = 1,358 \cdot 28,28 = 38,41 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a vitezei vântului,  $v_p(z)$  la înălțimea  $z=z_e$  deasupra terenului, produsă de rafalele vântului, se determină cu relația (2.13)

$$v_p(z_e) = c_{pv}(z_e) \cdot v_m(z_e)$$

unde  $c_{pv}(z_e)$  este factorul de rafală pentru viteza medie a vântului la cota  $z_e$

$$c_{pv}(z_e) = 1 + g \cdot I_v(z_e) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z_e)$$

și  $I_v$  este intensitatea turbulenței vântului definită în subcapitolul 2.4

$$I_v(z_e) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_e}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{66}{0,05}\right)} = 0,148$$

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$c_{pv}(z_e) = 1 + 3,5 \cdot I_v(z_e) = 1 + 3,5 \cdot 0,148 = 1,518$$

$$v_p(z_e) = c_{pv}(z_e) \cdot v_m(z_e) = 1,518 \cdot 38,41 = 58,31 \text{ m/s}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului la cota  $z_e$  se determină cu relația 2.17:

$$q_p(z_e) = c_{pq}(z_e) \cdot c_r^2(z_e) \cdot q_b$$

unde

$c_r^2(z_e)$  este factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului la înălțimea  $z_e$

$c_{pq}(z_e)$  este factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului la înălțimea  $z_e$ .

Factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină conform subcapitolului 2.3 astfel:

$$k_r^2(z_0) = 0,036 \text{ (teren de categoria II)}$$

$$c_r^2(z_e) = k_r^2(z_0) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \right]^2 = 0,036 \cdot \left[ \ln\left(\frac{66}{0,05}\right) \right]^2 = 1,859$$

Factorul de rafală pentru presiunea dinamică medie a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină conform subcapitolului 2.4 astfel:

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$I_v(z_e) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_e}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln\left(\frac{66}{0,05}\right)} = 0,148$$

$$c_{pq}(z_e) = 1 + 2g \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot 0,148 = 2,03$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului la cota  $z_e$  este:

$$q_p(z_e) = c_{pq}(z_e) \cdot c_r^2(z_e) \cdot q_b = 2,036 \cdot 1,859 \cdot 0,5 = 1,892 \text{ kPa}$$

### F.6.3 Parametrii dinamici și aerodinamici

Parametrii dinamici ai coșului de fum se evaluează folosind relațiile prezentate în Anexa C.

Frecvența proprie fundamentală a coșului se evaluează cu relația (C.3)

$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{ef}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}}$$

unde

$b$	este diametrul coșului la vârf, [m];
$h_{ef}$	este înălțimea efectivă a coșului, [m] din Figura F.6.2; $h_{ef} = h_1 + \frac{h_2}{3}$
$W_s$	este greutatea elementelor structurale ce contribuie la rigiditatea coșului;
$W_t$	este greutatea totală a coșului;
$\varepsilon_1$	este egal cu 700 pentru coșuri de beton armat și de zidărie.

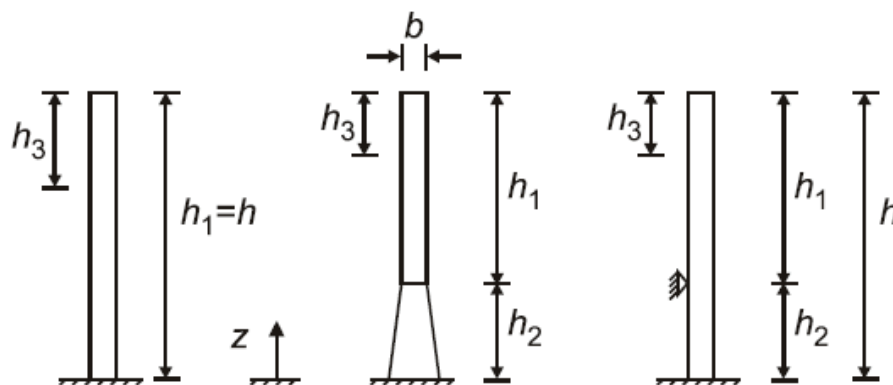


Figura F.6.2 Parametri geometrici pentru coșuri de fum

Coșul analizat are diametrul constant pe ultimi 80 m și deci  $h_1=80$  m și  $h_2=30$

$$h_{ef} = h_1 + \frac{h_2}{3} = 80 + \frac{30}{3} = 90 \text{ m}$$

$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{ef}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} = \frac{700 \cdot 7}{90^2} \cdot \sqrt{\frac{12770}{13250}} = 0,594 \text{ Hz}$$

Pentru clădiri, turnuri și coșuri, modelate ca structuri în consolă încastrate la bază, vectorul propriu fundamental de încovoiere,  $\Phi_1(z)$  poate fi aproximat cu relația (C.6):

$$\Phi_1(z) = \left( \frac{z}{h} \right)^\zeta$$

cu  $\zeta=2,0$  pentru coșuri și turnuri. Ordonatele vectorului propriu fundamental de încovoiere rezultă:

$z, m$	$\Phi_1(z)$
110	1,000
100	0,826
90	0,669
80	0,529
70	0,405
60	0,298
50	0,207
40	0,132
30	0,074
20	0,033
10	0,008
0	0

Conform paragrafului (2) din Capitolul C4, Anexa C, pentru structuri în consolă cu o distribuție variabilă a masei, masa echivalentă  $m_e$  poate fi aproximată prin valoarea medie a lui  $m$  în treimea superioară a structurii,  $h_3$  (Figura C.1). Pe această zonă geometria cosului este constantă având

diametrul exterior de 7 m și grosimea peretelui de 22cm (diametrul interior 6,56 m). Masa echivalentă a structurii pe unitatea de lungime se calculează după cum urmează:

$$G_e = \frac{\pi}{4} (7^2 - 6,56^2) \cdot 1 \cdot 2500 = 11709 \text{ daN/m}$$

$$m_e = \frac{G_e}{g} = \frac{11709 \cdot 10}{9,81} = 11935,8 \text{ kg/m}$$

Decrementul logaritmic al amortizării pentru modul fundamental de vibrație se determină cu relația (C.8):

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

unde:

$\delta_s$  este decrementul logaritmic al amortizării structurale

$\delta_a$  este decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice pentru modul fundamental de vibrație

$\delta_d$  este decrementul logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale (mase acordate, amortizori cu lichid etc.), dacă este cazul.

Conform *Tabelului C.2*, pentru decrementul logaritmic al amortizării structurale se considera valoarea  $\delta_s = 0,03$  (turnuri și coșuri de beton armat).

Decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice,  $\delta_a$  pentru modul fundamental de încovoiere produs de vibrațiile în direcția vântului este estimat cu relația (C.9):

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$$

unde

$c_f$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru acțiunea vântului pe direcție longitudinală

$\rho$  densitatea aerului, egală cu 1,25 kg/m<sup>3</sup>;

$b$  diametrul (lățimea) structurii;

$v_m(z_s)$  viteza medie a vântului pentru  $z = z_s$ ;

$z_s$  înălțimea de referință;

$n_1$  frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii în direcția vântului;

$m_e$  masa echivalentă pe unitatea de lungime a structurii.

Valoarea medie a vitezei vântului la  $z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 110 = 66 \text{ m}$

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot v_b = 1,358 \cdot 28,28 = 38,41 \text{ m/s}$$

Coeficientul aerodinamic de forță pentru un cilindru circular de înălțime finită este dat de relația (4.19)

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

unde:

$c_{f,0}$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru cilindri fără curgere liberă a aerului la capete, și

$\psi_\lambda$  - factorul efectului de capăt.

Factorul de reducere pentru elementele cu curgere liberă a aerului la capete (factorul efectului de capăt),  $\psi_\lambda$  este determinat în funcție de zveltețea efectivă,  $\lambda$ . Zveltețea efectivă,  $\lambda$  se definește în funcție de poziția și dimensiunile structurii (Tabelul 4.16):

$$\lambda = \min(0,7 \cdot H/b, 70) = 11$$

Din Figura 4.36, pentru valoarea  $\lambda = 11$  și coeficientul de obstrucție  $\varphi = 1$ , se obține o valoare a factorului de reducere  $\psi_\lambda = 0,71$ . Alternativ, valoarea factorului de reducere  $\psi_\lambda$  se poate determina cu relațiile:

$$\begin{aligned}\lambda &= 0,60 + 0,10 \cdot \log_{10} \lambda \quad \text{pentru } 1 \leq \lambda \leq 10 \\ \lambda &= 0,45 + 0,25 \cdot \log_{10} \lambda \quad \text{pentru } 10 \leq \lambda \leq 100 \\ \lambda &= 0,61 + 0,17 \cdot \log_{10} \lambda \quad \text{pentru } 100 \leq \lambda \leq 1000\end{aligned}$$

Numărul lui Reynolds este calculat cu relația (4.15):

$$Re = \frac{b \cdot v_p(z_e)}{\nu} = \frac{7 \cdot 58,31}{15 \cdot 10^{-6}} = 2,72 \cdot 10^7$$

unde

$b$  este diametrul secțiunii circulare  
 $\nu$  este vâscozitatea cinematică a aerului ( $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )  
 $v_p(z_e)$  este valoarea de vârf a vitezei vântului definită la înălțimea  $z_e$

Valoarea coeficientului aerodinamic de forță pentru cilindri fără curgere liberă a aerului la capete se determină din Figura 4.28 sau cu relația:

$$c_{f0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \lg\left(10 \cdot \frac{k}{b}\right)}{1 + 0,4 \cdot \lg(Re / 10^6)} = 1,02$$

unde  $k$  este rugozitatea echivalentă și are valoarea 0,02 pentru beton neted (Tabelul 4.13).

Valoarea coeficientului aerodinamic de forță pentru coșul de fum este:

$$c_f = c_{f0} \cdot \psi_\lambda = 1,02 \cdot 0,71 = 0,727$$

Decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice are valoarea:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = \frac{0,727 \cdot 1,25 \cdot 7 \cdot 38,41}{2 \cdot 0,594 \cdot 11935,8} = 0,017$$

#### F.6.4 Coeficientul de răspuns dinamic

Evaluarea coeficientului de răspuns dinamic al coșului se face folosind relația (3.8) din subcapitolul 3.4.2:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

unde

- $z_s$  este înălțimea de referință pentru determinarea coeficientului de răspuns dinamic; aceasta înălțime se determină conform Figura 3.2;
- $k_p$  este factorul de vârf pentru răspunsul extrem maxim al structurii;
- $I_v$  este intensitatea turbulenței vântului definită în subcapitolul 2.4;
- $B^2$  este factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static), ce evaluează corelația presiunilor din vânt pe suprafața construcției (evaluează componenta nerezonantă a răspunsului);
- $R^2$  este factorul de răspuns rezonant, ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural produse de conținutul de frecvențe al turbulenței în cvasi-rezonanță cu frecvența proprie fundamentală de vibrație a structurii (evaluează componenta rezonantă a răspunsului).

Evaluarea coeficientului de răspuns dinamic se face după cum urmează:

$$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 110 = 66 \text{ m}$$

$$z_0 = 0,05 \text{ m}$$

$$\sqrt{\beta} = 2,66 \text{ (teren categoria II)}$$

$$I_v(z_s) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_s}{z_0}} = \frac{2,66}{2,5 \cdot \ln \left( \frac{66}{0,05} \right)} = 0,148$$

$L(z_s)$  este lungimea scării integrale a turbulenței (subcapitolul 5.1, paragraful (1))

$$L(z_s) = \begin{cases} L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha, & \text{pentru } z_{\min} \leq z_s \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \\ L(z_{\min}), & \text{pentru } z < z_{\min} \end{cases}$$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,05) = 0,52$$

$$z_t = 200 \text{ m} - \text{înălțimea de referință}$$

$$L_t = 300$$

$$z_{\min} = 2 \text{ m (Tabelul 2.1)}$$

$$z_{\min} < z_s = 66 \text{ m} < z_{\max}$$

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha = 300 \cdot \left( \frac{66}{200} \right)^{0,52} = 168,6 \text{ m}$$

Factorul de răspuns nerezonant se determină cu relația (5.3):

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}}$$

$$b = 7 \text{ m} - \text{diametrul coșului}$$

$h = 110 \text{ m}$  – înălțimea coșului

și are valoarea

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{7 + 110}{168,6} \right)^{0,63}} = 0,583$$

Factorul de răspuns rezonant se determină cu relația (5.6):

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

unde:

$\delta$  este decrementul logaritmic al amortizării evaluat conform Anexei C, pct. C.5;

$S_L$  este densitatea spectrală de putere unilaterală și normalizată, evaluată la înălțimea  $z_s$  pentru frecvența  $n_1$ ;

$R_h, R_b$  sunt funcțiile de admitanță aerodinamică date de relațiile (5.7) și (5.8).

Frecvența adimensională are valoarea:

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{0,594 \cdot 168,6}{38,41} = 2,607$$

Densitatea spectrală de putere unilaterală și normalizată, evaluată la înălțimea  $z_s$  pentru frecvența  $n_{1,x}$ , este dată de relația (5.2) și are valoarea:

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x}))^{5/3}} = \frac{6,8 \cdot 2,607}{(1 + 10,2 \cdot 2,607)^{5/3}} = 0,07$$

Din Tabelul C.2 se ia valoarea decrementului logaritmic al amortizării structurale, care pentru turnuri și coșuri de beton armat are valoarea  $\delta_s = 0,03$ . Decrementul logaritmic al amortizării aerodinamice are valoarea  $\delta_a = 0,017$  și decrementul logaritmic al amortizării produse de dispozitive speciale de amortizare  $\delta_d = 0$  (nu este cazul). Astfel, decrementul logaritmic al amortizării pentru modul fundamental de vibrație este:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0,03 + 0,017 + 0 = 0,047$$

Funcțiile de admitanță aerodinamică  $R_h$  și  $R_b$ , pentru vectorul propriu fundamental, ce se determină cu relațiile (5.7) și (5.8) au valorile:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h \cdot n_1}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 110 \cdot 0,594}{38,41} = 7,82$$

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{7,82} - \frac{1}{2 \cdot 7,82^2} (1 - e^{-2 \cdot 7,82}) = 0,120$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b \cdot n_1}{v_m(z_s)} = \frac{4,6 \cdot 7 \cdot 0,594}{38,41} = 0,498$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{0,498} - \frac{1}{2 \cdot 0,498^2} (1 - e^{-2 \cdot 0,498}) = 0,737$$

Factorul de răspuns rezonant are valoarea:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{3,14^2}{2 \cdot 0,047} \cdot 0,07 \cdot 0,120 \cdot 0,737 = 0,651$$

Frecvența medie a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent se determină cu relația (5.5):

$$\nu = n_1 \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$$

și are valoarea:

$$\nu = 0,594 \cdot \sqrt{\frac{0,651}{0,583 + 0,651}} = 0,431 \text{ Hz}$$

Factorul de vârf pentru determinarea răspunsului extrem maxim al structurii se determină cu relația (5.4):

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \geq 3$$

unde

- $\nu$  este frecvența medie a vibrațiilor pe direcția și sub acțiunea vântului turbulent;
- $T$  este durata de mediere a vitezei de referință a vântului,  $T = 600$  s (aceeași ca pentru viteza medie a vântului);
- $\gamma = 0,5772$ , este constanta lui Euler.

Valoarea factorului de vârf pentru determinarea răspunsului extrem maxim al structurii este:

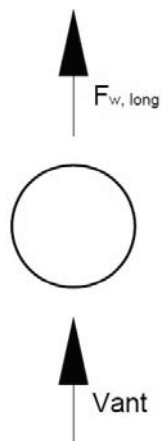
$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,431 \cdot 600)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,431 \cdot 600)}} = 3,507$$

Coeficientul de răspuns dinamic al coșului are valoarea:

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,507 \cdot 0,148 \cdot \sqrt{0,583 + 0,651}}{1 + 7 \cdot 0,148} = 1,057$$



### F.6.5 Forța globală pe direcția vântului



Conform subcapitolului 3.3, forța globală pe direcția vântului  $F_w$ , ce acționează pe structură sau pe un element structural având aria de referință  $A_{ref}$  orientată perpendicular pe direcția vântului, se determină cu relația generală:

$$F_w = \gamma_{lw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

unde

$q_p(z_e)$  este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota  $z_e$ ;

$c_d$  este coeficientul de răspuns dinamic al construcției;

$c_f$  este coeficientul aerodinamic de forță pentru clădire / structură sau element structural, ce include și efectele frecării;

$A_{ref}$  este aria de referință, orientată perpendicular pe direcția vântului, pentru clădiri / structuri;

$\gamma_{lw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

Valoarea coeficientul aerodinamic de forță pentru coșul de fum este

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,02 \cdot 0,71 = 0,727$$

și aria de referință este

$$A_{ref} = 80 \cdot 7 + \frac{(7 + 7,80) \cdot 30}{2} = 782 \text{ m}^2$$

Forța globală pe direcția vântului  $F_w$ , ce acționează pe coșul de fum având aria de referință  $A_{ref}$  orientată perpendicular pe direcția vântului este:

$$F_w = \gamma_{lw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1,15 \cdot 1,057 \cdot 0,727 \cdot 1,892 \cdot 782 = 1307,93 \text{ KN}$$

### F.6.6 Viteza critică de desprindere a vârtejurilor

Conform prevederilor de la subcapitolul 6.6, efectul desprinderii vârtejurilor va fi considerat dacă este îndeplinită condiția:

$$v_{crit,i} \leq 1,25 \cdot v_m$$

unde:

$v_{crit,i}$  este viteza critică a vântului pentru modul  $i$  de vibrație;

$v_m$  este viteza medie a vântului în secțiunea în care se produce desprinderea vârtejurilor.

Viteza critică a vântului pentru modul  $i$  de vibrație se determină cu relația (6.2):

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}$$

unde

$b$  este lățimea secțiunii transversale în care se produce desprinderea rezonantă a vârtejurilor; pentru cilindri circulari lățimea de referință este diametrul exterior;

$n_{i,y}$  este frecvența proprie a modului  $i$  de vibrație pe direcția transversală vântului;

$St$  este numărul lui Strouhal definit în subcapitolul 6.3.2; pentru cilindri circulari are valoarea  $St=0,18$ .

Astfel, viteza critică a vântului pentru modul 1 de vibrație este:

$$v_{crit,1} = \frac{b \cdot n_{1,y}}{St} = \frac{7 \cdot 0,594}{0,18} = 23,1 \text{ m/s}$$

Valoarea vitezei medii a vântului la vârful coșului de fum este:

$$v_m(z=110\text{m}) = c_r(z=110\text{m}) \cdot v_b$$

$$v_b = 28,28 \text{ m/s}$$

$$k_r(z_0) = 0,189 \text{ (teren categoria II)}$$

$$c_r(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,189 \cdot \ln\left(\frac{110}{0,05}\right) = 1,454$$

$$v_m(z=110\text{m}) = c_r(z) \cdot v_b = 1,454 \cdot 28,28 = 41,14 \text{ m/s}$$

$v_{crit,1} = 23,1 \text{ m/s} < 1,25 \cdot v_m(z=110\text{m}) = 51,43 \text{ m/s}$ ; se va considera efectul desprinderii vârtejurilor alternantF.

#### F.6.7 Valoarea de vârf a deplasării pe direcția transversală vântului

Deplasarea maximă produsă pe direcție transversală vântului,  $y_{F,\max}$  se calculează conform subcapitolului 6.5 cu relația (6.7):

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat}$$

unde:

$St$  este numărul lui Strouhal, Tabelul 6.1;

$Sc$  este numărul lui Scruton, relația (6.4);

$K_w$  este factorul lungimii de corelație,  $L_j$ ;

$K$  este factorul formei modale de vibrație;

$c_{lat}$  este coeficientul aerodinamic de forță pe direcție transversală vântului;

$b$  este dimensiunea secțiunii transversale, evaluată în secțiunea în care se produce fenomenul critic de desprindere a vârtejurilor rezonante

Numărul lui Scruton determinat cu relația (6.4) are valoarea:

$$Sc = \frac{2 \cdot m_{le} \cdot \delta_s}{\rho \cdot b^2} = \frac{2 \cdot 11935,84 \cdot 0,03}{1,25 \cdot 7^2} = 11,69$$

Numărul lui Reynolds corespunzător vitezei critice a vântului este dat de relația (6.5)

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu}$$

unde

$b$  este diametrul exterior al cilindrului circular;  
 $\nu$  este vâscozitatea cinematică a aerului ( $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ );  
 $v_{crit,i}$  este viteza critică a vântului  
 și are valoarea:

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu} = \frac{7 \cdot 23,1}{15 \cdot 10^{-6}} = 10,78 \cdot 10^6$$

Lungimea de corelație,  $L_j$  se determină în funcție de amplitudinea vibrației  $y_F(s=H)$ , prin iterații, folosind Tabelul 6.4. Astfel, dacă se presupune că

$$\frac{y_F}{b} < 0,1 \Rightarrow \frac{L_j}{b} = 6 \Rightarrow L_j = 6 \cdot 7 = 42 \text{ m}$$

Rezultă că viteza medie a vântului în centrul lungimii efective de corelație este:

$$v_{m,L_j} = v_m \left( z = 110 - \frac{42}{2} \right) = v_m(z = 89\text{m}) = 40 \text{ m/s}$$

Raportul

$$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,L_j}} = \frac{23,1}{40,0} = 0,58 < 0,83 \Rightarrow \text{din Tabelul 6.3 } c_{lat} = c_{lat,0}$$

Valorile  $c_{lat,0}$  ale coeficientului aerodinamic de forță pe direcție transversală vântului sunt date în Figura 6.2 și în Tabelul 6.2, în funcție de numărul Reynolds,  $Re$ , și pentru valori  $\frac{v_{crit,i}}{v_{m,L_j}} \leq 0,83$  rezultă  $c_{lat,0} = 0,30$ . Alternativ, valorile  $c_{lat,0}$  pentru cilindrii circulari se pot determina cu relațiile:

$$c_{lat,0} = \begin{cases} 0,7 & , 10^4 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5 \\ 13,05 - 2,25 \cdot \log_{10}(Re) & , 3 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5 \\ 0,2 & , 5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6 \\ -2,02 + 0,33 \cdot \log_{10}(Re) & , 5 \cdot 10^6 < Re < 10^7 \\ 0,3 & , Re \geq 10^7 \end{cases}$$

Factorul lungimii de corelație se determină cu relația dată în Tabelul 6.5:

$$K_w = 3 \cdot \frac{L_j/b}{\lambda} \cdot \left[ 1 - \frac{L_j/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \left( \frac{L_j/b}{\lambda} \right)^2 \right]$$

$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{110}{7} = 15,71$$

$$K_w = 3 \cdot \frac{6}{15,71} \cdot \left[ 1 - \frac{6}{15,71} + \frac{1}{3} \left( \frac{6}{15,71} \right)^2 \right] = 0,764$$

Se recomandă ca pentru calcul valoarea factorului lungimii de corelație să fie limitată superior la 0,6; astfel  $K_w=0,6$ .

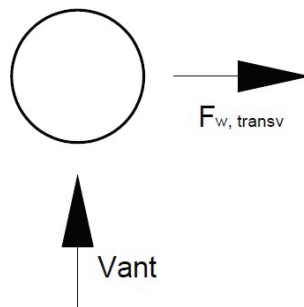
Conform Tabelului 6.5 factorul formei modale de vibrație  $K$  pentru structuri în consolă este 0,13.

În final, deplasarea maximă produsă pe direcție transversală vântului,  $y_{F,max}$  este:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} = \frac{1}{0,18^2} \cdot \frac{1}{11,69} \cdot 0,13 \cdot 0,6 \cdot 0,3 = 0,062$$

$$y_{F,max} = 0,062 \cdot 7 = 0,434 \text{ m}$$

#### F.6.8 Forța statică echivalentă transversală



Conform subcapitolului 6.4, efectul vibrațiilor produse de desprinderea vârtejurilor se va evalua folosind forța de inerție pe unitate de lungime,  $F_w(s)$  care acționează perpendicular pe direcția vântului la cota  $s$  a structurii (măsurată de la baza acesteia) și este dată de relația (6.6):

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,\max}$$

unde

- $m(s)$  este masa structurii pe unitatea de lungime [kg/m];
- $n_{i,y}$  este frecvența proprie de vibrație a structurii într-un plan perpendicular pe direcția vântului;
- $\Phi_{i,y}(s)$  este forma proprie de vibrație a structurii într-un plan perpendicular pe direcția vântului, normalizată la valoarea 1 acolo unde deplasarea este maximă;
- $y_{F,\max}$  este deplasarea maximă a structurii la cota  $s$  (la care  $\Phi_{i,y}(s) = 1$ ),

Forța de inerție pe unitate de lungime,  $F_w(s)$  care acționează perpendicular pe direcția vântului la cota  $s=H$  a structurii (măsurată de la baza acesteia)

$$F_w(s=H) = 11935,84 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,594)^2 \cdot 1 \cdot 0,434 = 72107 \text{ N/m} \approx 72,11 \text{ kN/m}$$

În Tabelul F.6.1 sunt date valorile forțelor de inerție pe unitate de lungime,  $F_w(s)$  și valorile  $F$  ale rezultatelor acestor forțe distribuite pe fiecare tronson de 10 m al coșului de fum.

Tabelul F.6.1 Valorile forțelor de inerție pe unitate de lungime  $F_w(s)$  și valorile  $F$  ale rezultatelor

$s$ , m	$F_w(s)$ , kN/m	$F$ , kN
110	72,11	658,36
100	59,56	539,03
90	48,24	431,97
80	38,15	336,79
70	29,21	253,49
60	21,49	182,07
50	14,92	122,23
40	9,52	74,31
30	5,34	38,58
20	2,38	14,77
10	0,58	2,89
0	0,00	0,00

Forța totală din vânt pe direcție transversală se obține ca suma a rezultatelor:

$$F_{w, \text{transv}} = \Sigma(F) = 2654,5 \text{ kN.}$$

## F.7 EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI ASUPRA UNEI COPERTINE

### F.7.1 Informații generale

- *Caracteristici geometrice:* copertina are o formă pătrată în plan având dimensiunile laturilor de 48 m (Figura F.7.1) și este amplasată la o înălțime de 10,77 m; panta copertinei este  $\alpha=0^\circ$ ;
- *Clasa de importanță-expunere la acțiunea vântului:* III (construcții de tip curent, care nu aparțin celorlalte clase); factor de importanță-expunere  $\gamma_{fw}=1,0$ ;
- *Condiții de amplasament:* copertina este amplasată în municipiul Timișoara, categoria de teren III (Zone acoperite uniform cu vegetație, sau cu clădiri, sau cu obstacole izolate aflate la distanțe de cel mult de 20 de ori înălțimea obstacolului –  $z_0=0,3\text{m}$ ,  $z_{min}=5\text{m}$  – din Tabelul 2.1).

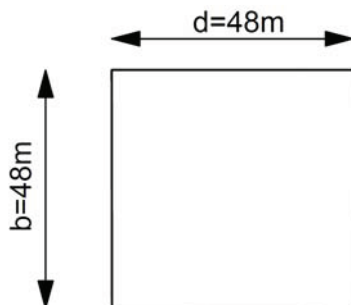


Figura F.7.1. Caracteristicile geometrice ale copertinei

### F.7.2 Valori de referință ale vitezei și ale presiunii dinamice a vântului pe amplasament

Conform hărții de zonare a valorilor de referință ale presiunii dinamice a vântului având  $IMR = 50$  ani (Figura 2.1) valoarea de referință a presiunii dinamice a vântului pentru municipiul Timișoara este  $q_b = 0,6 \text{ kPa}$ .

Conform punctului 4.3.(8),  $z_e=h=10,77 \text{ m}$ .

Valoarea medie a presiunii dinamice a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină după cum urmează (folosind relațiile 2.7 și 2.9 și Tabelul 2.2):

$$k_r^2(z_0) = 0,046 \text{ (Tabelul 2.2)}$$

$$c_r^2(z_e) = k_r^2(z_0) \cdot \left( \ln \frac{z_e}{z_0} \right)^2$$

$$c_r^2(z_e) = 0,046 \cdot \left( \ln \frac{10,77}{0,3} \right)^2 = 0,59$$

$$q_m(z_e) = c_r^2(z_e) \cdot q_b$$

$$q_m(z_e) = 0,59 \cdot 0,6 = 0,354 \text{ kPa}$$

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului la înălțimea  $z_e$  se determină după cum urmează (folosind relațiile 2.11, 2.15 și 2.16 și Tabelul 2.3):

$$\sqrt{\beta} = 2,35 \text{ (Tabel 2.3)}$$

$$I_v(z_e) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \ln \frac{z_e}{z_0}} = \frac{2,35}{2,5 \cdot \ln \left( \frac{10,77}{0,3} \right)} = 0,263$$

$$c_{pq}(z_e) = 1 + 2g \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot I_v(z_e) = 1 + 7 \cdot 0,263 = 2,84$$

$$q_p(z_e) = c_{pq}(z_e) \cdot q_m(z_e) = 2,84 \cdot 0,354 = 1,005 \text{ kPa}$$

### F.7.3 Forța globală din vânt ce acționează asupra copertinei

Forța globală pe direcția vântului,  $F_w$  ce acționează asupra copertinei se determină cu relația (3.3):

$$F_w = \gamma_{lw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

unde coeficientul de răspuns dinamic al copertinei este  $c_d = 0,85$  (Tabel 5.2).

Coeficientul aerodinamic global de forță este folosit pentru a determina forța rezultantă (Tabelul 4.6 pentru  $\alpha = 0^\circ$ ):

$$c_f = \begin{cases} +0,2 & \text{pentru orice } \varphi \\ -0,5 & \text{pentru } \varphi = 0 \\ -1,3 & \text{pentru } \varphi = 1 \end{cases}$$

În cazul copertinelor (sau a altor elemente ce pot fi asimilate acestora, de ex. panouri solare) aria de referință  $A_{ref}$  este suprafața totală a acestora pe care se manifestă efecte de presiune/sucțiune generate de acțiunea vântului. Astfel:

$$A_{ref} = 48 \cdot 48 = 2304 \text{ m}^2$$

- Forța descendentă

$$F_w = 1 \cdot 0,85 \cdot 0,2 \cdot 1,005 \cdot 2304 = 393,64 \text{ kN}$$

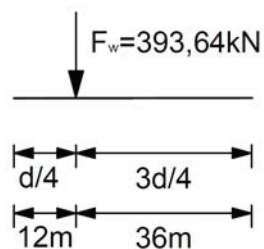
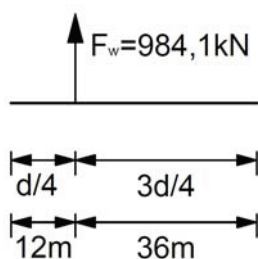


Figura F.7.2. Forța descendentă globală din vânt ce acționează asupra copertinei

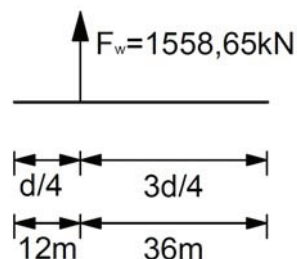
• Forța ascendentă

$$F_w = 1 \cdot 0,85 \cdot (-0,5) \cdot 1,005 \cdot 2304 = -984,1 \text{ kN} \quad \text{pentru } \varphi = 0$$

$$F_w = 1 \cdot 0,85 \cdot (-1,3) \cdot 1,005 \cdot 2304 = -2558,65 \text{ kN} \quad \text{pentru } \varphi = 1$$



$\varphi=0$



$\varphi=1$

Figura F.7.3. Forța ascendentă globală din vânt ce acționează asupra copertinei

*F.7.4 Presiunea totală ce acționează pe suprafața copertinei*

Presiunea totală ce acționează pe suprafața copertinei se determină cu următoarea relație:

$$w_{net} = \gamma_{Iw} \cdot c_{p,net} \cdot q_p(z_e)$$

Coeficienții de presiune totală (rezultantă) pe suprafața copertinei sunt (Tabelul 4.6 pentru  $\alpha=0^\circ$ ):

$$c_{p,net} = \begin{cases} 0,5 & \text{zona A} \\ 1,8 & \text{zona B} \\ 1,1 & \text{zona C} \end{cases} \quad \text{pentru orice } \varphi$$

$$c_{p,net} = \begin{cases} -0,6 & \text{zona A} \\ -1,3 & \text{zona B} \\ -1,4 & \text{zona C} \end{cases} \quad \text{pentru } \varphi = 0$$

$$c_{p,net} = \begin{cases} -1,5 & \text{zona A} \\ -1,8 & \text{zona B} \\ -2,2 & \text{zona C} \end{cases} \quad \text{pentru } \varphi = 1$$



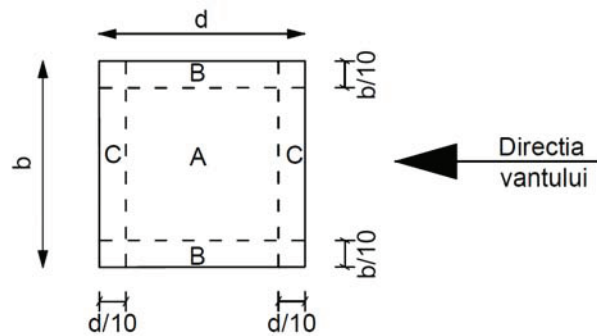


Figura F.7.4. Distribuția coeficienților aerodinamici de presiune totală pe suprafața copertinei

Coeficienții de presiune totală (rezultantă) sunt folosiți pentru a determina presiunea locală maximă pentru toate direcțiile vântului și se utilizează pentru proiectarea elementelor acoperișului și a dispozitivelor de fixare a acestuia.

- presiune descendentă

$$w_{net} = \begin{cases} 1 \cdot 0,5 \cdot 1,005 = 0,503 \text{ kN/m}^2 & \text{zona A} \\ 1 \cdot 1,8 \cdot 1,005 = 1,809 \text{ kN/m}^2 & \text{zona B} \\ 1 \cdot 1,1 \cdot 1,005 = 1,106 \text{ kN/m}^2 & \text{zona C} \end{cases}$$

- presiune ascendentă

$$\begin{aligned} &\circ \text{ pentru } \varphi=0 \\ w_{net} &= \begin{cases} 1 \cdot (-0,6) \cdot 1,005 = -0,603 \text{ kN/m}^2 & \text{zona A} \\ 1 \cdot (-1,3) \cdot 1,005 = -1,307 \text{ kN/m}^2 & \text{zona B} \\ 1 \cdot (-1,4) \cdot 1,005 = -1,407 \text{ kN/m}^2 & \text{zona C} \end{cases} \\ &\circ \text{ pentru } \varphi=1 \\ w_{net} &= \begin{cases} 1 \cdot (-1,5) \cdot 1,005 = -1,508 \text{ kN/m}^2 & \text{zona A} \\ 1 \cdot (-1,8) \cdot 1,005 = -1,809 \text{ kN/m}^2 & \text{zona B} \\ 1 \cdot (-2,2) \cdot 1,005 = -2,211 \text{ kN/m}^2 & \text{zona C} \end{cases} \end{aligned}$$

### F.7.5 Forța de frecare

Forța de frecare se evaluează conform relației (3.7) din subcapitolul 3.3:

$$F_{fr} = \gamma_{lw} \cdot c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

unde

$c_{fr}$  este coeficientul de frecare;  
 $A_{fr}$  este aria suprafeței exterioare orientată paralel cu direcția vântului;

$\gamma_{Iw}$  este factorul de importanță – expunere la acțiunea vântului.

Coeficienții de frecare  $c_{fr}$  pentru suprafețele pereților și acoperișurilor sunt prezentați în Tabelul 4.10 din subcapitolul 4.5:

$c_{fr} = 0,02$  pentru acoperișul halei (suprafață rugoasă).

$$A_{fr} = 2 \cdot (48 \cdot 48) = 2 \cdot 2304 m^2$$

$$F_{fr} = 1 \cdot 0,02 \cdot 1,005 \cdot (2 \cdot 2304) = 92,63 kN$$

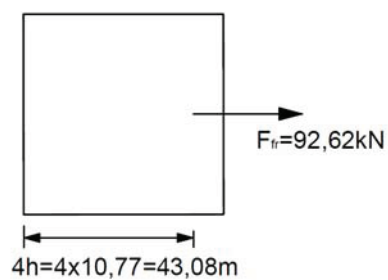


Figura F.7.5. Forța de frecare ce acționează asupra copertinei

## F.8. EVALUAREA ACȚIUNII VÂNTULUI PENTRU UN POD

### F.8.1 Informatii generale

Acest exemplu de calcul are drept scop ilustrarea modalității de determinare a vitezei, presiunii dinamice a vântului și acțiunii exercitate de vânt pe suprastructura unui pod de șosea cu secțiune compusă oțel-beton, pentru un amplasament dat.

Podul este amplasat în zona orașului București, pe un drum național. Podul are o deschidere de 45,00m, din punct de vedere al schemei statice fiind realizat cu grinzi simplu rezemate. Suprastructura este realizată în soluția structură compusă, cu două grinzi metalice cu inimă plină care conlucrează în sens transversal printr-o placă din beton armat dispusă la partea superioară, respectiv prin intermediul antretoazelor dispuse la distanța de 5,00m în lungul deschiderii. Distanța în sens transversal între grinziile metalice este de 6,00m. Conexiunea între talpa superioară a grinzilor principale metalice și placa din beton armat se realizează prin intermediul conectorilor flexibili de tip gujon. Infrastructura este alcătuită din două culee de tip masiv cu fundații directe. Racordarea podului cu terasamentele de la capete se realizează prin intermediul unor sferturi de con. Suprastructura susține o parte carosabilă cu lățimea de 7,80m și două trotuare cu lățimea de 1,50m fiecare. Lățimea totală a suprastructurii este de 11,30m. Pe suprastructură sunt prevăzute parapete pietonale și parapete direcționale de tip greu. Alcătuirea podului și principalele dimensiuni și cote sunt prezentate în Figurile F.8.1, F.8.2 și F.8.3.

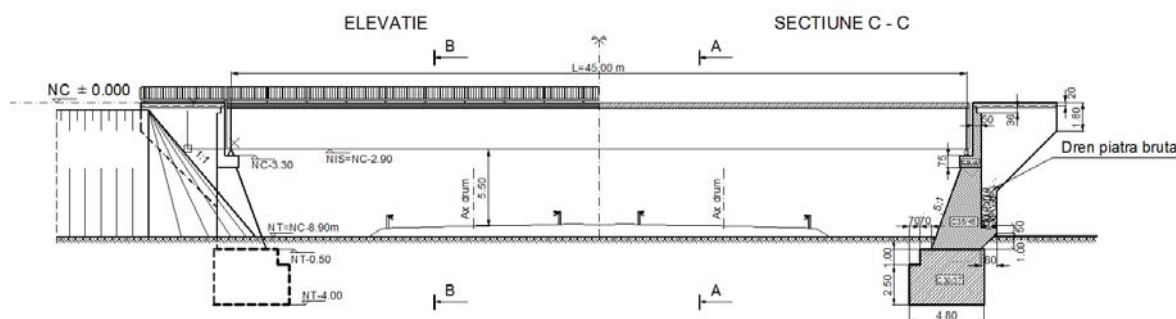


Figura F.8.1 Vedere laterală a podului

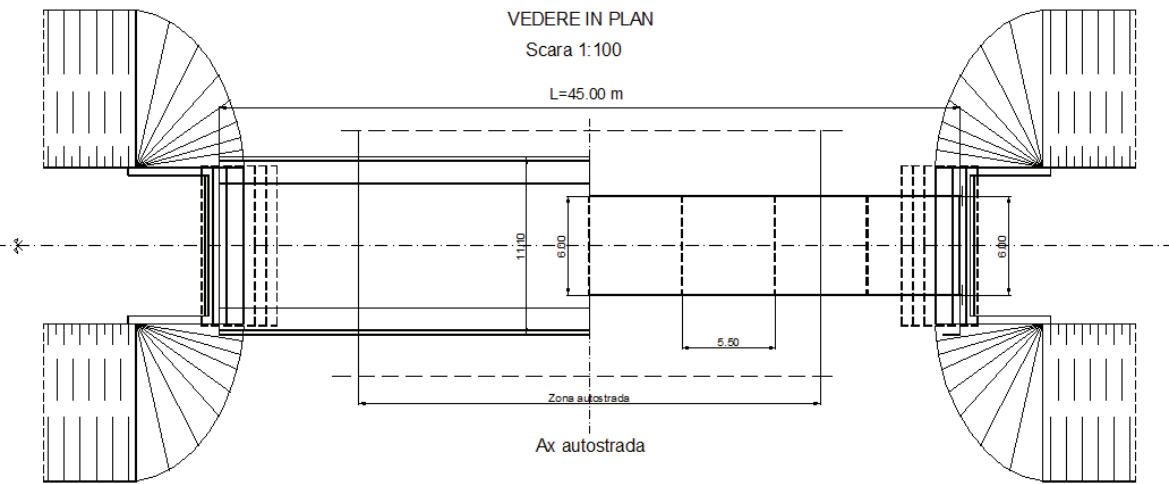


Figura F.8.2 Vedere în plan a podului

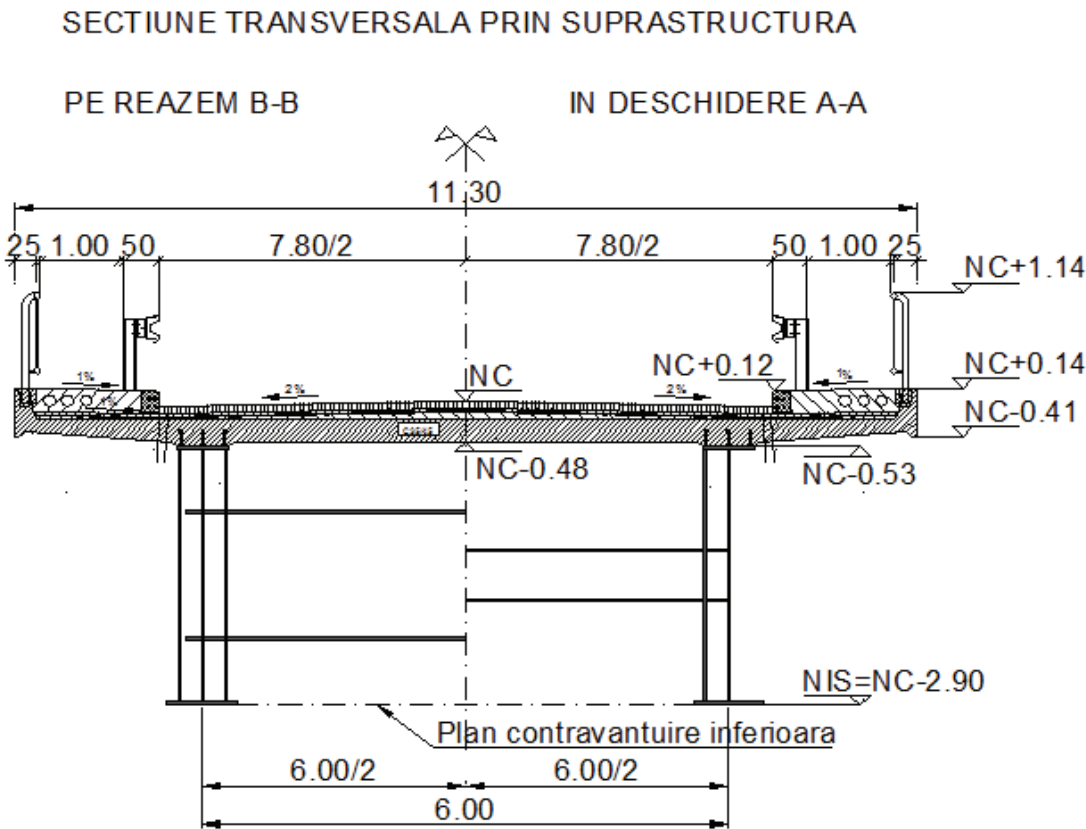


Figura F.8.3 Secțiune transversală prin suprastructura podului

### F.8.2 Evaluarea vitezei și presiunii dinamice a vântului în amplasament

Conform precizărilor din Capitolul 2 și relației (2.1), presiunea dinamică a vântului în amplasamentul podului considerat se determină astfel:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2$$

Conform hărții de zonare a valorilor de referință a presiunii dinamice a vântului prezentată în Figura 2.1 și conform tabelului A.1 din anexa A, valoarea presiunii dinamice pentru municipiul București este:

$$q_b = 0,5 \text{ kPa} = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Considerând că densitatea aerului are valoarea de  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ , rezultă valoarea de referință a vitezei vântului pentru amplasamentul considerat:

$$v_b = \sqrt{\frac{2q_b}{\rho}} = \sqrt{\frac{1000}{1,25}} = 28,3 \text{ m/s}$$

### F.8.3 Evaluarea acțiunii vântului pe suprastructura podului

Pentru evaluarea acțiunii vântului pe suprastructura podului se vor avea în vedere prevederile din Anexa D.

În cazul podurilor, în calculul simplificat, acțiunea vântului se consideră printr-un ansamblu de forțe orizontale, respectiv verticale care se manifestă pe structură. În funcție de unghiul de atac al presiunii vântului în raport cu axa longitudinală a podului, pe suprastructură sunt generate componente de forță după toate cele trei direcții ortogonale în spațiu: pe direcție transversală podului (direcția x), pe direcție longitudinală podului (direcția y) și pe direcție verticală podului (direcția z). Direcțiile x, y și z au semnificațiile din Figura D.2.

În mod uzual, în proiectare se consideră doar acțiunea pe direcție orizontală transversală podului, celelalte componente având efecte nesemnificative prin comparație cu cele produse de acțiunile permanente și de cele utile care se consideră în calcul. Prin urmare în acest exemplu este analizată acțiunea orizontală transversală a vântului asupra podului considerat.

Acțiunea orizontală transversală a vântului asupra suprastructurii podului se manifestă prin două efecte:

- a) *efectul direct* care produce încovoierea în plan orizontal, a componentelor suprastructurii;
- b) *efectul indirect* care acționează de aceeași manieră cu acțiunile pe direcție verticală și produce încovoierea în plan vertical a componentelor suprastructurii.

În cazul podurilor, combinația cea mai defavorabilă pentru considerarea acțiunii vântului corespunde situației când structura este încărcată cu convoaiele de calcul.

Schema de calcul a forțelor produse de acțiunea directă a vântului este cea din Figura F.8.4. Semnificația notațiilor din Figura F.8.4 este următoarea:

- $q_{w,d}$  este presiunea dinamică a vântului din efectul direct;  
 $q_{w,ind}$  este presiunea dinamică a vântului din efectul indirect;  
 $F_1, h_1$  sunt rezultanta presiunii vântului pe înălțimea expusă asociată vehiculelor de pe pod, respectiv brațul de pârghie al rezulantei în raport cu planul contravântuirii inferioare;  
 $F_2, h_2$  sunt rezultanta presiunii vântului pe înălțimea căii, respectiv brațul de pârghie al rezulantei în raport cu planul contravântuirii inferioare;  
 $F_3, h_3$  sunt rezultanta presiunii vântului pe înălțimea grinzilor principale metalice, respectiv brațul de pârghie al rezulantei în raport cu planul contravântuirii inferioare.

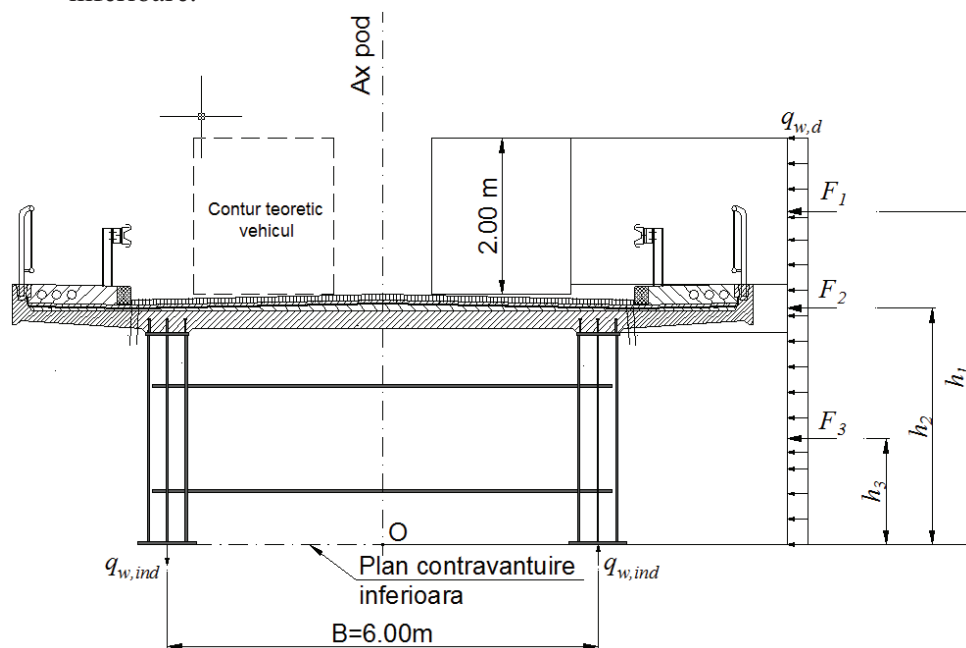


Figura F.8.4. Schema de calcul a forțelor produse de acțiunea directă a vântului

Rezultanta presiunii vântului pe suprastructura podului se poate determina cu ajutorul relației (D.2) astfel:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x}$$

Pentru determinarea valorii ariei de referință  $A_{ref,x}$  se utilizează mărimile geometrice prezentate în Figura F.8.5. Conform acestei figuri, pentru cazul considerat rezultă următoarele valori:

$$d_{tot} = 4,90 \text{ m}$$

$$b = 11,30 \text{ m}$$

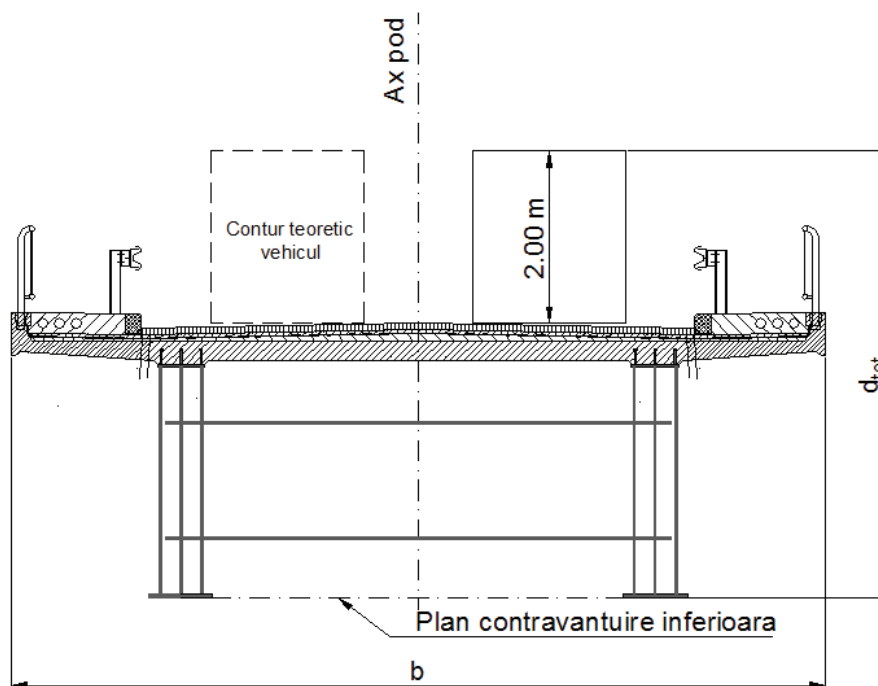


Figura F.8.5 Schema de calcul pentru stabilirea mărimilor  $b$  și  $d_{tot}$

Stabilirea valorii factorului de încărcare  $C$  se face utilizând Tabelul D.2. Având în vedere faptul că înălțimea de referință  $z_e \leq 10\text{m}$ , rezultă:

$$b/d_{tot} = 2,30 \Rightarrow C = 5,10$$

Ariile de referință au valorile:

$$A_{\text{ref},x1} = (2,9 + 2 - 2,37 - 0,64) \cdot L = 1,86 \cdot 45 = 83,7 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ref},x2} = 0,55 \cdot L = 0,55 \cdot 45 = 24,75 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ref},x3} = 2,37 \cdot L = 2,37 \cdot 45 = 106,65 \text{ m}^2$$

Rezultă imediat valorile celor trei rezulante  $F_1$ ,  $F_2$  și  $F_3$  care se manifestă pe suprafețele expuse teoretice determinate de înălțimea vehiculelor de pe pod, de înălțimea căii și de înălțimea grinzilor principale. Componentele forțelor  $F_1$ ,  $F_2$  și  $F_3$  rezultă cu valorile:

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{\text{ref},x1} = 0,5 \cdot 5,1 \cdot 83,7 = 213,44 \text{ kN}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{\text{ref},x2} = 0,5 \cdot 5,1 \cdot 24,75 = 63,11 \text{ kN}$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{\text{ref},x3} = 0,5 \cdot 5,1 \cdot 106,65 = 271,96 \text{ kN}$$

Valoarea presiunii dinamice din efectul direct al vântului are valoarea:

$$q_{w,d} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C = q_b \cdot C = 0,5 \cdot 5,1 = 2,55 \text{ kN/m}^2$$

Pentru determinarea valorii presiunii dinamice din efectul indirect al vântului se reduc forțele în raport cu punctul O (Figura F.8.4). Rezultă:

$$\begin{aligned}
 q_{w,ind} &= \frac{F_1 \cdot h_1 + F_2 \cdot h_2 + F_3 \cdot h_3}{B} = \\
 &= \frac{213,44 \cdot \frac{2,37}{2} + 63,11 \cdot (2,37 + \frac{0,67}{2}) + 271,96 \cdot (2,37 + 0,67 + \frac{1,86}{2})}{6} = \\
 &= \frac{252,93 + 170,71 + 1333,15}{6} = 292,8 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$