

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

Siguranța structurilor înalte / flexibile la acțiuni dinamice din cutremur și vânt

Doctorand,
Ing. Valentin Gerald Rădăceanu

Conducător de doctorat,
Prof. Univ. Dr. Ing. Dan Lungu

București, 2018

CUPRINS

INTRODUCERE	- 3 -
1.GENERALITĂȚI.....	- 4 -
1.1. Ingineria vântului la început de secol XX.....	- 4 -
1.2. Ingineria seismică în secolul XX	- 6 -
1.3. Stadiul actual al cercetării cu privire la comportarea structurilor înalte și flexibile la acțiuni dinamice	- 7 -
2.STRUCTURI TIP CONSOLĂ VERTICALĂ CU SECȚIUNE POLIGONALĂ SAU CIRCULARĂ – TIP PILONI DE ILUMINAT SAU CU ANTENE TELECOM	- 9 -
2.1. Domenii de utilizare, importanță, fabricare	- 9 -
2.2. Proiectarea pilonilor metalici de iluminat și Studiu de caz în incinta Aeroportului Internațional Iași.....	- 12 -
3.ANALIZA DATELOR METEOROLOGICE PRIVIND VITEZA VÂNTULUI LA AEROPORTUL IAȘI	- 14 -
3.1. Baze de date meteorologice	- 14 -
3.2. Analiza statistică a vitezei vântului și teoria statistică a valorilor extreme.....	- 15 -
3.3. Studiu de caz. Analiza valorilor vitezei vântului, înregistrate în cadrul Stației Internaționale Meteo – Aeroport Iași (1976 – 2015)	- 17 -
4.EVALUAREA ACȚIUNILOR DINAMICE DIN VÂNT ȘI CUTREMUR ASUPRA STRUCTURILOR ÎNALTE/FLEXIBILE.....	- 21 -
4.1. Acțiunea vântului	- 21 -
4.2. Coduri pentru proiectarea la vânt a construcțiilor.....	- 24 -
4.3. Acțiunea seismică pentru proiectare	- 28 -
4.4. Studiu de caz. Acțiunea dinamică a vântului și cutremurului asupra pilonilor de iluminat din incinta Aeroportului Internațional Iași.....	- 29 -
5.RĂSPUNSUL DINAMIC LA VÂNT ȘI CUTREMUR AL STRUCTURILOR ÎNALTE/FLEXIBILE	- 31 -
5.1. Răspunsul dinamic la acțiunea vântului.....	- 31 -
5.2. Metodele factorului generalizat de răspuns la rafală (3D GRF) și factorului generalizat de efect la rafală (3D GEF)	- 34 -
5.3. Răspunsul structurilor pe direcție transversală acțiunii vântului. Fenomenele de desprindere a vârtejurilor și de galopare	- 35 -
5.4. Răspunsul la acțiunea seismică	- 39 -
6.STUDIUL DE CAZ: RĂSPUNSUL DINAMIC LA ACȚIUNI DIN VÂNT ȘI CUTREMUR AL PILONILOR DE ILUMINAT DIN INCINTA AEROPORTULUI IAȘI	- 40 -
6.1. Răspunsul pilonilor pe direcția de acțiune a vântului	- 40 -
6.2. Răspunsul pilonilor pe direcția transversală acțiunii vântului	- 43 -
6.3. Răspunsul pilonului la acțiunea seismică.....	- 46 -
Concluzii	- 46 -
Contribuții personale.....	- 49 -
Bibliografie selectivă	- 50 -

INTRODUCERE

Lucrarea de față, axată pe două direcții complementare de cercetare, analiza statistică a bazelor de date privind viteza înregistrată a vântului și răspunsul structurilor înalte și flexibile sub acțiuni dinamice cum sunt cele provenite din vânt și cutremur, se dorește a fi o punte între activitatea de cercetare și cele de proiectare, producție efectivă și execuție a lucrărilor de construcții. Obiectivul lucrării, structurată în șase capitole, este abordarea unei părți cât mai cuprinzătoare din problematica legată de structurile tip consolă flexibilă verticală, cum sunt pilonii înalți de iluminat sau telecom, începând de la analiza bazelor de date privind viteza vântului în amplasamentul acestora, continuând cu aplicarea comparativă a normelor tehnice privind acțiunea vântului și seismului în cadrul proiectării, cu analiza fenomenelor aeroelastice și a altor probleme conexe acestora, cum ar fi verificarea la oboseală și finalizând cu execuția fundațiilor, montarea pilonilor, sau urmărirea comportării în timp.

În cadrul primului capitol sunt prezentate principalele componente teoretice ce au stat la baza modelării fenomenelor legate de acțiunile dinamice naturale (vânt sau seism), pornind de la perioada de început, sfârșitul secolului XIX și începutul secolului XX și până în prezent, alături de prezentarea unor situații concrete, relevante, cu privire la structurile tip consolă, înalte, flexibile și cu mase reduse.

Capitolul 2 prezintă aspecte legate de producția și punerea în operă a pilonilor metalici de iluminat, precum și aspecte din cadrul procesului de proiectare, prezentări comparative ale unor coduri naționale și internaționale de proiectare. Partea teoretică este continuată de un studiu de caz cu privire la activitatea de cercetare, proiectare și execuție a unui pilon metalic de iluminat aeroportuar cu înălțime de 30m, parte a unui grup de piloni din cadrul Aeroportului Internațional Iași, lucrare finalizată în anul 2015 și parte a proiectului „Dezvoltarea și modernizarea Aeroportului Internațional Iași” la care autorul a participat în calitate de inginer șef proiectant, specialitatea structuri. În cadrul unui schimb de experiență, în perioada realizării proiectului, autorul a efectuat o vizită tehnică la o uzina de producție a pilonilor metalici din Polonia, aparținând uneia din cele mai mari companii de profil.

În capitolul 3 se prezintă analiza statistică a bazelor de date privind viteza înregistrată a vântului. Au fost utilizate înregistrări ale vitezei vântului, de la Stația meteo internațională Aeroport Iași, aflată în imediata apropiere a grupei de piloni metalici ce fac obiectul studiului de caz prezentat în capitolele 2 și 6. Autorul a prelucrat în anul 2016 două baze de date privind viteza vântului, prima de la Administrația Națională de Meteorologie, cuprinzând date zilnice din perioada 1961-2015 (55ani) și un al doilea set complex de date, extras din baza de date a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) din perioada 1976-2015 (40 de ani), conținând înregistrări orare cu interval de mediere de 10minute. După verificarea setului de date 1961-2015 în vederea îndeplinirii cerințelor privind corectitudinea și reprezentativitatea datelor, activitatea de cercetare a fost continuată pe datele orare ale bazei din intervalul 1976 – 2015. S-a realizat analiza preliminară a corectitudinii acestei bazei de date, s-au obținut informații statistice aferente populației de date, analiza direcțională, vântul la rafală, izolarea și analiza vârfulor de viteză maximă înregistrate, etc. A fost efectuată analiza statistică a populației bazei de date pe baza modelului Weibull, obținându-se funcția și densitatea de repartiție a modelului cu doi parametri c (de scalare) și k (de formă), comparându-se rezultatele cu cele ale unui studiu mai

vechi din același amplasament (E. Erhan, 1979), aferent unei baze de date din perioada 1951-1975, dar și cu unele similare cunoscute la nivel internațional. Parametrii c și k ai distribuției Weibull pot fi utilizați în cadrul unor verificări la oboseală ale bazelor pilonilor. S-a efectuat și o analiză preliminară a valorilor extreme ale vitezei vântului, valori peste 20m/s, respectiv 25m/s, comparându-se distribuțiile Gumbel maxim, General extreme values, Frechet și Lognormală.

Capitolul 4 arată aspectele teoretice ale evaluării acțiunilor dinamice provenite din vânt (sinoptic sau furtuni) și seism asupra structurilor înalte și flexibile. S-au prezentat comparativ prevederi ale unor coduri de proiectare, precum cele din România, SUA, Canada, Italia, China, sau cel European, continuându-se cu evaluarea comparativă a acțiunii vântului și efectului acestuia asupra pilonului obiect al studiului de caz, descris în cadrul capitolului doi, conform prevederilor codurilor europene, românești și italiene. În cadrul studiului s-au evaluat presiunea de vârf, forța globală provenită din vânt, pe direcția acestuia, incluzând coeficientul de răspuns dinamic c_d . A fost evaluată și aplicată acțiunea seismică conform codului românesc, prin intermediul metodei forțelor seismice statice echivalente și a metodei de calcul modal cu spectre de răspuns. Au fost generate spectrele orizontale și verticale de accelerații, de viteze și de deplasări, specifice amplasamentului și structurii în cauză.

În continuarea părții anterioare, capitolul 5 arată răspunsul structurilor înalte și flexibile sub acțiunile dinamice. Este prezentat răspunsul structural pe direcția de acțiune a vântului, ca și pe direcție transversală acestuia, cu detalierea fenomenelor de desprindere a vârtejurilor și de galopare, precum și răspunsul la acțiunea seismică. Sunt prezentate metoda factorului generalizat de răspuns la rafală (3D GRF), respectiv a factorului generalizat de efect la rafală (3D GEF), generalizări ale conceptului din ingineria vântului al lui A. Davenport din 1961.

Capitolul 6 este dedicat evaluării răspunsului dinamic al pilonului obiect al studiului de caz. Au fost evaluate forțele perpendiculare pe direcția vântului, generate de acțiunea de desprindere a vârtejurilor aferentă primelor două moduri de vibrație și contribuția acestora, au fost identificate vitezele critice privind desprinderea vârtejurilor și de apariție a galopării, precum și posibilitatea interacțiunii între fenomene. S-a calculat numărul de cicluri de încărcare datorat desprinderii vârtejurilor și s-a efectuat verificarea privind posibilitatea apariției ovalizării secționale. În urma unui calcul automat cu program ce utilizează metoda elementului finit, s-a făcut o analiză comparativă a datelor obținute, incluzând eforturile secționale la bază. Studiul de caz a continuat cu aplicarea pe direcția de acțiune a vântului a metodelor factorului generalizat de răspuns la rafală, respectiv factorului generalizat de efect la rafală, analizându-se comparativ rezultatele cu cele obținute prin aplicarea codurilor și evidențiind avantajele celor două metode.

1. GENERALITĂȚI

1.1. Ingeria vântului la început de secol XX

„Ingeria Vântului este știința ce tratează în mod rațional interacțiunile dintre vânt în stratul limită atmosferic și om și lucrările sale de pe suprafața Pamântului” (Prof. Jack. E. Cermak, 1975). Ingeria Vântului este o știință relativ recentă, cu o dezvoltare exponențială după anii 1950 ai secolului trecut. Printre părinții Ingeriei moderne a Vântului, pot fi amintiți Jack E. Cermak, fondator în anul 1959 al Laboratorului de Dinamica Fluidelor din

cadru Colorado University, Alan G. Davenport, fondator al tunelului de vânt cu strat limită atmosferic de la Western Ontario University, sau C. Scruton, organizatorul primei conferințe internaționale cu privire la efectele acțiunii vântului asupra structurilor, în anul 1963.

În a doua parte a secolului XIX, consecință a revoluției industriale, a apărut și necesitatea construirii unor structuri optimizate și din ce în ce mai complexe. În acest context, au apărut și preocupările cu privire la evaluarea cât mai corectă a acțiunii vântului asupra structurilor, printre care și podurile cu structură metalică, mai ales în urma unor colapsuri structurale care au pus multe semne de întrebare specialiștilor vremii. Probabil cel mai potrivit exemplu îl reprezintă colapsul parțial al Podului de cale ferată peste estuarul Tay, de lângă orașul scoțian Dundee, produs în urma furtunii din 28 decembrie 1879.

Ulterior, în Marea Britanie, recomandări cu privire la evaluarea acțiunii vântului s-au materializat inclusiv în cadrul colecției de norme tehnice în construcții „*London County Council (General) Powers Act, 1894-1909*”.

În Franța, un rol important în înregistrarea datelor privind viteza vântului și în înțelegerea și evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor l-a avut inaugurarea cu ocazia Expoziției Universale organizată în cinstea Centenarului Republicii Franceze, în anul 1889, în zona Champ de Mars din Paris, a celebrului Turn Eiffel. Mărturie a celor afirmate sunt datele tehnice prezentate în lucrarea „*La Tour Eiffel de 300 metres – Description du monument, sa construction, ses organes mecaniques, son but et son utilité*” (G. Tissandier, 1889).

În celebra lucrare „*La Tour de Trois Cents Metres*” Ed. Lemerrier, Gustave Eiffel prezintă retrospectiv modul de evaluare a acțiunii vântului asupra structurii turnului (G. Eiffel, 1900). În capitolul III al acesteia, este prezentat modul de dispunere a forțelor orizontale provenite din vânt și cele două ipoteze principale de calcul, pornind de la expresia consacrată în epocă a presiunii vântului, reanalizată ulterior de Eiffel, care va propune în urma experimentelor utilizarea unui factor redus, de 0.09 în loc de 0.12:

$$P = 0.12 \cdot V^2 \quad (1.1)$$

unde P este presiunea măsurată în kg/mp, iar V viteza măsurată în m/s.

Cele două ipoteze constau în aplicarea pe suprafața elementelor expuse fie a unei presiuni constante pe înălțimea turnului de 300 kg/mp (adică o viteză a vântului de 50m/s), fie a unei presiuni variabile cu înălțimea, pornind de la 200 kg/mp la partea inferioară și ajungând la 400 kg/mp la vârf, menționându-se comparativ și prevederile Circularei Ministeriale din 29 august 1891 ce stipula pentru calculul lucrărilor de artă o presiune maximă provenită din vânt de 270 kg/mp.

În același timp, în 1916 la Potsdam, în Germania, Gustav Hellman în lucrarea „*Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre*” pune bazele definirii Legii Exponențiale (a puterii) pentru descrierea profilului vitezei vântului în cadrul Stratului Limită Atmosferic (SLA). Ulterior, pentru descrierea profilului vitezei în partea inferioară a SLA, s-a consacrat utilizarea Legii Logaritmice definită de ecuația Von Karman-Prandtl.

Aceste două legi importante se exprimă după cum urmează, (Simiu și Scanlan, 1985):

Legea Exponențială

$$U(z_{g1}) = U(z_{g2}) \cdot (z_{g1}/z_{g2})^\alpha \quad (1.2)$$

unde z_{g1} și z_{g2} sunt înălțimi măsurate deasupra cotei terenului, iar α exponent determinat experimental, dependent de rugozitatea terenului, denumit și exponent Hellman, având valoarea $1/7$ în anumite condiții, atmosfera neutră, teren deschis (Von Karman, 1921).

Legea Logaritmică

$$U(z) = 1/k \cdot u_* \cdot \ln(z/z_0) \quad (1.3)$$

Ecuția Von Karman-Prandtl, unde $U(z)$ este viteza medie a vântului, z_0 lungimea de rugozitate, z înălțimea măsurată deasupra cotei terenului, k constanta Von Karman, având valoarea general acceptată $0.4-0.41$, iar u_* este viteza de frecare.

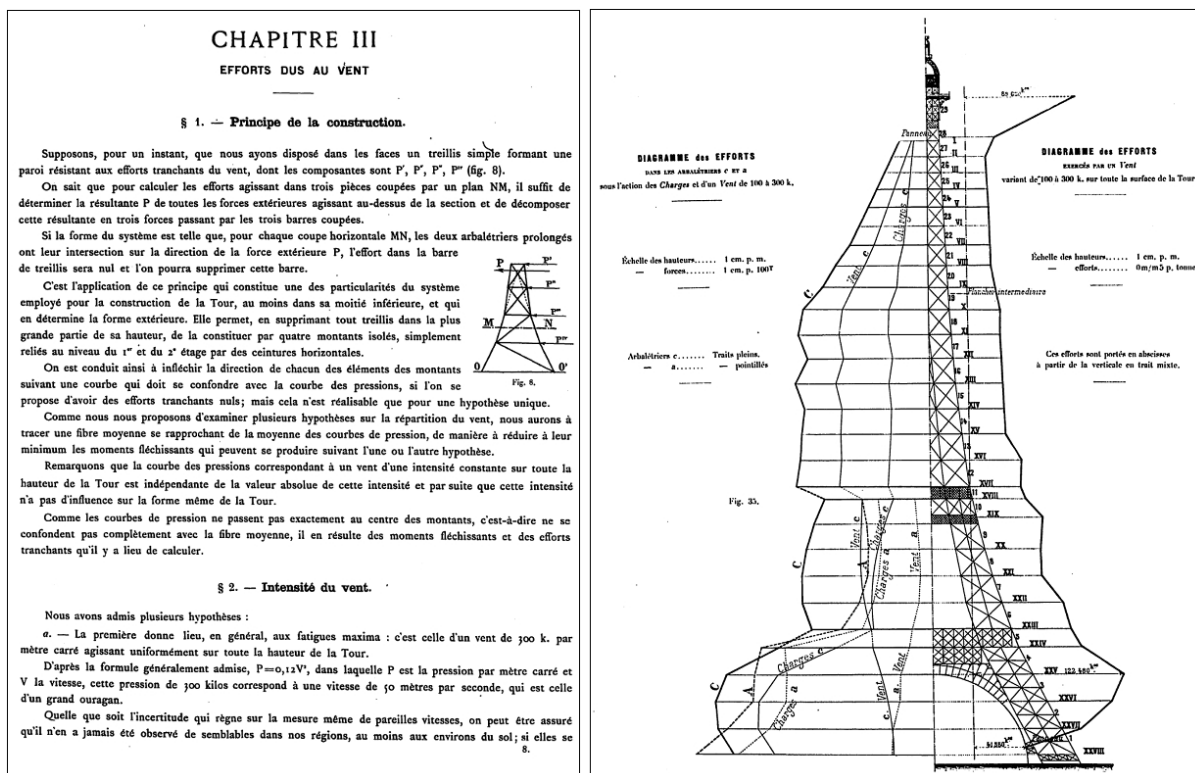
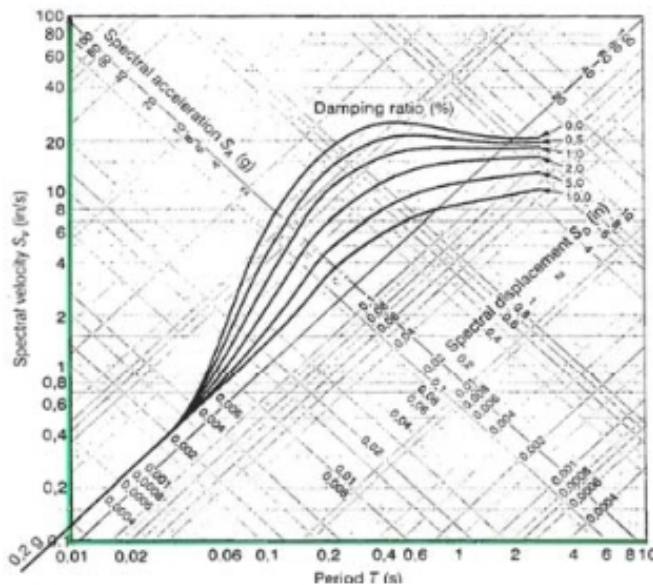


Fig. 1.1 „La Tour de trois cents metres”, G. Eiffel, ed. Lemerrier, Paris, 1900, exemplarul nr. 96, aflat în custodia Bibliotecii Naționale a Franței. Cap. III Eforturi datorate acțiunii vântului și Cap. IV Diagrammele de eforturi provenite din vânt (presiune 100-300 kg/mp), stânga - arbaletrieri și dreapta - toată suprafața turnului.

1.2. Ingineria seismică în secolul XX

Apariția noțiunii de inginerie seismică, componentă de prim rang a dinamicii structurale, având scopul de analizare și permanentă îmbunătățire a comportării structurilor sub acțiunea cutremurelor, este strâns legată de problema cutremurelor Californiene aferente celebrei falii San Andreas. În 1927 a fost publicată *Anexa Informativă a Uniform Building Code* (Fig.1.2.b), aplicată pe coasta de vest a SUA, cuprinzând primele reguli antiseismice. Conform acestei norme, în funcție de capacitatea portantă a terenului de fundare, se recomandă luarea în calcul la nivelul fiecărui planșeu a unei forte orizontale de nivel între 7.5% și 10% din totalul încărcărilor permanente și utile aferente nivelului respectiv.

De altfel, în California s-au născut conceptele de „spectru seismic” (M.A Biot, 1932), „spectru de răspuns” (H.Benioff 1934, G.W.Housner 1941), sau de „inginerie seismică” (înregistrarea oficială a EERI, în 4 nov.1948). La El Centro, California, în data de 18 mai 1940, a fost înregistrată și prima mișcare seismică majoră de către un seismograf localizat în zona epicentrală.



a)

UNIFORM BUILDING CODE 1927 Edition

ADOPTED BY THE
International Conference of Building Officials
at the 6th Annual Meeting
October, 1927

JANUARY 1928

COPYRIGHTED - 1928 and 1987
by

International Conference of Building Officials

19 Pine Avenue
LONG BEACH, CALIFORNIA

PRICE PER COPY—\$1.00

Complete Index in Back

b)

Fig. 1.2 a) Spectrul seismic de proiectare al lui Housner, 1959.

b) UBC - 1927 din SUA. Prima normă tehnică ce a conținut reguli antiseismice de proiectare.

Pe baza datelor obținute în urma a patru cutremure majore, El Centro, în 1934 și 1940, Olympia, în 1949 și Tehachapi, în 1952, G. W. Housner dezvoltă în 1959 primul spectru mediu de proiectare calibrat pentru $PGA=0.20g$ (pentru alte seisme, $S_A=(a/0.20g)*S_{A,HOUSNER}$). În același timp, în 1959, Newmark dezvoltă o serie de metode numerice iterative de evaluare a răspunsului dinamic, bazate în principal pe ecuațiile cu variabile deplasări, viteze, accelerații (u) și intervale de timp (Δt). În 1969 Newmark și Hall au conceput un nou spectru de proiectare bazat pe date provenind din înregistrarea a 28 de cutremure, iar ulterior au apărut metoda spectrului inelastic (Newmark și Hall, 1982) și metoda spectrului de capacitate (Freeman et al, 1975, ATC-40/1996).

1.3. Stadiul actual al cercetării cu privire la comportarea structurilor înalte și flexibile la acțiuni dinamice

În cadrul analizei răspunsului structural al construcțiilor înalte, flexibile, cu mase reduse acțiunea vântului se impune în fața celei provenite din cutremur. Acest lucru se datorează încărcărilor semnificativ mai reduse, raportate la masa totală a construcției, provenite din cutremurul de proiectare. Pe de altă parte fenomenele complexe asociate acțiunii vântului dezvoltate pe direcția de acțiune și perpendicular pe aceasta, au făcut obiectul multor studii atât teoretice cât și al unor încercări în tunele de vânt cu limită atmosferică (*Boundary Limit Wind Tunnel –BLWT*). Un număr de modele ale unor structuri tip consolă verticală înaltă, flexibilă au fost testate în tunelul de vânt și analizate. O mențiune specială o merită testarea în tunelul de vânt și analiza „Coloanei Infinitului” a lui Constantin Brâncuși, dar și testarea în tunelul de vânt a unui pilon de telecomunicații cu înălțime de 30m, similar pilonului ce face obiectul studiului de caz din prezenta lucrare. În Asia (Sri Lanka) a fost realizat un studiu de caz privind un pilon zăbrețit cu înălțime 30m calculat atât la vânt cât și la seism, obținându-se concluzii relevante cu privire la prevalența acțiunii vântului.

Stabilitatea dinamică la vânt a Coloanei a fost analizată și validată în tunelul de vânt de la Prato (Florența), de către profesorul G. Solari, de la Universitatea din Genova. Acesta a continuat studiile asupra Coloanei și a prezentat rezultatele acestora în numeroase reviste de specialitate. În cadrul setului de teste realizate au fost obținuți coeficienții aerodinamici de forță pe direcția acțiunii vântului c_D , respectiv lateral c_L , în varianta cu module decorative sau doar structura interioară (Solari, 2013). Ulterior testelor, au fost realizate determinări și verificări prin calcul cu privire la apariția potențială a instabilității aeroelastice și a fost evaluat răspunsul dinamic al structurii (Lungu et al, 2002). În același timp, urmare a verificărilor la Starea Limită Ultimă, s-a constatat că secțiunile Coloanei nu prezintă pericol de cedare, verificând condițiile cu factori de siguranță mari (Lungu și Văcăreanu, 2000) .

În cadrul Tunelului de Vânt (BLWT) de la Universitatea de Studii din Genova, au fost realizate o serie de teste statice și aeroelastice pe modele scalate ale unor piloni cu antene de comunicații, aplicabile în mare măsură și pilonilor de iluminat, cu scopul studierii răspunsului structural sub acțiunea vântului și al apariției fenomenelor aeroelastice (Nguyen et al, 2015 a, 2015 b). Unul din pilonii metalici studiați are o înălțime totală de 30m (la fel ca pilonul aeroportuar de iluminat, ce face obiectul studiului de caz din prezenta lucrare, având și secțiuni similare). Pilonul a fost modelat cu scara exterioară de acces precum și cu patul exterior de cabluri modelat ca un corp atașat de formă dreptunghiulară realizat din aluminiu.

Testele efectuate au fost de două categorii:

- statice*, în vederea determinării coeficienților aerodinamici de forță c_D pe direcția vântului, c_L lateral, precum și a numărului lui Strouhal;

- aeroelastice*, în vederea studierii posibilității apariției fenomenelor de instabilitate de natură aeroelastică, al anulării amortizării și apariției fenomenului de galopare.

În vederea stabilirii influenței numărului lui Reynolds, asupra modelelor au fost aplicate viteze variabile în intervalul general 5-25m/s. În vederea studierii efectelor, în timpul simulării acțiunii vântului, modelul a fost rotit în diverse unghiuri γ , cu un increment de 10 grade, de la 0 la 350 grade.

Testele în tunelul de vânt au reconfirmat la modul general valabilitatea condiției Glauert-Den Hartog. În cazul pilonilor, structuri zvelte/flexibile, luarea în considerare la modelare și în calcul a scărilor de acces exterioare, a cablurilor exterioare, a platformelor de lucru și/sau de odihnă, etc este necesară. În procesul de identificare a instabilității aeroelastice, s-a constatat oportunitatea luării în considerare și a modurilor superioare de vibrație aferente. Modelarea patului de cabluri ca un corp rigid, cu suprafața expusă vântului și arie semnificative raportat la secțiunea modelului pilonului, a influențat semnificativ rezultatele testului, doar scara având o influență mai redusă.

Analiza răspunsului dinamic sub acțiuni seismice a structurilor de tip consolă verticală, piloni de telecomunicații, de iluminat, etc, a fost mai intens studiată în țările precum Iran, India, Pakistan, Sri Lanka. În marea lor majoritate, studiile au fost axate pe stâlpi telecom cu secțiune zabrelită și toate au prezentat în mod comparativ atât răspunsul dinamic structural sub acțiunea seismică, cât și cel sub acțiunea vântului.

În Sri Lanka, un colectiv de cercetare de la Universitatea Moratuwa a realizat în 2013 un studiu similar cu privire la piloni zăbreliti telecom amplasați în Sri Lanka. Aceștia au înălțimi de 30, 50, respectiv 80m, iar pentru evaluarea acțiunii seismice s-a considerat o accelerație a terenului pentru proiectare $a=0.10g$, cu 10% probabilitate de depășire în 50 de ani, dar și

condiții de amplasament din Pakistan și Nepal. Pentru evaluarea acțiunii vântului s-au utilizat normele americane *TIA/EIA-222*, alegându-se pentru analiză două viteze, de 33.5m/s (zona3 Sri Lanka, 120km/h) și 50m/s (180km/h), (Gunathilaka et al, 2013).

Concluzia simulărilor a fost, fără excepție, că eforturile secționale și deplasările provenite din acțiunea dinamică a vântului sunt net superioare celor provenite din acțiunea seismică.

2. STRUCTURI TIP CONSOLĂ VERTICALĂ CU SECȚIUNE POLIGONALĂ SAU CIRCULARĂ – TIP PILONI DE ILUMINAT SAU CU ANTENE TELECOM

2.1. Domenii de utilizare, importanță, fabricare

O mare parte a structurilor tip consolă verticală cu secțiune închisă, poligonală sau circulară este reprezentată de construcțiile industriale sau cele aferente infrastructurii, coșuri metalice înalte, piloni metalici cu diferite funcțiuni, iluminat, telecomunicații, alimentare energie, din domeniul transporturilor, purtători de reclame, logo, etc.

Procesul de fabricare al pilonilor metalici reprezintă mai rar subiectul de cercetare al inginerilor constructori structuriști. În anul 2015, autorul tezei a vizitat în Polonia o linie importantă de producție a pilonilor metalici a unei companii multinaționale de top în domeniu. Acest proces poate fi descris sintetic după cum urmează:

- Derularea automată a roletelor de tablă;
- Profilare poligonală sau circulară, constantă sau variabilă a tronsoanelor de țevi;
- Execuție sudură continuă longitudinală, a rigidizărilor, accesoriilor și usilor de vizitare;
- Zincare termică completă în baie, la circa 450°C, incluzând pregătirea suprafeței, zincarea propriuzisă și inspecția suprafețelor.

Referitor la procesul de zincare termică, în SUA, Kinstler (2005) și Aichinger și Higgins (2006) au studiat fenomenul, asociind explicit apariția microfisurilor detectabile cu aparatura ultra-sonică, cu procesul de zincare termică și mai notabil, cu reducerea duratei de viață la oboseală a structurilor tip consolă flexibilă verticală. În urma experimentelor, (Kinstler, 2005) s-a concluzionat că la temperatura suportată de oțel în vederea zincării, ductilitatea oțelului zincat față de cel nezincat este puternic redusă. În Europa, M. Feldmann et al. (2010) observa fenomenul de afectare în principal al îmbinărilor unor elemente metalice prefabricate (cum e și cazul pilonilor de iluminat sau telecom) în timpul zincării termice și oferă soluții de evitare a acestora.

Condiția propusă de eliminare a posibilității apariției fisurilor în cadrul procesului de galvanizare, datorată metalului lichid, este dată de relația:

$$k_C \cdot \frac{(h \cdot 2\alpha_t)}{C \cdot s \cdot \rho \cdot v} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{T_V - T_{Bath}}{419^\circ - T_{Bath}}\right)} \leq \eta \quad (2.1)$$

$$k_C = k_{detail} \cdot k_{weld} \cdot k_{rough} \cdot k_{coldform} \cdot k_{preheat} \quad (2.2)$$

unde k_C este un coeficient global, produs al următorilor coeficienți de influență, k_{detail} coeficient în funcție de tipul elementului structural, k_{weld} în funcție de grosimea sudurii, k_{rough}

coeficient în funcție de rugozitatea suprafeței, $k_{coldform}$ coeficient ce ține cont de efectele predeformărilor în cazul profilelor formate la rece, $k_{preheat}$ în funcție de temperatura inițială preîncălzire T_V , C este căldura specifică a elementului metalic, T_{Bath} este temperatura de galvanizare (cca.450°C), h (înălțime) și s (grosime) sunt dimensiuni ale elementului metalic, ρ este densitatea specifică a materialului, v este viteza de scufundare în baie a elementului, α_t este coeficient de transfer termic al aliajului de zinc, $\varepsilon_{E,s}$ și $\varepsilon_{R,ref}$ deformația plastică echivalentă, funcție de grosimea s a elementului, respectiv deformația plastică de referință, η este rata de utilizare, în mod uzual cu valori ≤ 1.0 ; testul LNT este testul standard de determinare a capacității de deformare a oțelurilor în baia de zinc (Fig.2.1).

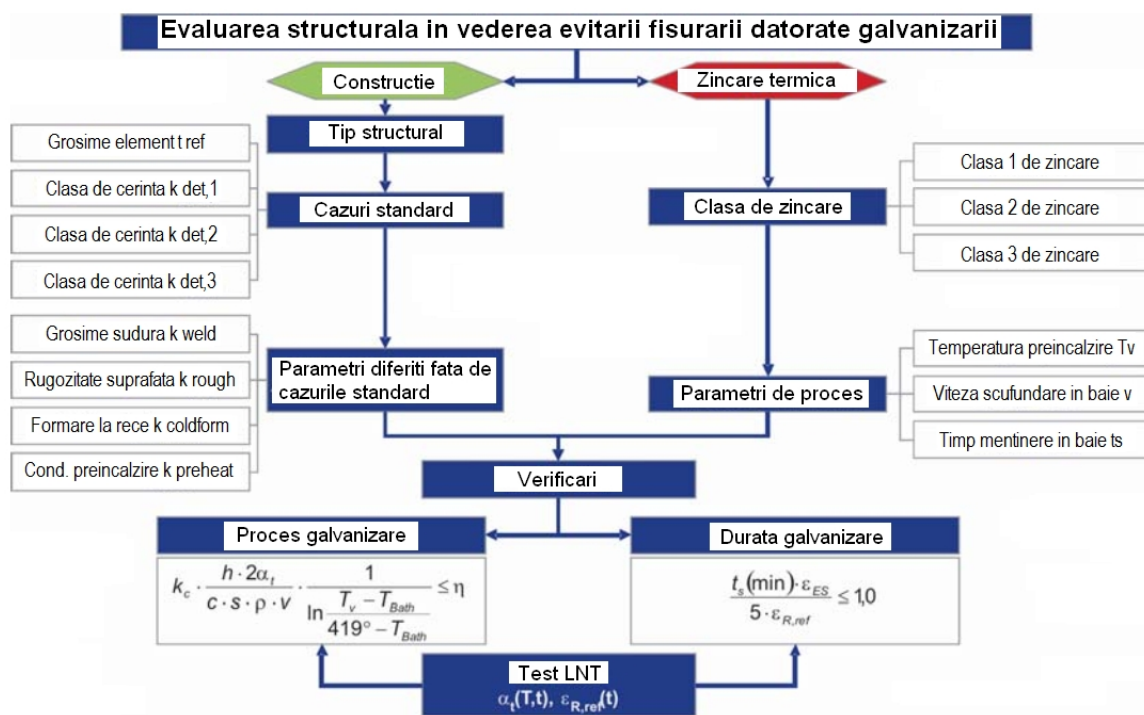


Fig. 2.1 Etape de verificare necesar a fi parcurse în vederea evitării fisurării datorate procesului de galvanizare, (M. Feldmann et al, 2010).

Dacă în norma *EN 1090 „Fabricarea și asamblarea structurilor din oțel și aluminiu”* se arată necesitatea inspectării după galvanizare a elementelor metalice, fiind menționată posibilitatea apariției fisurilor datorate metalului lichid (LMAC, liquid metal assisted cracking), în documentații de specialitate ale asociațiilor zincatorilor din Marea Britanie și Germania sunt inventariate toate cauzele principale ale apariției fisurării elementelor metalice după procesul de galvanizare:

- eforturi reziduale importante apărute și rămase de la prelucrarea elementului;
- fragilizare prin hidrogen în stare atomică înainte de galvanizare, în timpul fabricării, pregătirii suprafețelor;
- fragilizare datorată îmbătrânirii, ce apare mai ales la profilele prelucrate la rece, în care rămân unele eforturi ce produc ulterior fisuri la temperaturi mai înalte specifice galvanizării;
- fisurare datorată metalului lichid (LMAC).

Piloni de iluminat

Pilonii cu secțiune unitară poligonală sau circulară utilizați pentru iluminatul terminalelor de transport (porturi, aeroporturi, gări, autogări) sau la iluminatul platformelor industriale, au

un regim de înălțime, în general, cuprins între 20m și 40m, putând însă ajunge în anumite cazuri și la 60m sau chiar 70m.

În România, în ultimul deceniu, ca urmare a accesării de fonduri europene, infrastructura aeroportuară a cunoscut un amplu proces de modernizare, iar în acest context, a apărut necesitatea dotării noilor platforme cu piloni de iluminat performanți care să asigure un nivel de iluminat economic și corespunzător normelor actuale.

În acest sens, pot fi amintite câteva proiecte în cadrul cărora autorul tezei a participat în calitate de șef de proiect specialitatea structuri:

- Aeroportul Internațional Oradea, 2015, proiectarea unor piloni metalici de iluminat, înălțime $h=20\text{m}$, cu secțiune poligonală din oțel S235, dotați cu coroană mobilă cu 6 proiectoare. Conform codului *CR1-1-4/2012*, presiunea de referință a vântului în zonă este $q_b=0.5\text{kPa}$. Eforturile secționale la bază (forțe axiale, tăietoare și moment încovoietor) sunt $N=15.37\text{kN}$, $T=13.20\text{kN}$, $M=195.10\text{kNm}$.

- Aeroportul Internațional Suceava, 2015, proiectarea unor piloni metalici de iluminat, înălțime $h=18\text{m}$, cu secțiune poligonală din oțel S235/355, dotați cu bară fixă cu 7 proiectoare. Presiunea de referință a vântului în zonă este $q_b=0.7\text{kPa}$. Eforturile secționale la bază sunt $N=24.86\text{kN}$, $T=37.67\text{kN}$, $M=448.83\text{kNm}$.

- Aeroportul Internațional Târgu Mureș, 2016, proiectarea unor piloni metalici de iluminat, înălțime $h=13\text{m}$, cu secțiune poligonală din oțel S235/355, dotați cu bară fixă cu 4 proiectoare. Presiunea de referință a vântului în zonă este $q_b=0.4\text{kPa}$. Eforturile secționale la bază sunt $N=3.86\text{kN}$, $T=5.33\text{kN}$, $M=40.09\text{kNm}$.



a)



b)

Fig. 2.2 a) Pilon de iluminat $h=20\text{m}$ cu coroană mobilă de reflectoare, Aeroport Internațional Oradea; b) Pilon de iluminat $h=18\text{m}$ cu bară fixă de reflectoare și scară acces, Aeroport Internațional Suceava, 2015.

- Aeroportul Internațional Mihail Kogălniceanu Constanța, 2016, proiectarea unor piloni metalici de iluminat, înălțime $h=27\text{m}$, cu secțiune poligonală din oțel S355, dotați cu coroană mobilă cu 12 proiectoare. Presiunea de referință a vântului în zonă este $q_b=0.5\text{kPa}$. Eforturile secționale la bază sunt $N=48.33\text{kN}$, $T=56.93\text{kN}$, $M=1104.09\text{kNm}$.

- Aeroportul Internațional Cluj Napoca, 2017, proiectarea unor piloni metalici de iluminat, înălțime $h=18\text{m}$, cu secțiune poligonală din oțel S235/355, dotați cu bară fixă cu 8

proiectoare. Presiunea de referință a vântului în zonă este $q_b=0.5\text{kPa}$. Eforturile secționale la bază sunt $N=22.66\text{kN}$, $T=33.21\text{kN}$, $M=459.38\text{kNm}$.

2.2.Proiectarea pilonilor metalici de iluminat și Studiu de caz în incinta Aeroportului Internațional Iași

Considerații privind proiectarea pilonilor metalici

Din punct de vedere structural, procesul de proiectare în faza detalii de execuție al pilonilor de iluminat cuprinde mai multe etape și interacțiunea cu specialiști din domenii conexe, urmărindu-se succesiv, în mare, următoarele:

- Primirea Temei de Proiectare din partea proiectantului specialitatea instalației electrice, cu privire la poziția și înălțimea pilonului, numărul și tipul de proiectoare necesare;
- Primirea Studiilor de Teren, ce includ Ridicarea Topo și Studiul Geotehnic;
- Alegerea de către proiectant a tipului de pilon și predimensionarea; stabilirea clasei de importanță-expunere;
- Evaluarea și combinarea tuturor încărcărilor provenind din acțiuni permanente, variabile, accidentale, seism, specifice amplasamentului și tipului de structură;
- Realizarea modelării, evaluarea încărcărilor, inclusiv a celor din vânt și seism, realizarea calculului dinamic structural, precum și verificarea structurii la stările limită SLU și SLS;
- Proiectarea sistemului de fundare și al modului de transmitere al eforturilor secționale de la baza pilonului la fundație, cu respectarea prevederilor Studiului Geotehnic;
- Elaborarea tuturor pieselor scrise (memoriu tehnic, caiete de sarcini, programele de control al calității și al urmăririi comportării în timp a construcției, liste de cantități) și desenate (toate detaliile de execuție) necesare și în final, verificarea proiectului de către verficatori atestați.

Dintre factorii potențiali care pot genera inexactități în cadrul procesului de proiectare în cazul implicării producătorilor/furnizorilor, ipotetic, se pot enumera (Rădăceanu, 2018):

- Neluarea în considerare a informațiilor corecte cu privire la acțiunea vântului, (dar și a seismului, chiciurii, etc) în amplasamentul pilonului studiat;
- Încadrare incorectă în clasele de importanță - expunere, conform normelor tehnice în vigoare (HG nr.766/1997, CR1-1, P100-1/2013);
- Subevaluarea coeficientului de răspuns dinamic la vânt, c_d ;
- Lipsa analizei efectelor acțiunii vântului pe direcția transversală curgerii acestuia, a desprinderii vârtejurilor, a galopării;
- Subevaluarea duratei normate de viață;
- Studiarea incompletă a vecinătăților și/sau a rugozității amplasamentului (construcții apropiate, ramblee înalte, etc);
- Verificare incompletă/subevaluată la oboseală (număr de cicluri de încărcare dat de desprindere vârtjeuri), sau lipsa calculului de ovalizare;
- Realizarea unor calcule comune pentru pilonii furnizați, indiferent de înălțimea la care sunt dispuși (la nivelul solului, pe poduri, pe pasaje cu înălțimi semnificative).

O atenție deosebită trebuie acordată și alegerii protecției anticorozive în funcție de amplasamentul ales (zone industriale, litoral, etc) și post execuție, respectării programului de urmărire a comportării în timp a construcției.

Studiu de caz. Pilon de iluminat $h=30m$ amplasat în incinta Aeroportului Internațional Iași

Descrierea amplasamentului

Obiectul studiului de caz îl reprezintă pilonii de iluminat aferenți platformei de îmbarcare – debarcare construită în cadrul programului de modernizare și extindere a Aeroportului Internațional Iași, aeroportul regional al zonei de Nord-Est a României. Aeroportul este situat în zona lacurilor Ciric, la o altitudine de aproximativ 105m (Fig.2.3). Actualmente, aeroportul este deservit de trei terminale de pasageri din care două deschise după 2012, raportând pentru anul 2017 un număr de peste 1.140.000 pasageri.

În urma analizei de amplasament, pentru uniformizarea calculului privind acțiunea vântului și efectele sale, a fost aleasă în mod acoperitor categoria II de teren ($z_0=0.05m$, $z_{min}=2m$). Conform aceluiași cod, presiunea de referință a vântului în zona Iași este $q_b=0.7kPa$, IMR 50 de ani, rezultând o viteză de referință $v_b=33.47m/s$.

Structura pilonului de iluminat

Grupa de piloni de iluminat executată în perioada 2014-2015, conține 4 piloni, dispuși la o distanță de 75m unul de altul, doi cu înălțimea de 25m și doi cu înălțimea de 30m, obiectul studiului fiind unul din pilonii cu înălțimea de 30m (Rădăceanu, 2016).



Fig. 2.3 Amplasamentul Aeroportului Internațional Iași. Vizualizarea categoriei de teren II – III, câmp deschis pe trei laturi și pădure foioasă la circa 150m, pe o latură.

Săgeți indicare amplasament: galbenă – amplasament piloni, roșie – amplasament stație meteo.

Pilonul de iluminat menționat are forma generală tronconică cu o secțiune variabilă de formă poligonală cu 16 laturi și este realizat din oțel de calitate S355. Diametrul mediu la bază este de 1009.4mm, ajungând la vârf la un diametru de 246.8mm. Grosimea materialului în secțiune este de 10mm pe primii 10.5m și de 8mm până la vârf (30m). Din punct de vedere constructiv, pilonul este format din trei tronsoane îmbinate, pe care au fost atașate scara de acces, platforma de lucru, paratrasnetul și catargul pentru proiectoare din profil UNP100 oțel

S235. Pilonul este prevăzut cu un număr total de 8 proiectoare dispuse pe două rânduri, tip Philips MVP507. Fundațiile sunt din beton armat, sistem bloc și cuzinet, pilonul metalic fiind încastrat prin intermediul plăcii de bază și unui număr de 16 buloane M48 B500.



Fig. 2.4 Poze din timpul montajului pilonilor de iluminat de la Aeroportul Iași: a) montajul la sol al tronsoanelor, al scării, platformei de lucru, paratrăsnetului și al structurii reflectoarelor; b) prezentarea tronsonului 1 cu placă de bază și ușă de vizitare cabluri.

În vederea determinării caracteristicilor dinamice de bază, moduri proprii de vibrație și frecvențe proprii, s-a realizat o analiză modală cu un programul de calcul ce utilizează metoda elementului finit, prin utilizarea metodei Eigenvector (cu considerarea vibrațiilor libere neamortizate). Din punctul de vedere al modelării structurii, au fost realizate trei modele cu tipuri de elemente distincte, cu următoarele perioade (secunde) și frecvențe (Hz) proprii de vibrație obținute:

a) elemente nonprismatice:

$$T_{1,2}=1.328\text{sec}; v_{1,2}=0.753\text{Hz}; T_{3,4}=0.347\text{sec}; v_{3,4}=2.878\text{Hz}; T_{5,6}=0.143\text{sec}; v_{5,6}=6.985\text{Hz};$$

b) elemente tip segment cilindric

$$T_{1,2}=1.337\text{sec}; v_{1,2}=0.748\text{Hz}; T_{3,4}=0.345\text{sec}; v_{3,4}=2.895\text{Hz}; T_{5,6}=0.142\text{sec}; v_{5,6}=7.036\text{Hz};$$

c) elemente tip shell

$$T_{1,2}=1.281\text{sec}; v_{1,2}=0.781\text{Hz}; T_{3,4}=0.339\text{sec}; v_{3,4}=2.949\text{Hz}; T_{5,6}=0.139\text{sec}; v_{5,6}=7.195\text{Hz}.$$

3. ANALIZA DATELOR METEOROLOGICE PRIVIND VITEZA VÂNTULUI LA AEROPORTUL IAȘI

3.1. Baze de date meteorologice

Clasificarea fenomenelor eoliene care se pot dezvolta în stratul limită atmosferic și pot interacționa cu structurile create de om, este următoarea:

- circulația atmosferică primară: alizee, vânturi vestice și vânturi estice;
- circulația atmosferică secundară: cicloni tropicali, extra-tropicali, anticicloni, musoni;
- vânturi locale: produse de condiții geografice speciale (briza, fohnul, bora) sau produse de condiții atmosferice speciale (furtuni, tornade). În Moldova trebuie menționat și crivățul.

În ultimul timp și fenomenele meteorologice locale extreme, printre care și furtunile, au căpătat o amploare deosebită, producând distrugerii însemnate și necesitând în consecință o atenție specială, inclusiv sub aspectul reevaluării acțiunii vântului asupra construcțiilor și ca o consecință, a dimensionării acestora. În acest context, analizele statistice și probabilistice de acuratețe ale bazelor de date privind vitezele instantanee ale vântului, obținute de la echipamente automatizate (anemometre sonice, lidare, etc) devin demersuri extrem de importante. În vederea asigurării unor baze de date cu valori corecte care să nu influențeze negativ rezultatele analizei probabilistice, este necesar ca bazele de date supuse analizei conținând vitezele vântului, să fie reprezentative, să conțină valori corecte și să fie omogene.

3.2. Analiza statistică a vitezei vântului și teoria statistică a valorilor extreme

Ca rezultat al cercetărilor, a devenit acceptat faptul că în cadrul proiectării structurilor supuse acțiunii vântului, aparținând unui amplasament dat, este foarte utilă o caracterizare din punct de vedere statistic și probabilistic a valorilor vitezei vântului, în special a valorilor extreme, cu identificarea valorilor maxime înregistrate. Aceste analize ale diferitelor viteze ale vântului sunt caracteristice amplasamentului stației meteorologice unde s-au obținut valorile respective.

Analiza statistică și probabilistică a datelor privind viteza vântului constă din câteva etape distincte:

- analiza bazei de date cu validarea datelor înregistrate;
- analiza tuturor valorilor vitezei vântului înregistrate în baza de date (populația de date);
- analiza valorilor extreme validate ale vitezei vântului înregistrate în baza de date, în special a maximelor anuale;
- transformarea distribuțiilor valorilor de bază și a celor extreme (maxime) în funcții-grafice caracteristice acțiunii vântului în amplasamentul respectiv.

Distribuții ale populației de date înregistrate

Modelul probabilistic recunoscut pe scară largă și în consecință și cel mai utilizat pentru distribuția vitezelor vântului provenite din populația de date este modelul Weibull.

Principalul neajuns al distribuției Weibull este reprezentat de modul de tratare al calmului de vânt, întrucât $Fv(0) = fv(0) = 0$. În realitate însă anemometrele pot înregistra perioade importante de calm de vânt. Această problemă poate fi eliminată prin metoda denumită Weibull Hibridă (Takle și Brown, 1978), în care se iau în considerare și perioadele de calm de vânt. Funcția F și densitatea f de repartiție, aferente acestei metode, sunt exprimate astfel:

$$F_v(v) = F_0 + (1 - F_0) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \right\}; v \geq 0 \quad (3.1)$$

$$f_v(v) = F_0 \delta(v) + (1 - F_0) \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right]; v \geq 0 \quad (3.2)$$

unde c și k sunt parametrii distribuției Weibull, F_0 se referă la calmul de vânt și este raportul dintre numărul de valori $v=0$ și numărul total de valori valide. $\delta(v)$ este funcția lui Dirac

(distribuție). Din cercetări și analize statistice și probabilistice ale unor baze de date privind viteza vântului în diferite zone ale Europei, efectuate în ultimii ani, s-au putut stabili intervale de lucru pentru coeficienții k , de exemplu: 1.8...2.0 pentru nordul Europei și UK, 1.4...1.7 pentru Liguria, Italia (Pagnini și Solari, 2015), șamd.

Distribuții ale valorilor maxime

În analiza valorilor extreme aferente bazelor de date, au fost alese cel mai frecvent valorile maxime anuale. În realitate, valorile vitezelor vântului din bazele de date nu sunt independente statistic (procesul obținerii valorilor mediate ale vitezei vântului are o structură de corelație) și nu sunt distribuite identic (ca o caracteristică multianuală, viteza vântului de exemplu se modifică sezonier în cursul anului). După Fisher și Tippett (1928), Von Mises (1936) și Cramer (1946), Gumbel prezintă în anul 1958 asimptotele tip I, II și III.

a) Repartiția tip I Gumbel

○ Funcția de repartiție $F_V(v)$, respectiv densitatea de repartiție $f_V(v)$ ale modelului tip I Gumbel, funcție de parametri a și u (Gumbel, 1958), sunt exprimate prin:

$$F_V(v) = \exp\{-\exp[-a(v-u)]\}; (-\infty < v < \infty) \text{ și}$$

$$f_V(v) = a \exp\{-a(v-u)\} \exp\{-\exp[-a(v-u)]\}; (-\infty < v < \infty) \quad (3.3)$$

b) Repartiția tip II Frechet

○ Funcția de repartiție $F_V(v)$, respectiv densitatea de repartiție $f_V(v)$ ale modelului tip II Frechet, funcție de parametri, sunt exprimate prin:

$$F_V(v) = \exp\left\{-\left(\frac{u}{v}\right)^k\right\}; (v > 0) \text{ și}$$

$$f_V(v) = \frac{k}{u} \left(\frac{u}{v}\right)^{k+1} \exp\left\{-\left(\frac{u}{v}\right)^k\right\}; (v > 0) \quad (3.4)$$

c) Repartiția tip III Weibull inversată

○ Funcția de repartiție $F_V(v)$, respectiv densitatea de repartiție $f_V(v)$ ale modelului tip III Weibull inversat, funcție de parametri, sunt exprimate de relațiile:

$$F_V(v) = \exp\left\{-\left(\frac{w-v}{w-\eta}\right)^\gamma\right\}; (v < w) \text{ și}$$

$$f_V(v) = \frac{\gamma}{w-\eta} \left(\frac{w-v}{w-\eta}\right)^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{w-v}{w-\eta}\right)^\gamma\right\}; (v < w) \quad (3.5)$$

d) Repartiția generalizată a extremelor (GEV)

Această metodă descrisă de Jenkinson în 1955 (ținându-se cont de contribuția lui Von Mises, 1936) reunește cele trei repartiții asimptotice tip I, II și III, exprimându-le în mod generalizat prin:

$$F_V(v) = \exp\left\{-[1 - \beta\alpha(v-\eta)]^{1/\beta}\right\}; (\beta \neq 0)$$

$$F_{\hat{\nu}}(\nu) = \exp\{-\exp[\alpha(\nu - \eta)]\}; (\beta = 0) \quad (3.6)$$

e) Repartiția penultimă FTI

Această metodă propusă de Cook și Harris (2004 și 2008) derivă din repartițiile asimptotice ținând cont de faptul ca numărul evenimentelor meteo independente anuale nu tinde spre infinit, fiind unul limitat. Funcția de repartiție $F_{\hat{\nu}}(\nu)$ are expresia:

$$F_{\hat{\nu}}(\nu) = \exp\{-\exp[\alpha^k(\nu^k - \eta^k)]\} \quad (3.7)$$

unde $\alpha = 1/c$; k și c sunt parametrii repartiției Weibull; în condițiile în care repartiția Weibull a valorilor bazei de date (populația de date) a fost deja realizată, mai este necesară doar determinarea lui η , corespunzător valorilor extreme.

O altă metodă, utilizată mai des în ultimul timp, este Analiza de proces. Conceptul acestei metode a fost propus de Davenport (1968). Ulterior, Gomes și Vickery (1977) au dezvoltat metoda, considerând viteza vântului ca un proces staționar aleator.

3.3. Studiu de caz. Analiza valorilor vitezei vântului, înregistrate în cadrul Stației Internaționale Meteo – Aeroport Iași (1976 – 2015)

Condiții climatice privind acțiunea vântului în zona municipiului Iași

Circulația și viteza aerului în zona Iași sunt influențate de factori precum macorelieful regional, relieful local ușor deluros sau anotimpurile, datele istorice înregistrate privind viteza și direcția vântului, fiind în general consecințe ale acțiunii ciclonilor și anticiclonilor. Fenomenele meteo deosebite sunt prezente și în zona Iași. Exemplele constau din evenimente locale intense și de scurtă durată, de tipul furtunilor, care se petrec preponderent vara, sau mult mai rar, din furtuni de praf generate fie de presiuni atmosferice ridicate în zona asiatică în combinație cu curenți de înălțime acționând de la est la vest, în general primavara, fie generate de vânturi sud-estice ce ridică particule din zona Africii de Nord.

Studii anterioare privind acțiunea vântului în zona Iași, precum cel al E. Erhan (1979), vizând perioada 1961-1975, indicau după realizarea rozei locale a vântului, că direcția acestuia în zonă este preponderent dinspre Nord-Vest (23-24% din total populație de date), urmată de direcțiile Sud-Est și Est (preponderent iarna), remarcând o medie de 5 zile/an cu viteze ale vântului de peste 16m/s.

Stația meteorologică Aeroport Iași. Baze de date privind viteza vântului

Începând din data de 23.06.2011, Stația Meteorologică Aeroport Iași se afla amplasată în Strada Marginei nr.30, având coordonatele: latitudine: 47°09'48", longitudine 27°37'38", la o altitudine de 74.29 m, la aproximativ 2.5 km în direcția Nord-Est față de centrul municipiului Iași.

În vederea unei analize a datelor meteo specifice amplasamentului, au fost utilizate două seturi de date meteo privind viteza vântului. Primul set de date a fost obținut în 2016 de la Administrația Națională de Meteorologie și cuprinde date zilnice din perioada 1961-2015 (55ani). Setul de date cuprinde informații privind anul, luna, ziua, valoarea zilnică medie, maxima, direcția vitezei maxime (codată) și viteza la rafală. Datorită caracteristicilor setului de date, acestea nu au putut constitui o bază de date fiabilă pentru analiză, fiind utilizată doar

punctual, cel mai adesea în scop comparativ, raportat la cel de al doilea set de date. Al doilea set de date, mai complex, cuprinde date extrase din baza de date a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) din perioada 1976-2015 (40ani), conținând înregistrări orare cu interval de mediere de 10minute. Aceste date corespund standardelor de înregistrare ale WMO (World Meteorological Organization). Pe lângă înregistrările orare sunt specificate anul, luna, ziua, ora, direcția în grade, vântul la rafală.

Analiza statistică a bazei de date privind viteza vântului în ultimii 40 de ani (1976-2015), la Stația Aeroport Iași. Distribuții ale populației de date și valorilor maxime

Urmare a analizei preliminare a celor două seturi de date privind viteza vântului, s-a luat decizia continuării analizei pe cel de al doilea set cu înregistrări orare, valori cu interval de mediere de 10minute, primul set de date fiind utilizat doar punctual și numai pentru datele din perioada 1961 – 1975. Analiza acestui set de date s-a realizat cu un program de calcul specializat și au fost obținute următoarele rezultate:

Au fost analizate un numar de 350.640 linii de date, reprezentând 100%.

Din acestea au fost:

- date lipsa, pe 98.951 linii de date, reprezentând 28.22%;
- date valide, pe 251.689 linii de date, reprezentând 71.78%;
- date cu calm de vânt, pe 27.380 linii de date reprezentând 7.81%;
- date valide diferite de valoarea 0m/s, pe 323.260 linii de date, reprezentând 92.19%.

Setul de date privind viteza vântului a fost considerat reprezentativ, înregistrările fiind cuprinse într-un interval de 40 de ani. Ca parte a analizei setului de date au fost izolate succesiv toate valorile vitezei vântului (înregistrări orare mediate pe 10minute) mai mari sau egale cu 20m/s, respectiv 25m/s, acestea fiind de mare interes. Izolarea acestor valori s-a efectuat pe un interval de 7 zile, astfel încât să poată fi observată natura fenomenelor meteo (cicloni, furtuni, etc).

În același timp analiza celor 17 valori $v_{10min}(1h) \geq 25m/s$ în cadrul intervalului de 7 zile, a trebuit corelată cu variația presiunii atmosferice, urmărindu-se și o creștere, respectiv scădere, graduală a vitezei vântului în zilele de înainte și după atingerea maximumului.

În perioada 1976-06.2000 (25ani) s-au regăsit 16 din cele 17 valori înregistrate $v_{10min}(1h) \geq 25m/s$, stația meteo automată înregistrând în perioada 06.2000-2015 (15ani) doar o singură valoare $\geq 25m/s$. În mod similar, în perioada 1976-06.2000 (25ani) s-au regăsit 67 din cele 75 valori înregistrate $v_{10min}(1h) \geq 20m/s$, stația meteo automată înregistrând în perioada 06.2000-2015 (15ani) doar 8 valori $\geq 20m/s$; cea mai mare viteză maximă înregistrată în intervalul studiat a fost de 30m/s, în datele 20.06 și 21.09.1998.

Datele de mai sus arată o diferență între datele din perioada anilor '60 – '90 și cele din perioada de după anii 2000, acest lucru datorându-se, posibil, modului de înregistrare a datelor, calității aparatelor de înregistrare, erorilor umane, înregistrării sau unor fenomene de altă natură. Se remarcă faptul că valoarea maximă orară, mediată pe 10min, înregistrată în ultimii 40 de ani, de 30m/s (anul 1998), este sub valoarea vitezei de referință din zona Iași, din codul CR1-1-4/2012, 0.7 kPa, adică 33.47m/s, (Rădăceanu, 2017 b).

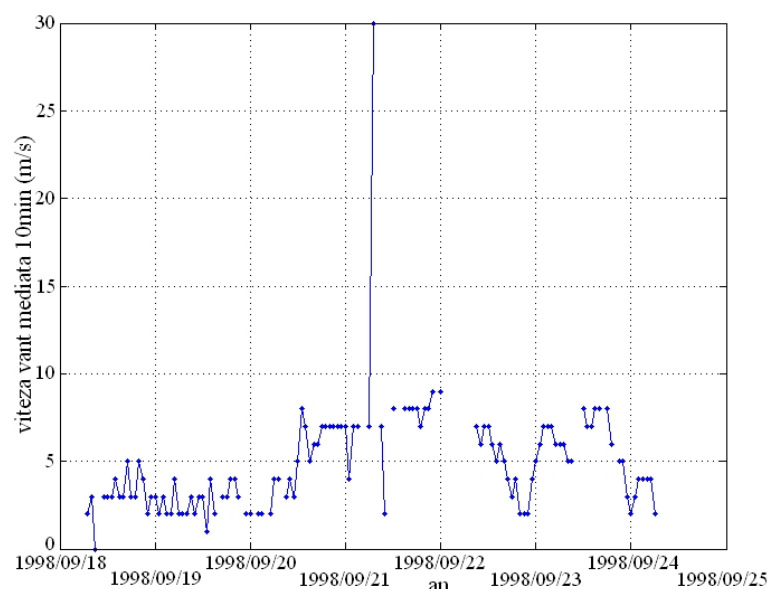


Fig. 3.1 Exemplu privind reprezentarea izolării valorilor de peste 25m/s ale vitezei vântului. Pentru valorile maxime s-a studiat un interval total de câte 7 zile (3 zile înainte și 3 zile după eveniment). Date aferente vârfului din 21.09.1998, $v=30\text{m/s}$, Stația Aeroport Iași.

În vederea analizării direcției vântului, a fost realizată o roză a vânturilor (Fig.3.2) în care se pot observa direcțiile predominante ale vântului în funcție de viteza acestuia. Astfel, se confirmă în totalitate informațiile din studiile anterioare cu privire la direcția locală predominantă a vântului dinspre Nord-Vest, urmată de direcția Est. Referitor la valorile extreme anuale (atât $\geq 20\text{m/s}$ cât și $\geq 25\text{m/s}$), circa 40% dintre acestea se situează pe direcția predominantă Nord-Vest, demonstrând o corelare între valori maxime și direcția predominantă.

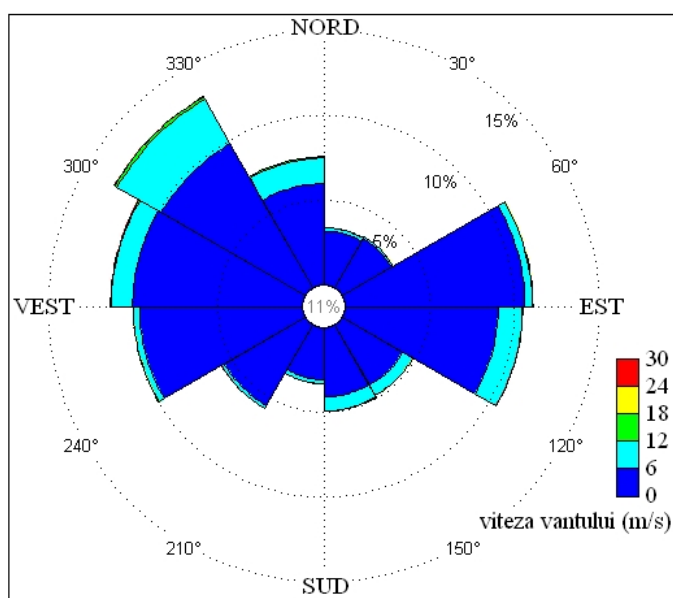


Fig. 3.2 Roză vânturilor cu evidențierea direcțiilor predominante, pe intervale de viteză, Iași, 1976-2015.

Pe baza valorilor orare înregistrate, au fost realizate distribuțiile Weibull cu 2 parametri c (parametru de scalare) și k (parametru de formă), ale populației de date, obținându-se densitățile de probabilitate $f(v)$ și funcțiile de repartiție $F(v)$.

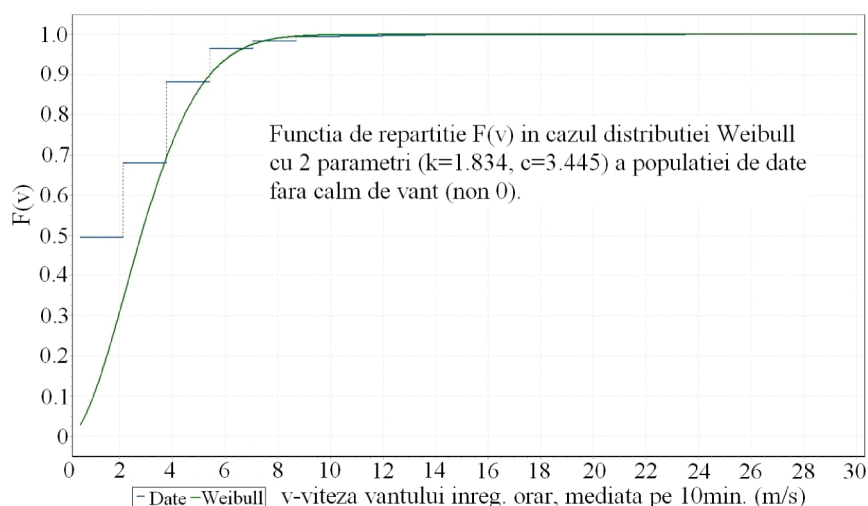


Fig. 3.3 Reprezentarea funcției de repartiție $F(v)$ pentru valori ale vitezei vântului fără calm de vânt (non 0). Distribuție Weibull, $c=3.445$, $k=1.834$.

Distribuțiile au fost realizate pentru valorile cu calm de vânt, fără calm de vânt (non 0) și ca urmare a analizării Rozei Vântului, direcțional fără calm de vânt pe direcțiile 60-90 grade (est), 91-120 grade (est), 240-269 grade (vest), 270-299 grade (vest), 300-330 grade (nord-vest). Parametrii obținuți c și k pentru valorile înregistrate fără calm de vânt (non 0) sunt: $c = 3.445$ și $k = 1.834$. Acești parametri obținuți pot fi utilizați în verificarea la oboseală, pe baza unor seturi complete de formule, a unei structuri supusă acțiunii vântului, în funcție de condițiile reale din amplasament (Repetto, Solari, 2012).

Valorile maxime înregistrate au fost analizate în două cazuri: $v_{max} \geq 20\text{m/s}$ (75 valori) și $v_{max} \geq 25\text{m/s}$ (17 valori), (Fig.3.4). Pentru fiecare din cazuri au fost realizate și comparate, cu rezultate satisfăcătoare, distribuțiile Frechet, General Extreme Value, Gumbel Max și Lognormală.

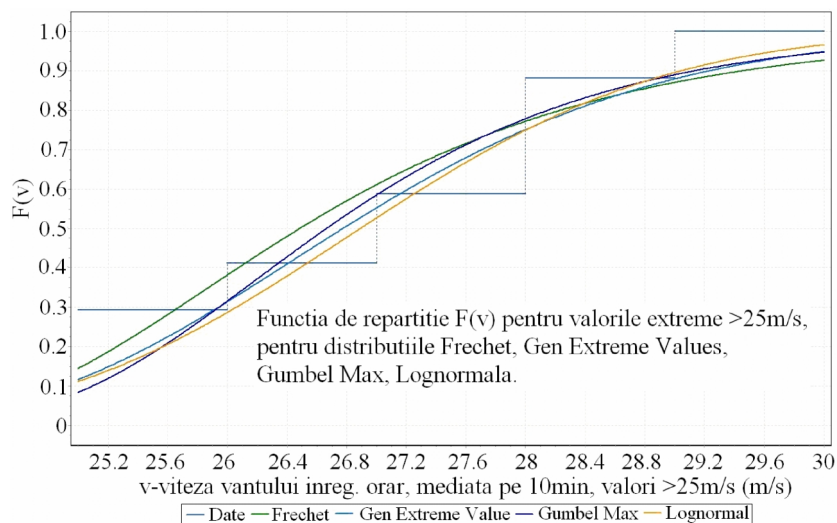


Fig. 3.4 Reprezentarea funcției de repartiție $F(v)$ pentru valorile extreme ale vitezei vântului $\geq 25\text{m/s}$, aferente distribuțiilor Frechet, General extreme values, Gumbel max și Lognormală.

Evenimentul meteo excepțional menționat de literatura de specialitate, înregistrat la Stația Meteo Aeroport Iași în perioada 4-7 ianuarie 1966, cea mai mare viteză a vântului înregistrată iarna, din România, a fost identificat în baza de date obținută de la ANM, însă cu valori înregistrate diferite. În aceeași bază de date (perioada 1961-2015), au fost izolate în intervalul 1963-1966, valori maxime ale vântului de peste 34m/s.

4. EVALUAREA ACȚIUNILOR DINAMICE DIN VÂNT ȘI CUTREMUR ASUPRA STRUCTURILOR ÎNALTE/FLEXIBILE

4.1. Acțiunea vântului

Modelarea caracteristicilor Vântului sinoptic pentru proiectarea structurilor

- Evaluarea acțiunii vântului

Valorile instantanee ale vitezei vântului pot fi descompuse într-o componentă medie și una fluctuantă față de medie. Acest lucru se poate reprezenta prin tehnica matematică denumită descompunerea Reynolds, formulată mai jos, în lungul axei z a unei structuri tip consolă verticală:

$$u(z, t) = u_m(z) + u'(z, t) \quad (4.1)$$

Componenta medie $u_m(z)$ este dependentă, pe lângă viteza de referință, de rugozitatea terenului și de orografia amplasamentului. Variația vitezei medii raportată la înălțimea z deasupra terenului este produsă de rugozitate și poate fi reprezentată în principal prin modelul logaritmic (preluat în codurile europene), sau prin modelul exponențial (preluat de codurile american, canadian, chinezesc).

Legea logaritmică modelează în mod realist variația vitezei medii a vântului cu înălțimea, pentru înălțimi sub 200m. Legea Logaritmică de descriere a profilului vitezei medii, definită de ecuația Von Karman-Prandtl, poate fi exprimată (Simiu și Scanlan, 1985) prin:

$$U(z) = \frac{1}{k} \cdot u_* \cdot \ln(z/z_0) \quad (4.2)$$

unde $U(z)$ este viteza medie a vântului, z_0 lungimea de rugozitate, z înălțimea măsurată deasupra cotei solului, k constanta Von Karman, având valoarea general acceptată 0.4-0.41, iar u_* este viteza de frecare și este radical din raportul între tensiunea de forfecare τ_0 și densitatea aerului ρ .

Profilul logaritmic utilizat pentru reprezentarea variației vitezei medii cu înălțimea nu este singurul, fiind utilizate și profilul exponențial (codul american ASCE, japonez AIJ, canadian NBCC, chinezesc GB, etc) și Deaves and Harris (codul britanic BS, cel australian și cel neo-zeelandez AS/NZS, sau cel internațional ISO) (E.C.C. Choi, 2009).

Legea exponențială, prezentată în 1960 de Davenport, conduce la formula generalizată (Simiu și Scanlan, 1985):

$$U(z_{g1}) = U(z_{g2}) \cdot (z_{g1}/z_{g2})^\alpha \quad (4.3)$$

unde z_{g1} și z_{g2} sunt înălțimi măsurate deasupra cotei solului, $U(z_{g1})$ și $U(z_{g2})$ sunt vitezele medii ale vântului la înălțimile specificate, iar α exponent determinat experimental, dependent de rugozitatea terenului, denumit și exponent Hellman, având valoarea 1/7 în anumite condiții, atmosferă neutră, teren deschis (Von Karman, 1921).

Legea Deaves and Harris (1978) este una logaritmică și polinomială, generalizată și aplicabilă pentru întreg stratul limită atmosferic:

$$U(z) = \frac{1}{k} \cdot u_* \cdot \left[\ln(z/z_0) + 5.75(z/h) - 1.88(z/h)^2 - 1.33(z/h)^3 + 0.25(z/h)^4 \right] \quad (4.4)$$

unde h este înălțimea stratului cu atmosferă neutră.

Componenta fluctuantă $u'(z, t)$, spre deosebire de componenta medie a vitezei $u_m(z)$, care e reprezentată de o funcție deterministă, este reprezentată de un proces aleator staționar gaussian. Componenta fluctuantă sau turbulentă a vitezei vântului, este reprezentată în fapt de dispersia fluctuației vitezei instantanee față de medie, proces care este aleator și de medie zero.

- *Acțiunea vântului asupra construcțiilor cu răspuns dinamic*

Aplicarea teoriei cvasi-staționarității în procesul de evaluare a acțiunii temporale instantanee a vântului se cuantifică prin ipoteza că fluctuația presiunii vântului pe o construcție dată, urmărește și este fidel legată de fluctuația vitezei vântului în sens longitudinal, în fața aceleiași construcții:

$$q(z, t) = q_m(z) + q'(z, t) \quad (4.5)$$

În 1967, Davenport definește Metoda Factorului de Răspuns la Rafală, răspunsul fiind considerat deplasarea:

$$x_{\max}(z) = x_m(z) \cdot G_x \quad (4.6)$$

unde x_m este deplasarea medie aferentă vitezei medii a vântului calculată la o înălțime z , iar G_x este factorul de rafală, având expresia:

$$G_x = 1 + 2g_x \cdot I_u \cdot \sqrt{(B_x^2 + R_x^2)} \quad (4.7)$$

unde g_x este factorul de vârf pentru răspuns deplasare, I_u intensitatea turbulenței în sensul acțiunii vântului, B_x^2 este factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static), ce evaluează corelația presiunilor din vânt pe suprafața construcției (componenta nerezonantă a răspunsului), iar R_x^2 este factorul de răspuns rezonant, ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural, produse de conținutul de frecvențe al turbulenței, în cvasirezonanță cu frecvența proprie fundamentală a structurii (componenta rezonantă a răspunsului).

În privința forțelor provenite din acțiunea vântului, în mod similar, $F(t) = F_m + F'(t)$, suma componentei medii și a celei fluctuante turbulente acționând bidirecțional, în lungul acțiunii vântului și transversal. Astfel, în mod analog, forța static echivalentă care produce răspunsul maxim are expresia:

$$F_{St.Eq.x}(z) = F_m(z) \cdot G_x \quad (4.8)$$

unde $F_m(z)$ este forța medie aferentă vitezei medii a vântului calculată la înălțimea z , iar G_x este factorul de rafală definit prin relația (4.32)

În codurile de proiectare la vânt, precum cel românesc sau italian, forța static echivalentă provenită din vânt și care acționează asupra construcțiilor cu răspuns dinamic, este exprimată în funcție de un coeficient de răspuns dinamic, astfel:

$$Acțiunea static echivalentă = Acțiunea aerodinamică de vârf \cdot c_d$$

unde c_d este coeficientul de răspuns dinamic și este în fapt raportul între factorii de rafală G_x/G_p (răspuns deplasare, respectiv presiune). Astfel, expresia acestui coeficient devine:

$$c_d = \left[1 + 2g_x \cdot I_u \cdot \sqrt{(B_x^2 + R_x^2)} \right] / (1 + 2g_u \cdot I_u) \quad (4.9)$$

Modelarea caracteristicilor Furtunilor, Uraganelor și Tornadelor

Deși codurile actuale sunt în mod covârșitor calate pe studierea și evaluarea acțiunii vântului provenit din fenomene ciclonice, depresiuni, în ultimul timp, pe plan mondial, există o preocupare reală pentru culegerea și prelucrarea de date în vederea evaluării acțiunii vântului provenit din furtuni, dar și pentru modelare, dezvoltarea și aplicarea ulterioară a unor metode solide de evaluare a acestora (experimentale, numerice, analitice). Conform NOAA, 2005 (Ghidul Meteorologic Federal nr.1), o furtună începe când a) un tunet este auzit, b) un fulger este văzut la stația meteo și zgomotul local acoperă încă zgomotul tunetului, sau c) fulgerul este detectat de un senzor automat. În același timp furtuna se încheie la 15 minute după ultima apariție a oricăruia din semnele susmenționate.

În cadrul procesului de evaluare a acțiunii vântului provenit din furtuni, este important de menționat că dacă în cazul fenomenelor ciclonice componenta fluctuantă este reprezentată de un proces aleator staționar și gaussian, în cazul furtunilor, acestea sunt fenomene non-staționare și non-gaussiene.

Modelarea furtunilor

Dacă în cazul evenimentelor tip cicloni avem expresia consacrată $U(t) = u_m + u'(t)$, în cazul furtunilor componenta constantă u_m se înlocuiește cu una funcție de timp, rezultând relația:

$$U(t) = u_m(t) + u'(t) \quad (4.10)$$

Pentru această componentă se utilizează conceptul de fereastră mobilă de 30 secunde, determinându-se o viteză medie (30sec short time mean velocity).

Evaluarea răspunsului dinamic al structurilor la furtuni

Dacă în cazul vântului sinoptic, pentru evaluarea răspunsului dinamic, este necesară evaluarea coeficientului de răspuns dinamic c_d exprimat în funcție de densitatea spectrală de putere, în cazul furtunilor, urmărind modelul unor acțiuni excepționale, seism, explozie, se utilizează noțiunea conceptual diferită de spectru de răspuns S_d , unde $S_d = d_{max}(n_0, \zeta)$.

Analiza în paralel a fenomenelor tip cicloni și a celor tip furtuni, arată mai multe diferențe, ce conduc către separarea completă a acestora:

- faptul că rugozitatea este importantă în evaluarea acțiunii vântului provenit din cicloni, însă nu și la furtuni, influența diferită a topografiei terenului sau a temperaturilor straturilor de aer;
- în cazul fenomenelor ciclonice, componenta fluctuantă este reprezentată de un proces aleator staționar și gaussian, în cazul furtunilor, acestea sunt fenomene non-staționare și non-gaussiene;
- aplicarea factorilor direcționali (prezenți în codurile avansate) calibrați pentru evenimente tip cicloni, nu conduce la rezultate corecte în cazul furtunilor (la acestea direcțiile se schimbă rapid, aleator);

- la calculul la starea limita ultimă (SLU) se utilizează coeficienți de grupare și factori de siguranță în funcție de tipul, natura încărcărilor, iar acțiunile provenite din cicloni, respectiv furtuni sunt diferite;
- pentru construcții joase și de înălțime medie, furtunile pot juca un rol important în dimensionarea structurală, în timp ce pentru structuri înalte (ex. peste 80-100m) acțiunea vântului din cicloni dimensionează elementele structurale.

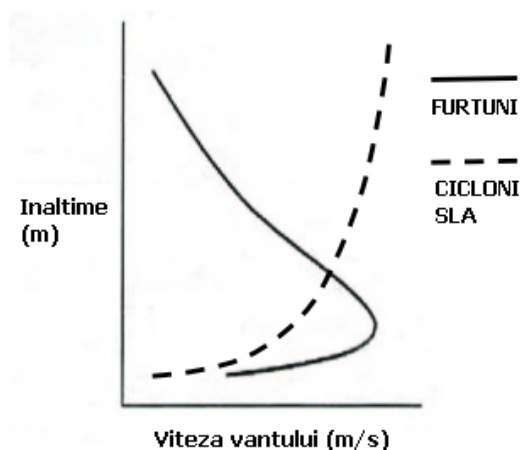


Fig. 4.1 Prezentarea comparativă a profilelor vitezelor din furtuni și cicloni, (E.C.C.Choi, 2009)

O soluție pentru eliminarea neajunsurilor generate de diferențele fundamentale dintre evenimentele meteo staționare și gaussiene și cele non-staționare și non-gaussiene a fost propusă de Solari et al, în 2016, prin luarea în calcul a două cazuri distincte de încărcări privind acțiunea vântului asupra structurilor, unul (cel clasic) pentru evenimente sinoptice tip cicloni având presiunea static echivalentă $Q_1 = (1/2) \cdot \rho \cdot u_m^2 \cdot G_p$ și unul pentru evenimente non-sinoptice, cum sunt și furtunile, având presiunea static echivalentă $Q_2 = (1/2) \cdot \rho \cdot \hat{y}^2 \cdot S_d$.

4.2. Coduri pentru proiectarea la vânt a construcțiilor

În cadrul prezentului subcapitol, s-au analizat comparativ viteza de bază în coduri, cum ar fi cele din SUA, Canada, China, Italia, România, precum și principalele prevederi cu referire la calculul specific al încărcărilor de calcul provenite din vânt, conform codurilor *CRI-I-4/2012*, *CNR-DT 207/2008* și *SR EN1991-1-4:2006 (EC1)*, respectiv *P100-1/2013*, pentru seism. În acest subcapitol sunt prezentate și câteva prescripții tehnice relevante, specifice pilonilor de iluminat sau altor elemente tip consolă verticală flexibilă.

Viteza de bază a vântului în diferite Coduri de proiectare din România, UE, SUA

La baza obținerii valorilor de vârf ale vitezelor/presiunilor dinamice din vânt și ulterior a forțelor/presiunilor ce acționează asupra construcțiilor, stau valorile de referință ale vitezei vântului, respectiv ale presiunii dinamice a vântului. Aceste valori specificate în hărți de zonare, au anumite caracteristici, cum ar fi intervalul de mediere, înălțimea de determinare, categoria de teren considerată, probabilitatea de depășire (corespunzând unui interval mediu de recurență). În vederea comparării din punctul de vedere al prevederilor referitoare la valorile de referință ale vitezei vântului au fost studiate următoarele coduri de proiectare:

- CR-1-1-4/2012, Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor, România;
- CNR-DT 207/2008, Ghid pentru evaluarea acțiunii vântului și a efectelor acestuia asupra structurilor, Italia;
- NBCC 2010, Codul National al Construcțiilor. Încărcări provenite din vânt și efecte ale acestuia, Canada;
- ASCE 7-10, Încărcări de proiectare pentru construcții și alte structuri. Cap 26-31, Încărcări provenite din vânt, SUA;
- GB 50009-2012, Cod privind evaluarea încărcărilor pentru proiectarea structurilor aferente construcțiilor, China.

Tab.4.1 Tabel comparativ cu intervalele de mediere a vitezei de referință a vântului și cu intervalele medii de recurență ale valorilor acestora.

Cod tara	CR-1-1-4/2012, Romania	CNR-DT 207/2008, Italia	NBCC-2010, Canada	ASCE 7-10, USA	GB50009-2012, China
Interval mediere viteza ref vant	10 minute	10 minute	1 ora	3 secunde	10 minute
IMR	50 ani	50 ani	50 ani	300/700/1700 ani	50 ani

Prevederi de proiectare referitoare la piloni de iluminat și alte structuri de tip consolă verticală

- Normele EN40, EN1993-3, EN1998-6 și AASHTO2009/LRD LTS-2015

Colecția de europeană de norme EN40 Stâlpi pentru iluminat public, adoptată și în România (SR EN40:2003 modificată în 2013) cuprinde 7 părți, incluzând Termeni și definiții, Cerințe generale și dimensiuni, Proiectare și verificare (încărcări caracteristice, verificări prin încercări și calcul), Cerințe pentru stâlpi din beton și beton precomprimat, din oțel, din aluminiu, sau pentru stâlpi compoziți din polimeri armați cu fibre. Această colecție de norme se referă însă strict la proiectarea stâlpilor / pilonilor cu braț / coroană cu înălțime maximă de 20m și oferă un calcul simplificat.

Conform părții 3, capitolul 1, EN40-3-1/2013 (SR EN40-3-1), Proiectare și verificare. Specificație pentru încărcări caracteristice, presiunea caracteristică a vântului calculată la o înălțime z deasupra solului, este definită prin:

$$q(z) = \delta \cdot \beta \cdot f \cdot C_e(z) \cdot q(10) \quad (4.11)$$

unde $q(10)$ este presiunea de referință a vântului cu expresia:

$$q(10) = (1/2) \cdot \rho \cdot C_s^2 \cdot V_{ref}^2 \quad (4.12)$$

δ factor dependent de înălțimea pilonului, β factor dependent de comportarea dinamică a pilonului, f factor topografic și $C_e(z)$ factor dependent de teren și înălțimea față de sol, z , iar C_s este un factor de conversie a vitezei de referință cu interval de recurență (IMR) de 50ani în viteze similare cu alt interval de recurență; pentru piloni de iluminat obișnuiți IMR este de 25

de ani. Viteza de referință a vântului mediată pe 10minute, la înălțimea de 10m deasupra terenului categoria II, cu IMR 50ani, probabilitate anuală de depășire de 2% este produsul dintre un factor de altitudine și valoarea de bază a vitezei de referință la $z=10m$.

Forța orizontală provenită din vânt se exprimă:

$$F_c = A_c \cdot c \cdot q(z) \quad (4.13)$$

unde A_c este aria în proiecție perpendiculară pe direcția vântului, $q(z)$ exprimat anterior și c coeficient de formă (secțiuni octogonale sau asimilate circulare) determinat grafic în funcție de numărul lui Reynolds Re .

O particularitate a *EN40* o reprezintă valoarea coeficienților parțiali de siguranță pentru combinarea acțiunilor, prevăzuți de *EN40-3-3/2013*, pentru încărcări din vânt valoarea 1.2 pentru piloni clasa B și 1.4 pentru cei clasa A, iar pentru încărcări permanente valoarea este unică, 1.2 (verificări la SLU).

La calculul pilonilor de iluminat cu structură poligonală din tablă de oțel care nu intră sub incidența *EN40*, cu înălțimi mai mari de 20m, sau al altor structuri tip consolă verticală similare, coduri de proiectare aplicabile sunt *EN1993-3-1* și *EN1993-3-2:2007*, *EC3*, *Proiectarea structurilor de oțel. Turnuri, Piloni și Cosuri* și *EN1998-6-2005*, *EC8*, *Proiectarea structurilor pentru rezistență la cutremur. Turnuri, Piloni și Cosuri* (adoptate și în România ca *SR EN1993/1998*).

În SUA în domeniul pilonilor de iluminat există norma *AASHTO 2009 Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*, Fifth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, completată și modificată în 2015 de *AASHTO LRD LTS 2015*.

Fiind o normă americană, variația vitezei cu înălțimea este descrisă de un profil exponențial.

În cazul pilonilor de iluminat, durata de viață proiectată specificată de normă este de 50ani.

Presiunea de proiectare provenită din acțiunea vântului asupra pilonilor are expresia preluată din norma *ASCE/SEI 7*:

$$P_z = 0.613 \cdot K_z \cdot G \cdot V^2 \cdot I_r \cdot C_D \quad (N/m^2) \quad (4.14)$$

Factorul de expunere, echivalent al factorului de rugozitate $c_r(z)$, are expresia:

$$K_z = 2.01 \cdot \left(z/z_g \right)^{2/\alpha} \quad (4.15)$$

unde V este valoarea de bază a vitezei de referință a vântului, conform zonare (m/s), z este înălțimea la care se face evaluarea, z_g și α parametri constanți în funcție de condițiile de expunere (categoria de teren);

Coeficientul de importanță-expunere la vânt I_r , (val. în intervalul 0.54 – 1.15) este stabilit în funcție de intervalul mediu de recurență (IMR) ales și de zona de expunere (cu sau fără uragane cu valori de bază ale vitezelor de referință ale vântului $V > 45m/s$);

Factorul G de efect la rafală are o valoare minimă de 1.14, pentru valori ale vitezei vântului mediate pe 3sec.

În privința acțiunii cutremurelor, norma *EN1998-6*, punctul 3.3, comportarea elastică până la Starea Limită Ultimă poate fi considerată adecvată, valoarea factorului de comportare fiind astfel $q < 1.5$, valoarea unitară fiind de partea siguranței.

- *Codul de proiectare CR 1-1-4/2012*

Variația vitezei medii a vântului cu înălțimea deasupra terenului produsă de rugozitatea acestuia, conform codului românesc *CR1-1-4/2012*, este reprezentată de un profil logaritm.

Forța din vânt se poate determina în două moduri, ca forță globală depinzând de coeficienți aerodinamici de forță, sau prin sumarea presiunilor ce acționează pe suprafețe, utilizând coeficienți aerodinamici de presiune. Astfel, Forța globală static echivalentă pe direcția vântului F_w care acționează asupra unei construcții sau unui element structural se poate determina cu relațiile:

$$F_w = \gamma_{lw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (4.16)$$

$$F_{w,e} = c_d \cdot \sum_{\text{supraf.}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} \quad (4.17)$$

unde $q_p(z)$ este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la cota z ; $z_{e,i}$ este înălțimea de referință pentru presiunea exterioară/interioară; c_d este coeficientul de răspuns dinamic al construcției; c_f este coeficientul aerodinamic de forță pentru construcție sau element structural; γ_{lw} este factorul de importanță – expunere; A_{ref} este aria de referință orientată perpendicular pe direcția vântului, pentru construcție sau element structural, iar $w_e(z)$ este presiunea vântului care acționează pe o suprafață exterioară la înălțimea z .

Valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului $q_p(z)$ se determină după cum urmează:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.18)$$

unde q_p este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului; q_b este valoarea de referință a presiunii dinamice a vântului (pentru aer standard); $c_e(z)$ este factorul de expunere calculat ca produs între factorul de rafală și pătratul factorului de rugozitate, dependent de tipurile de teren.

- *Codul de proiectare CNR-DT 207/2008*

În privința evaluării acțiunii vântului, codul italian, ca și celelalte coduri de proiectare, pornește de la valori de bază, de referință, medii și de vârf, pentru viteze și presiuni.

Valoarea de vârf a presiunii aferentă acțiunii vântului $q_p(z)$ este definită de expresia:

$$q_p(z) = (1/2) \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c_e(z) \quad (4.19)$$

unde $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, densitatea medie a aerului, v_r este viteza de referință de proiectare, iar $c_e(z)$ este factorul de expunere (similar celui din codul românesc).

Presiunile ce acționează pe o suprafață exterioară oarecare $p_e(z)$, respectiv pe una interioară $p_i(z)$, sunt definite de relațiile:

$$p_e(z) = q_p(\bar{z}_e) \cdot c_{pe}; p_i(z) = q_p(\bar{z}_i) \cdot c_{pi} \quad (4.20)$$

unde $c_{pe,i}$ sunt coeficienți de presiune exterioară, respectiv interioară, iar $z_{e,i}$ sunt înălțimi de referință asociate coeficienților de presiune menționați anterior.

În privința exprimării acțiunii de vârf a vântului prin intermediul forțelor globale și a momentelor, aceasta se face prin seturile de forțe F_X, F_Y, F_Z și de momente M_X, M_Y, M_Z :

$$F_X = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FX}; F_Y = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FY}; F_Z = q_p(\bar{z}) \cdot L^2 \cdot c_{FZ} \quad (4.21)$$

$$M_X = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MX}; M_Y = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MY}; M_Z = q_p(\bar{z}) \cdot L^3 \cdot c_{MZ} \quad (4.22)$$

Acestea sunt definite în funcție de presiunea de vârf a vântului, de coeficienți de forță, respectiv de moment, funcție de axele X,Y (în plan, în mod uzual X direcția de acțiune a vântului, iar Y perpendiculară pe aceasta), Z (în mod uzual axa reprezentând înălțimea) și înălțimea de referință și lungimea asociate coeficienților de forță, respectiv de moment.

În mod similar, pentru structuri zvelte, exprimarea acțiunii de vârf a vântului poate fi făcută prin intermediul forțelor și momentelor exprimate pe unitatea de lungime:

$$f_x(z) = q_p(z) \cdot l \cdot c_{fx}; f_y(z) = q_p(z) \cdot l \cdot c_{fy}; m_z(z) = q_p(z) \cdot l^2 \cdot c_{mz} \quad (4.23)$$

unde q_p este valoarea de vârf a presiunii provenită din vânt, z este înălțimea deasupra terenului, l dimensiune structură, iar $c_{fx,y}$, c_{mz} sunt coeficienți aerodinamici de forță, respectiv de moment. Forța globală static echivalentă pe direcția vântului se obține prin multiplicarea forței provenită din viteza de vârf cu coeficientul dinamic c_{dD} .

- Codul de proiectare SR EN1991-1-4:2006

Valoarea de vârf a presiunii vitezei vântului este dată de relația:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b(z) \quad (4.24)$$

unde $c_e(z)$ este denumit coeficient de expunere.

Presiunile vântului w ce acționează pe suprafețe exterioare/interioare ale unei construcții au expresiile:

$$w_i = c_{pi} \cdot q_p(z_i); w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e) \quad (4.25)$$

Forța globală static echivalentă pe direcția vântului F_w exterioară/interioară care acționează asupra unei construcții sau unui element structural se determină cu relațiile:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{supraf.}} w_e(z_e) \cdot A_{ref} \quad (4.26)$$

$$F_{w,i} = \sum_{\text{supraf.}} w_i(z_i) \cdot A_{ref} \quad (4.27)$$

unde $c_s c_d$ este factorul structural.

4.3. Acțiunea seismică pentru proiectare

În vederea evaluării acțiunii provenită din cutremur și efectelor acesteia asupra structurilor, metodele utilizate în mod uzual sunt cele de tip static liniar. Conform codului românesc de proiectare seismică P100-1/2013 au fost alese metoda forțelor static echivalente și metoda de calcul modal cu spectre de răspuns.

În cazul metodei forțelor static echivalente, în mod general, forța taietoare de bază se determină cu relația:

$$F_b = \gamma_{l,e} \cdot S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (4.28)$$

unde $\gamma_{l,e}$ este coeficientul de importanță-expunere al structurii la cutremur, $S_d(T_1)$ este ordonata spectrului de proiectare pentru modul 1 de vibrație (perioada T_1), m este suma maselor de nivel (masa totală a structurii), iar λ este un factor ce ține seama de aportul modului fundamental prin masa modală asociată, cu valoarea 0.85 pentru $T_1 \leq T_C$ și 1.0 pentru alte cazuri.

În cazul calculului modal cu spectre de răspuns estimarea forței taietoare de bază evaluată pe direcția de acțiune a cutremurului se determină cu relația:

$$F_{b,k} = \gamma_{l,e} \cdot S_d(T_k) \cdot m_k \quad (4.29)$$

unde T_k este perioada proprie asociată modului k de vibrație, iar m_k masa efectivă asociată modului de vibrație k .

Spectrul de proiectare pentru componenta orizontală ale mișcării terenului este dat de:

$$S_d(T) = a_g \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{\beta}{q} - 1 \right) / T_B \right] \cdot T \right\} \quad \text{pentru } 0 < T \leq T_B$$

$$S_d(T) = a_g \cdot [\beta(T)/q] \geq 0.2 \cdot a_g \quad \text{pentru } T > T_B \quad (4.30)$$

unde q este factorul de comportare al structurii, T_B perioada de control egală cu $0.2T_C$ (perioada de colț), β_0 este factorul de amplificare dinamică maximă cu valoarea 2.5, $\beta(T)$ este spectrul normalizat de răspuns elastic al accelerațiilor absolute, T perioada de vibrație structurii, iar a_g este valoarea de vârf a accelerației terenului, pentru proiectare, cu IMR de 225 ani. În mod similar, spectrul de proiectare pentru componenta verticală a acțiunii cutremurului, se definește în funcție de accelerația $a_{vg}=0.7a_g$, de spectrul normalizat de răspuns elastic pentru componenta verticală a mișcării terenului $\beta_v(T)$ perioadele de control și de q este factorul de comportare al structurii cu valoare 1.5.

În privința verificării deplasărilor laterale, la starea limită de serviciu SLS, se aplică relația:

$$d_{SLS} = v \cdot q \cdot d_e < d_{adm} \quad (4.31)$$

unde v este un factor de reducere, pentru SLS cu valoarea 0.5, d_e deplasarea determinată prin calcul static elastic, iar d_{adm} deplasarea admisibilă poate fi considerată având valoarea 0.01H.

4.4. Studiu de caz. Acțiunea dinamică a vântului și cutremurului asupra pilonilor de iluminat din incinta Aeroportului Internațional Iași

Evaluarea forțelor ce acționează asupra pilonului obiect al studiului s-a realizat în conformitate cu codurile *CR1-1-4/2012*, *CNR-DT 207/2008* și *SR EN1991-1-4:2006* pentru acțiunea vântului și *P100-1/2013* pentru acțiunea seismică, prezentate anterior. Gruparea încărcărilor și valorile coeficienților parțiali de siguranță și ai factorilor de grupare au fost aleși urmărind prescripțiile *CR0-2012*, *Cod de proiectare. Bazele proiectării construcțiilor*.

În vederea evaluării acțiunii gheții și efectelor sale asupra structurii a fost aleasă o grosime potențială a stratului de 10mm dispusă perimetral, clasa G1, conform normei *ISO12494*, recunoscută și aplicată internațional.

Acțiunea vântului. Aplicarea codurilor *SR EN1991-1-4:2006*, *CR 1-1-4/2012* și *CNR-DT 207/2008*

Pentru uniformizarea calculului privind acțiunea vântului și a efectelor sale, a fost aleasă în mod acoperitor categoria II de teren. Acest lucru corespunde valorii lungimii de rugozitate $z_0=0.05m$ și $z_{min}=2m$ pentru calculul conform *CR1* și *SR EN1991* și $z_0=0.05m$, $z_{min}=4m$, conform *CNR-DT*. Conform codului *CR1*, presiunea de referință a vântului în zona Iași este $q_b=0.7Kpa$, IMR 50 de ani (viteză de referință $v_b=33.47m/s$) și a fost aplicată în cazul calculului conform *CR1* și *CNR-DT*. În cazul calculului conform *SR EN1991*, a fost utilizată harta din anexa națională, unde pentru zona Iași $v_{b,0}=35m/s$, IMR/ T_R de 50 de ani.

Tab.4.2 Tabel comparativ cu Forța globală provenită din vânt $F_w(z)$, cu luarea în considerare a răspunsului dinamic structural, conform codurilor CR1, CNR-DT, EC1.

Nr. crt.	Denumire parametru	Cod CR1-1-4-2012 (RO)	Cod CNR-DT 207/2008 (ITA)	EC1-SR EN1991-1-4:2006
1	înălțimea de referință $z_s, e=0.6 \cdot h$ (m)	18	18	18
2	$v_m(z_e)$ (m/s)	37.235	37.435	39.142
3	$v_p(z_e)$ (m/s)	60.792	59.709	62.431
4	$I_v(z_e)$	0.181	0.170	0.170
5	lungimea scării integrale a turbulenței $L(z_e)$ (m)	85.768	85.768	85.768
6	frecvența structurii în modul fundamental n_1 (Hz)	0.750	0.750	0.750
7	* numărul lui Reynolds Re	$1.533 \cdot 10^6$	$0.669 \cdot 10^6$	$1.574 \cdot 10^6$
8	coeficientul aerodinamic de forță $c_{f,o}$	1.066	1.120	1.066
9	factorul efectului de capăt Ψ_λ	0.910	0.957	0.910
10	coeficientul final aerodinamic de forță c_f	0.970	1.072	0.970
11	amortizarea structurală ξ_s (mod1)	-	0.002	-
12	** amortizarea aerodinamică ξ_a (mod1)	-	0.026	-
13	decrementul log al amortizării structurale δ_s (mod1)	0.012	-	0.012
14	decrementul log al amortizării aerodinamice δ_a (mod1)	0.149	-	0.156
15	densitatea spectrală de putere $SL(z_e, n)$	0.090	0.089	0.090
16	factorul de răspuns nerezonant B^2	0.681	0.681	0.681
17	funcția de corelație verticală R_h	0.295	0.330	0.307
18	funcția de corelație transversală R_b	0.980	0.980	0.979
19	factorul de răspuns rezonant R^2	0.798	0.799	0.814
20	frecvența medie așteptată a vibrațiilor v (Hz)	0.551	0.551	0.553
21	factorul de varf k_p (gd)	3.575	3.576	3.584
22	coef. de răspuns dinamic c_d / factorul struct. $c_s \cdot c_d$	1.136	1.132	1.137
23	*** produsul $c_f \cdot c_d$	1.102	1.214	1.103
24	forța globală provenită din acțiunea vântului F_w (N/ml)	$27.768 \cdot \ln(z/0.05) \cdot [\ln(z/0.05) + 7.448] \cdot b(z)$	$30.671 \cdot \ln(z/0.05) \cdot [\ln(z/0.05) + 7] \cdot b(z)$	$30.483 \cdot \ln(z/0.05) \cdot [\ln(z/0.05) + 7] \cdot (b_z)$

**În cazul neluării în considerare a amortizării aerodinamice, coeficientul de răspuns dinamic are o creștere importantă;

Dupa evaluarea presiunii de vârf, în cadrul studiului au fost calculați toți parametrii necesari obținerii forței globale provenită din vânt, ținând cont și de răspunsul dinamic structural reprezentat de coeficienții $c_d / c_s \cdot c_d$. În urma evaluării forțelor static echivalente, se remarcă valorile apropiate obținute prin utilizarea celor trei coduri de proiectare, cea mai mare valoare fiind totuși obținută prin aplicarea codului italian CNR-DT. În acest caz, coeficientul aerodinamic de forță c_f , cât și produsul $c_f \cdot c_d$ sunt cu circa 10% mai mari ca în cazul aplicării celorlalte coduri de proiectare.

Acțiunea seismică conform codului P100-1/2013

Conform hărților de zonare din codul P100-1/2013, amplasamentul studiat, zona Iași, este caracterizat de următorii parametri: accelerația de proiectare $a_g = 0.25g$, perioadele de control $T_B = 0.14\text{sec}$, $T_C = 0.7\text{sec}$, $T_D = 3.0\text{sec}$, $\beta_0 = 2.5$. Parametri ai pilonului: $T_1 = 1.33\text{sec}$, $\lambda = 1.0$, iar greutatea structurii $G = 56.70\text{ kN}$.

În evaluarea acțiunii cutremurului, în cazul pilonului studiat, a fost ales un factor de comportare structural de valoare unitară ($q=1$), cu calcul efectuat în domeniul elastic.

În acest caz, cum $T_1 > T_B$ și $T_C < T_1 \leq T_D$, unde $\beta(T) = \beta_0 (T_C/T_1)$, se obțin valorile lui $S_d(T_1) = 0.329g$, respectiv $F_b = 0.329 G = 18.65 \text{ kN}$. Aplicarea metodei de calcul modal cu spectre de răspuns a presupus generarea spectrelor normalizate și de răspuns elastic al accelerațiilor, vitezelor și deplasărilor, pentru componentele orizontale și verticală. Întrucât $q=1$, spectrul de proiectare considerat este elastic.

5. RĂSPUNSUL DINAMIC LA VÂNT ȘI CUTREMUR AL STRUCTURILOR ÎNALTE/FLEXIBILE

5.1. Răspunsul dinamic la acțiunea vântului

Considerații generale privind răspunsul dinamic la vânt

O sintetizare a procesului de evaluare a acțiunii vântului și a efectelor acestuia a fost făcută în 1965 de Alan Davenport. Această sintetizare sub forma unui lanț, prezintă combinarea efectelor climatului local de vânt din amplasament descris în termeni statistici, efectelor topografiei și rugozității, efectului caracteristicilor și răspunsului dinamic al construcției sub acțiunea vântului și aeroelasticității.

Mărimile urmărite în procesul de evaluare a acțiunii vântului dar și a efectelor acestuia asupra construcțiilor sunt $U(t)$ – viteza vântului, $F(t)$ – forța generată de vânt pe o construcție și $X(t)$ – răspunsul produs de acțiunea vântului. Toate mărimile au în final o componentă medie și una fluctuantă față de media respectivă, reprezentată ca proces staționar stohastic și de medie zero, cu variabilitate raportată la timp:

$$U(t) = u_m + u'(t); F(t) = f_m + f'(t); X(t) = x_m + x'(t) \quad (5.1)$$

Acțiunea vântului asupra construcțiilor, este reprezentată în literatura de specialitate prin valorile de vârf ale presiunilor sau forțelor static echivalente provenite din vântul sinoptic și care acționează asupra construcțiilor. În cazul construcțiilor cu răspuns dinamic relevant, valorile de vârf susmenționate sunt multiplicare cu coeficientul de răspuns dinamic:

$$\text{Acțiunea static echivalentă} = \text{Acțiunea aerodinamică de vârf} \cdot c_d$$

În vederea determinării răspunsului structural, se introduc noțiunile de funcție de admitanță aerodinamică $\chi(n)$ și de funcție de transfer a structurii $H(n)$.

Dacă exprimăm forța f în mod analog presiunii și apoi deplasarea x în mod analog forței, pentru răspunsul deplasare obținem:

$$f(t) = f_m + g_f \cdot \sigma_f = f_m \cdot [1 + g_f \cdot \sigma_f / f_m] = f_m \cdot G_f \quad (5.2)$$

$$x(t) = x_m + g_x \cdot \sigma_x = x_m \cdot (1 + g_x \cdot \sigma_x / x_m) = x_m \cdot G_x \quad (5.3)$$

unde $G_f = 1 + 2 \cdot g_f \cdot I_u \cdot B$, $G_x = 1 + 2 \cdot g_x \cdot I_u \cdot \sqrt{(B^2 + R^2)}$, (G factori de rafală), în care B este factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static), ce evaluează corelația presiunilor din vânt pe suprafața construcției (componenta nerezonantă a răspunsului), în timp ce R este factorul de răspuns rezonant, ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural,

produse de conținutul de frecvențe al turbulenței, în cvasirezonanță cu frecvența proprie fundamentală a structurii (componenta rezonantă a răspunsului).

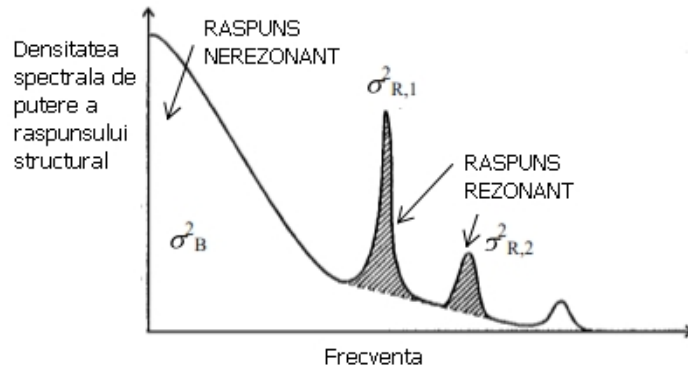


Fig. 5.1 Evaluarea densității spectrale de putere a răspunsului unei structuri oarecare cu componentă rezonantă semnificativă. $\sigma^2_x = \sigma^2_B + \sigma^2_R$, (Davenport, 1963)

Factorul de vârf g_x pentru determinarea răspunsului maxim al unei structuri pe direcția vântului turbulent, definit ca raportul dintre valoarea maximă a componentei fluctuante a răspunsului structurii și abaterea sa standard, este exprimat prin relația, (Davenport, 1961):

$$g_x = \sqrt{2 \ln(\nu_x T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(\nu_x T)}} \quad (5.4)$$

unde ν_x este frecvența medie a vibrațiilor structurii, $\nu_x \approx n_0 \sqrt{R^2 / (B^2 + R^2)}$, T este intervalul de timp pentru care se determină valoarea maximă a răspunsului structural, iar 0.5772 este constanta lui Euler.

La structuri cu flexibilitate apreciabilă (coșuri de fum, antene de comunicații, piloni de iluminat, cu structuri metalice, etc) datorită dezvoltării fenomenelor aeroelastice, se produce un răspuns aeroelastic al structurii, în cadrul căruia trebuie analizate cât mai multe moduri de vibrație, cele superioare putând avea o contribuție ce nu poate fi neglijată.

Coeficientul de răspuns dinamic c_d se poate exprima, pornind de la relația *Acțiunea static echivalentă = Acțiunea aerodinamică de vârf* $x c_d$, de la definițiile ale presiunilor, forțelor și deplasărilor (presiunea maximă locală $Q = q_m \cdot G_p$, presiunea static echivalentă $Q_{st,ech} = q_m \cdot G_x$, $Q_{st,ech} = q_m \cdot G_x = q \cdot G_p \cdot G_x / G_p = Q \cdot G_x / G_p$) și cea a factorilor de răspuns la rafală G , prin următoarea expresie:

$$c_d = G_x / G_p = \left[1 + 2g_x \cdot I_u \cdot \sqrt{(B^2 + R^2)} \right] / (1 + 2g_u \cdot I_u) \quad (5.5)$$

Variația factorului de răspuns la rafală, în funcție de caracteristicile structurii, frecvență, amortizare, mărime, este caracterizată după cum urmează:

- structură mică cu amortizare și frecvență mici, conduce la factor de rafală Gx mare (>1);
- structură mică cu amortizare și frecvență mari, conduce la factor de rafală $Gx \approx 1$;
- structură mare cu amortizare și frecvență mici, conduce la factor de rafală $Gx \approx 1$;
- structură mare cu amortizare și frecvență mari, conduce la factor de rafală Gx mic (<1).

Răspunsul dinamic la vânt al structurilor, conform codurilor de proiectare SR EN1991-1-4:2006, CR 1-1-4/2012 și CNR-DT 207/2008

În codurile românesc și italian, coeficientul de răspuns dinamic notat c_d , respectiv c_{dD} , ia în considerare atât amplificarea efectelor vântului datorită vibrațiilor structurii cvasirezonante cu conținutul de frecvență al turbulenței, cât și reducerea efectelor vântului datorită apariției nesimultane a valorilor de vârf ale presiunii vântului care acționează pe suprafața construcției, flexibilitatea structurală, masa, amortizarea reduse conducând la o amplificare crescută. În codul SR EN1991, factorul structural $c_s c_d$ pentru structuri tip consolă verticală flexibilă este în fapt produsul dintre factorul de dimensiune c_s și factorul dinamic c_d . Expresiile pentru coeficientul de răspuns dinamic, raport al factorilor de rafală G_x deplasare/ G_p presiune, sunt similare:

$$c_d = c_{dD} = c_s c_d = \left[1 + 2 \cdot \text{factor de varf} \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{(B^2 + R^2)} \right] / \left[1 + 7 \cdot I_v(z_e) \right] \quad (5.6)$$

unde I_v este intensitatea turbulenței vântului; $z_s=0.6H$ este înălțimea de referință pentru determinarea c_d , pentru elemente tip consolă verticală flexibilă; B^2 factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static), ce evaluează corelația presiunilor din vânt pe suprafața construcției (componenta nerezonantă a răspunsului); R^2 factorul de răspuns rezonant, ce evaluează efectele de amplificare dinamică a răspunsului structural, produse de conținutul de frecvențe al turbulenței, în cvasirezonanță cu frecvența proprie fundamentală a structurii (componenta rezonantă a răspunsului), iar factorul de vârf pentru răspunsul maxim al structurii, notat cu k_p sau g_D are expresia:

$$k_p = g_D = \sqrt{2 \ln(vT)} + \gamma / \sqrt{2 \ln(vT)} \geq 3 \quad (5.7)$$

Vectorii proprii pentru primele două moduri de vibrație ale structurilor tip consolă verticală flexibilă, sunt definiți de relațiile (codurile CNR-DT 207/2008, CR1-1-4/2012 – modul1):

$$\Phi_1(z) = (z/h)^\zeta, \text{ iar } \Phi_2(z) = -5.5(z/h)^2 + 8(z/h)^3 - 1.5(z/h)^4 \quad (5.8)$$

unde ζ are valori între 0.6 și 2.5. Pentru piloni, turnuri, cosuri $\zeta=2.0$. Expresia modului 2 de vibrație se referă tot la console tip piloni, turnuri, cosuri și a fost obținută pornind de la o bază de date măsurate pe un număr relevant de cosuri metalice înalte.

Amortizarea totală ξ este definită ca:

$$\xi = \xi_s + \xi_a + \xi_d \quad (5.9)$$

unde ξ_s este componenta structurală a amortizării și depinde de tipul structurii, formă și material; ξ_d este componenta amortizării datorată prezenței unor dispozitive speciale de amortizare (exemplu tip TMD – tuned mass damper); ξ_a este componenta aerodinamică a amortizării, pentru structuri tip consolă verticală flexibilă și nu numai; amortizarea aerodinamică ξ_a aferentă modului fundamental de vibrație, se determină prin relația:

$$\xi_a = \left[c_{fx} \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s) \right] / (4\pi \cdot n_1 \cdot m_{e,1}) \quad (5.10)$$

unde, c_{fx} coeficientul de forță pe direcția vântului (pentru structuri tip consolă verticală flexibilă, $c_{fx} = c_{fx0} \psi_\lambda$, unde c_{fx0} este un coeficient aerodinamic ce ține cont de forma structurii, de tip secțiune, predefinit în coduri de proiectare, iar ψ_λ factorul de zveltețe); ρ densitatea medie a aerului, cu valoarea recomandată de 1.25 kg/mc; b lățimea structurii, perpendicular pe direcția vântului; $v_m(z_s)$ viteza medie a vântului determinată la înălțimea echivalentă z_s ; n_1

frecvența (naturală), corespunzătoare modului fundamental de vibrație; $m_{e,l}$ masa echivalentă pe unitatea de lungime, pentru modul fundamental de vibrație al structurii.

5.2. Metodele factorului generalizat de răspuns la rafală (3D GRF) și factorului generalizat de efect la rafală (3D GEF)

După anul 2000, Piccardo și Solari au arătat posibilitățile de generalizare a Metodei Factorului de Răspuns la Rafală al lui Davenport, 1967, metoda de obținere a forțelor static echivalente pe direcția x, ținându-se cont de efect sub forma de deplasare. Aceste posibilități de generalizare s-au concretizat în apariția a două seturi de formule care propun conceptual, prima (3D GRF), generalizarea direcției în privința obținerii forțelor static echivalente (direcția x este înlocuită de $\alpha = x, y, \theta$ – rotire în jurul axei z) și păstrarea efectului deplasare d , iar a doua (3D GEF), generalizarea efectului raportat la metoda 3D GRF, cu obținerea de factori de rafală G_α diferențiați pentru deplasare, moment încovoietor și forță tăietoare $[d, b(\text{sau } m), s(\text{sau } t)]$.

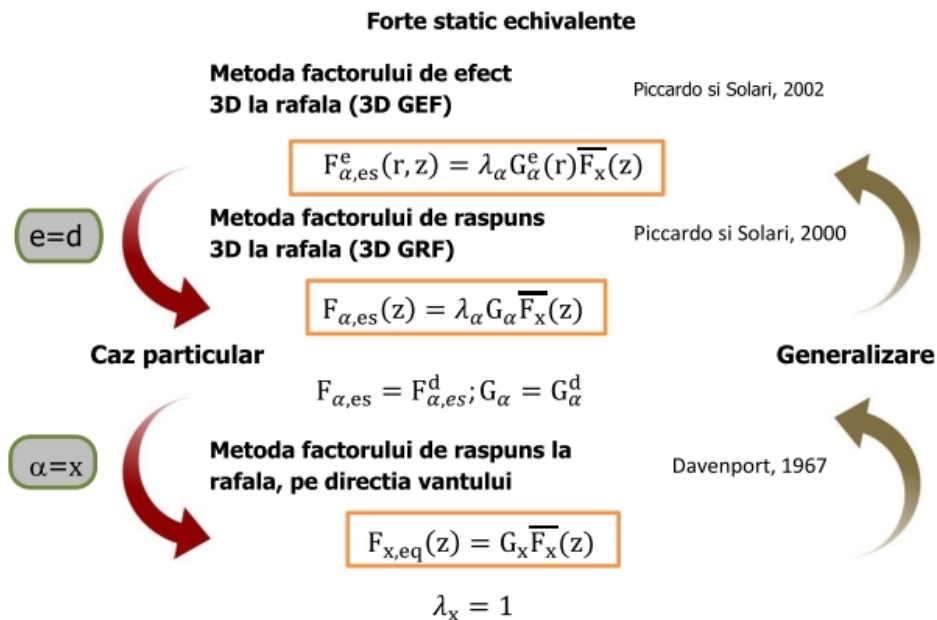


Fig. 5.2 Generalizarea Metodei Factorului de Rafală, (Piccardo și Solari, 2000, 2002).

Metoda factorului generalizat de răspuns la rafală 3D GRF (Piccardo și Solari, 2000)

În cazul metodei 3D GRF este abordat cazul unui sistem structural cu o poziție oarecare și axe proprii x, y, z, supus acțiunii vântului turbulent cu componenta medie $\bar{u}$ în lungul axelor X, x, și componentele turbulente u' laterală în lungul axei Y și w' verticală în lungul axei Z. În cazul particular în care $\alpha = x$, setul de formule aferent metodei coincide cu formulele lui Davenport (Fig.5.2), în timp ce în cazul în care $\alpha = y$ sau θ , se determină factorii de rafală diferențiați, lateral, respectiv torsional. Setul de expresii aferent metodei conduce la evaluarea factorilor G_α de rafală și a forțelor static echivalente F_α , cu $\alpha = x, y, \theta$.

Metoda factorului de efect la rafală 3D GEF (Piccardo și Solari, 2002)

În cazul metodei 3D GEF este abordat cazul unui sistem structural vertical asupra căruia vântul turbulent produce efectele e' ce pot fi deplasare d' , moment încovoietor b' (sau m), sau forță tăietoare s' (sau t). În cazul particular al efectului deplasare și al $\alpha = x$, setul de formule aferent metodei coincide cu formulele lui Davenport (Fig.5.2). Un interes deosebit

prezintă evaluarea factorilor generalizați de efect la rafală G_α^e pe direcția $\alpha = x$, diferențiat pentru efectele $e = d, b$ (sau m), s (sau t), precum și forțele static echivalente rezultate.

5.3. Răspunsul structurilor pe direcție transversală acțiunii vântului. Fenomenele de desprindere a vârtejurilor și de galopare

Fenomenul de desprindere a vârtejurilor

Pornind de la noțiunea de aeroelasticitate, aceasta este utilizată pentru a descrie în fapt interacțiunea vânt - structură ce apare când structurile ce prezintă deplasări mari, ajung să modifice curgerea aerului și fenomenele aerodinamice, care s-ar manifesta în condiții normale, de staționaritate.

Structurile de tip consolă verticală flexibilă de tipul coșurilor, turnurilor, pilonilor de iluminat sau cu destinație în domeniul telecomunicațiilor, cabluri și structuri pe cabluri, sau podurile, sunt astfel de structuri predispuse la apariția fenomenelor aeroelastice.

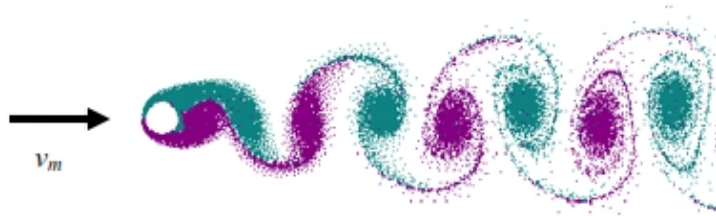


Fig. 5.3 Fenomenul de apariție a vârtejurilor Von Karman pentru structuri cu secțiune circulară.

Fenomenul de cvasirezonanță care, ca și în cazul altor acțiuni, produce amplificări ale mișcării (cu atât mai mari cu cât amortizarea și masa structurii sunt mai mici), apare când frecvența vârtejurilor se situează în apropierea unei frecvențe proprii de vibrație a construcției în cauză, adică:

$$n_s = n_{L,i} \quad (5.11)$$

Acțiunile alternante cauzate de desprinderea vârtejurilor pot fi descrise inițial și aproximativ de o funcție sinusoidală $f_{sL}(t)$:

$$f_{sL}(t) = A_s \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \quad (5.12)$$

unde A_s este amplitudinea generală a forței, iar $\omega_s = 2\pi \cdot n_s$ în care n_s este frecvența dominantă a vârtejurilor, definită de legea lui Strouhal:

$$n_s = (St \cdot u_m) / b \quad (5.13)$$

unde u_m este viteza medie a vântului, b dimensiunea caracteristică a secțiunii, iar St numărul lui Strouhal, parametru adimensional și funcție a comportării aerodinamice a structurii.

Pornind de la o funcție sinusoidală $[f_{sL}(t)]$, Simiu și Scanlan (1985), definesc forța static echivalentă laterală provenită din desprinderea vârtejurilor pe o structură de formă cilindrică, ca având expresia:

$$F = (1/2) \cdot \rho \cdot u_m^2 \cdot b \cdot c_L \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \quad (5.14)$$

unde u_m este viteza medie, b dimensiunea structurii, c_L coeficient lateral de forță (cu valoarea aproximativă 0.6 pentru secțiuni cu numărul lui Reynolds $40 < Re < 3 \times 10^5$).

Vitezele medii ale vântului egale cu viteza critică pentru care frecvența vârtejurilor e egală cu o frecvența proprie a structurii, $u_m = u_{cr,i}$ pentru care $n_s = n_{L,i}$, se determină cu relația:

$$u_{cr,i} = (b \cdot n_{i,y}) / St \quad (5.15)$$

Dacă pentru structurile verticale tip consolă flexibilă, în privința modului fundamental de vibrație, excitația maximă apare la vârful structurii, pentru modurile superioare acest lucru trebuie verificat individual în mai multe poziții.

Verificarea cu privire la efectele generate de desprinderea vârtejurilor este necesară când:

$$u_{cr,i} \leq 1.25 \cdot u_m \quad (5.16)$$

unde u_m este viteza medie a vântului, conform *Eurocod 1 (SR EN 1991-1-4-2006, Anexa E)* și *CR1-1-4/2012*, sau când:

$$u_{cr,i} \leq u_{m,l} \quad (5.17)$$

unde $u_{m,l}$ este viteza medie a vântului determinată la înălțimea unde apare viteza critică și pentru IMR2=500ani, conform codului italian *CNR-DT 207/2008*.

Numărul lui Scruton Sc , este un parametru adimensional important, caracteristic structurilor, valoarea sa indicând tipul de răspuns și oferind indicii asupra comportării structurii sub acțiunea vântului turbulent și a fenomenelor aeroelastice. Dependent de masa echivalentă pe unitatea de lungime, (în modul i de vibrație), amortizarea structurală critică (afereantă modului i), dimensiunea caracteristică a secțiunii și densitatea aerului, numărul lui Scruton este exprimat cu relația:

$$Sc_i = (4 \cdot m_{e,i} \cdot \xi_i) / (\rho \cdot b^2) \quad (5.18)$$

În privința condițiilor de apariție a fenomenelor de desprindere a vârtejurilor, acestea sunt favorizate de existența unei turbulențe reduse. Turbulența redusă apare mai ales în zone plate, de câmpie, anumite zone plate de litoral.

În mod practic, pornind de la funcția sinusoidală descrisă $f_{sL}(t) = A_s \cdot \sin(\omega_s \cdot t)$, forța statică echivalentă $F_{L,i}(z)$ pe unitatea de lungime, ce acționează perpendicular pe direcția de acțiune a vântului, produsă de fenomenul de desprindere a vârtejurilor, după modelul Ruscheweyh, 1988, este evaluată în general în codurile de proiectare cu expresia:

$$F_{L,i}(z) = m(z) \cdot (2\pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(z) \cdot y_{F,\max} \quad (5.19)$$

În expresia forței static echivalente, z este coordonata verticală, $m(z)$ masa structurii pe unitatea de lungime, $n_{i,y}$ frecvența proprie de vibrație a structurii perpendicular acțiunii vântului, în modul de vibrație i , $\Phi_{i,y}(z)$ este forma modală a structurii normalizată la 1 în punctul de deplasare maximă, iar $y_{F,\max}$ ($y_{pL,i}$) deplasarea maximă în punctul unde $\Phi_{i,y}(z)=1$.

Determinarea deplasării maxime $y_{F,\max}$ (sau $y_{pL,i}$) se poate realiza prin intermediul a două metode de calcul ce prezintă atât avantaje cât și dezavantaje în privința acurateții rezultatelor, metoda spectrală și metoda armonică. Metoda spectrală poate fi utilizată doar în cazul structurilor tip consolă verticală și când se ia în considerare doar primul mod de vibrație.

Black, Barrios și Lopez, 2009 au arătat diferențele obținute în estimarea deplasării maxime prin aplicarea celor două metode de determinare spectrală și armonică, în conformitate cu câteva coduri de proiectare importante, cum ar fi cele canadian, australian, european, danez, în timp ce Kawecki și Zuranski în 2007, au arătat că proiectarea doar prin

metoda armonică poate fi insuficientă. Astfel, se poate considera utilă în cadrul procesului de proiectare luarea în considerare a ambelor metode armonică și spectrală, așa cum s-a aplicat și în cadrul studiului de caz din această lucrare.

În privința creșterii amortizării totale și a contracarării efectelor desprinderii de vârtejuri, în anii 60-80, pentru elemente de tip console verticale flexibile, metalice (ex coșuri, piloni antene) au fost prevăzute spirale la partea superioară (coșuri) sau elemente perforate (piloni antene), reducându-se efectele pe direcție perpendiculară acțiunii vântului, dar în general crescându-le pe cele în lungul acestuia.

Deplasarea maximă $y_{pL,1}$, aferentă modului 1 de vibrație, se exprimă prin metoda spectrală, conform codului *CNR-DT 207/2008*, prin relația:

$$y_{pL,1} = g_L \cdot \sigma_L \quad (5.20)$$

unde g_L factor al deplasării maxime, iar σ_L abaterea standard a deplasării.

$$g_L = \sqrt{2} \cdot \left\{ 1 + \left[\arctan \left(0.7 \cdot \left(\frac{Sc_1}{4\pi \cdot K_a} \right)^{2.5} \right) \right]^{1.4} \right\} \text{ și } \frac{\sigma_L}{b} = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} \quad (5.21)$$

unde Sc_1 este numărul lui Scruton pentru modul 1 de vibrație, K_a parametrul adimensional de amortizare aerodinamică detaliat în codul italian *CNR-DT* și în *CICIND* (International Commintee for Industrial Chimneys) Model Code for Steel Chimneys, 2000.

În expresia abaterii standard σ_L , coeficienții c_1 și c_2 sunt definiți în cod în funcție de o serie parametri ca amplitudinea de limitare normalizată, numerele lui Strouhal și Scruton, dimensiuni și formă structură, masa echivalentă pe unitatea de lungime, etc.

Deplasarea maximă $y_{pL,i}$, se exprimă în codul *CNR-DT 207/2008* prin metoda armonică astfel:

$$\frac{y_{pL,i}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc_i} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (5.22)$$

unde b , Sc_i , St , definite anterior; K este factorul formei modale de vibrație, K_w este factorul lungimii de corelație L_j , iar c_{lat} este coeficientul aerodinamic de forță transversal vântului.

În ultimii ani, în vederea sporirii amortizării totale, mai ales la coșurile metalice, o soluție utilizată din ce în ce mai des în industria de profil, este cea a prevederii de dispozitive de amortizare cu masa acordată (TMD, tuned mass damper) și a celor de amortizare cu lichid (TLD, tuned liquid damper), eficientă în majoritatea situațiilor prin reducerea efectelor acțiunii vântului, a răspunsului structural. Utilizarea TMD cu o masă de circa 1...2% din masa structurii și cu o frecvență aproximativ egală cu cea naturală a structurii, poate conduce la o creștere importantă a amortizării, de exemplu de la $\zeta=0.002$, la $\zeta=0.08$ în cazul unor coșuri metalice înalte.

Pentru structuri metalice, fenomenul de oboseală este în mod general descris de *Eurocodul3*, *SR EN 1993-1-9:2006 Proiectarea structurilor de oțel. Oboseala*.

M.P. Repetto și Solari au propus în 2012 două niveluri de determinare a parametrilor aferenți verificării structurilor la oboseală, totalizând 6 metode de calcul. În cadrul acestor metode de calcul privind verificarea la oboseală, s-a pornit de la o abordare complexă cât mai exactă, iar celelalte, în mod consecutiv, au cuprins diferite aproximări de partea siguranței.

Metodele au pornit de la cele trei ipoteze de bază: dezvoltarea eforturilor reprezintă un proces de bandă îngustă și de medie 0, iar curba de oboseală este reprezentată de o linie

dreaptă, într-o scară log-log. La aceste ipoteze au fost adăugați trei factori de corecție, bimodal, al efortului mediu și al curbei de oboseală.

O situație oarecum diferită de cea a pilonilor metalici, care merită analizată suplimentar, este cea a stâlpilor realizați din polimeri armați cu fibre de sticlă (FRP – fiber reinforced polymers). În completarea normelor deja cunoscute în domeniu, ca și cadru legal, pentru stâlpii din FRP trebuie precizat și standardul european *EN 40-7, Stâlpi pentru iluminat public. Partea 7: Cerințe pentru stâlpi de iluminat din materiale compozite pe bază de polimeri armate cu fibre.*

Fenomenul de galopare

Principala caracteristică a fenomenului aeroelastic de galopare, este anularea amortizării structurale. Galoparea poate apărea în principal în cazul structurilor ușoare, zvelte/flexibile, cu amortizare redusă, cu o secțiune alta decât cea circulară, care prezintă simetrie polară și se manifestă, în anumite condiții, sub forma unor oscilații mari, pe direcție perpendiculară acțiunii vântului.

Condiția de bază, necesară pentru apariția galopării este ca:

$$c_D + c'_L \leq 0 \quad (5.23)$$

Acesta este criteriul Glauert – Den Hartog, unde c_D este coeficientul aerodinamic pe direcția vântului (în situația unor axe ortogonale și a acțiunii vântului pe direcția axelor principale, devine c_{fx}), iar c'_L prima derivată coeficientului aerodinamic lateral în raport cu unghiul de atac al acțiunii vântului, evaluată pentru valoarea acestuia (în situația unor axe ortogonale și a acțiunii vântului pe direcția axelor principale, c_L devine c_{fy}). Aceasta este condiția necesară dar nu și suficientă. Aceea este ca amortizarea totală $\xi_t \leq 0$.

Cunoscând că amortizarea totală este suma dintre cea structurală și cea aerodinamică, pe direcția y, aceasta este definită de expresia:

$$\xi_t = \xi_s + \xi_a = \xi_s - [\rho \cdot \bar{u} \cdot b \cdot a_G] / 4 \cdot m \cdot \omega_0 = \xi_s + [\rho \cdot \bar{u} \cdot b \cdot (c_D + c'_L)] / 4 \cdot m \cdot \omega_0 \quad (5.24)$$

Condiția necesară și suficientă de apariție a fenomenului de galopare, $\xi_t \leq 0$ devine:

$$\xi_s - [\rho \cdot \bar{u} \cdot b \cdot a_G] / 4 \cdot m \cdot \omega_0 = \xi_s + [\rho \cdot \bar{u} \cdot b \cdot (c_D + c'_L)] / 4 \cdot m \cdot \omega_0 \leq 0 \quad (5.25)$$

Conform *Eurocod 1 (SR EN1991-1-4:2006, anexa E)*, evaluarea vitezei critice de galopare și verificarea cu privire la evitarea apariției fenomenului de galopare, sunt:

$$v_{CG} = \frac{2 \cdot Sc}{a_G} \cdot n_{1,y} \cdot b \quad (5.26)$$

$$\text{cu verificarea: } v_{CG} > 1.25 \cdot v_m(z) \quad (5.27)$$

unde, v_{CG} este viteza critică a vântului de declanșare a galopării, Sc este numărul lui Scruton, a_G coeficientul de instabilitate la galopare (precizat tabelar în funcție de forma secțiunii), $n_{1,y}$ frecvența fundamentală a modului de vibrație perpendicular pe direcția vântului, b lățimea caracteristică a secțiunii structurii.

Codul italian *CNR-DT 207/2008* prevede următoarea evaluare a vitezei critice:

$$v_{G,i} = \frac{8\pi \cdot m_{e,i} \cdot n_{L,i} \cdot \xi_{L,i}}{\rho \cdot b \cdot a_G} = \frac{2 \cdot n_{L,i} \cdot b \cdot Sc_i}{a_G} \quad (5.28)$$

unde Sc_i este numărul lui Scruton aferent modului i de vibrație, a_G coeficientul de instabilitate la galopare (precizat tabelar în funcție de forma secțiunii), $n_{L,i}$ frecvența modului i de vibrație perpendicular pe direcția vântului, b lățimea caracteristică a secțiunii structurii, cu verificarea:

$$v_{G,i} > v_{m,i} \quad (5.29)$$

unde $v_{m,i}$ este viteza medie a vântului determinată la înălțimea unde apare viteza critică și pentru $IMR2=500$ ani.

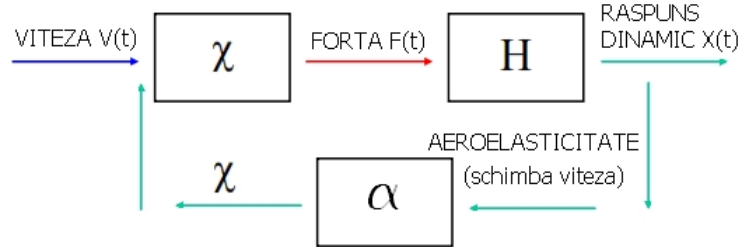


Fig. 5.4 Implicarea aeroelasticității în relația acțiune – răspuns în cazul unei structuri.

5.4. Răspunsul la acțiunea seismică

Ecuția de mișcare a unui sistem cu 1 Grad de Libertate Dinamică cu comportare liniară, caracterizat de parametrul inerțial - masa m , parametrul disipativ - amortizarea c , parametrul de elasticitate/rigiditate - rigiditatea k , asupra căruia acționează mișcarea seismică corespunzătoare apariției unei deplasări $u_g(t)$, se scrie:

$$m \cdot [u_g''(t) + x''(t)] + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = 0 \quad (5.30)$$

unde $x(t), x'(t), x''(t)$ reprezintă răspunsul relativ instantaneu, deplasare, viteză, accelerație.

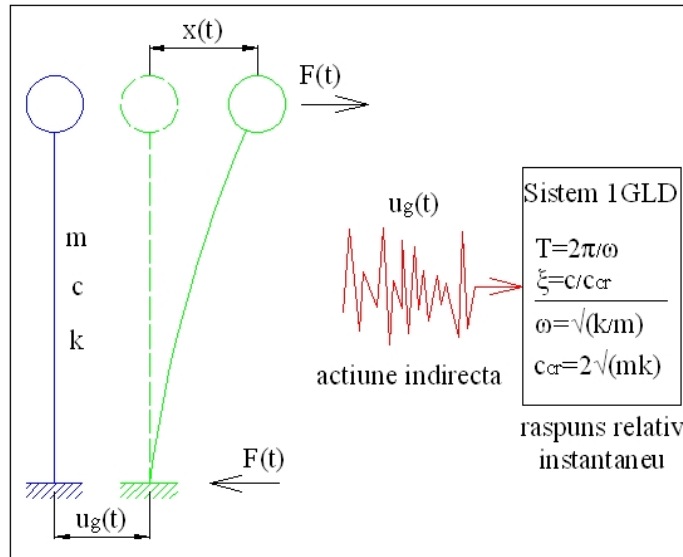


Fig. 5.5 Reprezentarea acțiunii seismice asupra unui sistem cu 1 grad de libertate dinamică.

Această ecuație se poate rescrie în vederea integrării Duhamel, (Ifrim, 1984):

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = -m \cdot u_g''(t); \quad x''(t) + 2\xi\omega \cdot x'(t) + \omega^2 \cdot x(t) = -u_g''(t) \quad (5.31)$$

unde ω este pulsația proprie a sistemului $=2\pi/T$, ξ este fracțiunea din amortizarea critică.

Ca urmare a aplicării unor aproximări, deplasarea $x(t)$, viteza relativă instantanee $v(t)$, precum și accelerația absolută instantanee $a(t) = u_g''(t) + x''(t)$, pe durata de timp $d\tau$, în condițiile unei amortizări vâscoase naturale relativ reduse, pentru fracțiuni din amortizarea critică ζ mai mici, de exemplu de 0.20, se pot exprima prin relațiile, (Ifrim, 1984):

$$\begin{aligned} x(t) &= -\frac{1}{\omega} \cdot \int_0^t u_g''(\tau) \cdot e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \cdot \sin[\omega(t-\tau)] \cdot d\tau \\ v(t) &= -\int_0^t u_g''(\tau) \cdot e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \cdot \cos[\omega(t-\tau)] \cdot d\tau \\ a(t) &= \omega \cdot \int_0^t u_g''(\tau) \cdot e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \cdot \sin[\omega(t-\tau)] \cdot d\tau \end{aligned} \quad (5.32)$$

Forța seismică, consecință a acțiunii seismice acționând asupra sistemului, are relația:

$$F(t) = m \cdot a(t), \text{ sau admitând } v(t) \sim \omega \cdot x(t), F(t) = k \cdot x(t) \quad (5.33)$$

Perioadele de control T_C și T_D sunt cei mai importanți indicatori deterministici ai conținutului de frecvențe al mișcărilor seismice. Perioada de control T_C a spectrului de răspuns reprezintă granița dintre zona (palierul) de valori maxime în spectrul de accelerații absolute și zona (palierul) de valori maxime în spectrul de viteze relative. Perioada de control T_D a spectrului de răspuns reprezintă granița dintre zona (palierul) de valori maxime în spectrul de viteze relative și zona (palierul) de valori maxime în spectrul de deplasări relative. Definirea lor se face pe baza valorilor EPD , EPV și EPA , după cum urmează:

$$T_C = 2\pi \cdot EPV/EPA, \text{ iar } T_D = 2\pi \cdot EPD/EPV \quad (5.34)$$

unde EPD este deplasarea de vârf efectivă a terenului, EPV viteza de vârf efectivă, EPA accelerația de vârf efectivă, ; T_C și T_D se exprimă în secunde.

Spectrul de răspuns elastic corespunzând unor fracțiuni din amortizarea critică altele decât cea standard $\zeta = 5\%$ este definit de relația de mai jos (*P100-1/2013*, Anexa A):

$$\begin{aligned} S_e(t)_{\zeta=5\%} &= a_g + [S_e(t)_{\zeta=5\%} \cdot \eta - a_g] \cdot (T/T_B) & \text{pentru } 0 \leq T \leq T_B \\ S_e(t)_{\zeta=5\%} &= [S_e(t)_{\zeta=5\%} \cdot \eta] & \text{pentru } T > T_B \end{aligned} \quad (5.35)$$

$$\text{unde factorul de corecție } \eta \text{ are expresia: } \eta = \sqrt{10/(5 + \zeta)} \geq 0.55 \quad (5.36)$$

6. STUDIU DE CAZ: RĂSPUNSUL DINAMIC LA ACȚIUNI DIN VÂNT ȘI CUTREMUR AL PILONILOR DE ILUMINAT DIN INCINTA AEROPORTULUI IAȘI

6.1. Răspunsul pilonilor pe direcția de acțiune a vântului

În cadrul analizei modale a structurii a fost luat în considerare un număr total de 12 moduri de vibrație împărțit în 6 perechi ortogonale de valoare egală. În tabelul de mai jos sunt prezentate primele 3 perechi relevante cu perioadele $T_{1,1}$, $T_{2,2}$, $T_{3,3}$. Au fost calculate și masele echivalente $m_{e1,2}$ pentru primele două moduri de vibrație relevante. Masa echivalentă

pentru modul 2 de vibrație a fost obținută prin aplicarea metodei Simpson de integrare numerică.

Tab.6.1 Principalele caracteristici dinamice structurale, rezultate ale analizei modale

Nr. crt.	Denumire parametru	modul 1 de vibrație	modul 2 de vibrație	modul 3 de vibrație
1	perioada proprie T_i (sec)	1.33	0.35	0.14
2	frecvența proprie ν_i (Hz)	0.75	2.88	7.04
3	masa echivalentă m_i (kg/ml)	76.52	102.61	-

În urma obținerii eforturilor secționale N (forță axială), M (moment încovoietor), T (forță tăietoare; V conform notațiilor Eurocod) la baza pilonului ca urmare a aplicării forțelor static echivalente conform codurilor *CRI*, *CNR-DT* și *SR EN1991*, se remarcă valorile apropiate rezultate, cea mai mare valoare (majorare cu cca 7% față de *CRI*) fiind obținută prin aplicarea codului italian *CNR-DT*.

În privința deformațiilor, deplasările maxime obținute la partea superioară a pilonului sunt de 0.68m, adică 0.022H, de exemplu, sub valoarea maximă impusă de *EN40-3-3* cap.6.5 în cel mai restrictiv caz pentru piloni, anume de 0.04H, unde H este înălțimea totală a pilonului, incluzând bara cu corpuri de iluminat. În literatura de specialitate este precizată o limitare a deplasărilor în intervalul 0.05H – 0.10H raportat la înălțimea totală a pilonilor analizați, (Machacek et al, 2014).

Tab.6.2 Eforturile secționale N, M, T la baza pilonului, rezultate în urma principalelor combinații de încărcări conform codurilor *CRI*, *CNR-DT*, *EC1*, *P100*

Nr. crt.	Denumire Combinație de încărcări	N , forța axială max la baza (KN)	T , forța tăietoare max la baza (KN)	M , mom. încovoietor max la baza (KN*m)
1	Gr. fundamentală, aplicare cod CR (RO)	75.820	69.590	1219.220
2	Gr. fundamentală, aplicare cod CR (RO), + aport gheata	80.350	70.840	1240.030
3	Gr. fundamentală, aplicare cod CNR-DT (ITA)	75.820	75.460	1303.660
4	Gr. fundamentală, aplicare cod CNR-DT (ITA), + aport gheata	80.350	76.820	1325.890
5	Gr. fundamentală, aplicare cod SR EN (EU)	75.820	73.770	1293.950
6	Gr. fundamentală, aplicare cod SR EN (EU), + aport gheata	80.350	75.100	1316.040
7	Gr. specială aplicare cod P100-1/2013 (RO)	56.700	18.580	368.160

În același timp, pentru pilonul obiect al studiului de caz au fost determinați și vectorii proprii aferenți primelor două moduri de vibrație.

În cazul aplicării metodei 3D GRF a fost obținută o forță static echivalentă cu cca.8% diferită față de aplicarea codului italian, iar în cazul aplicării metodei 3D GEF, rezultatele privind factorul de rafală G pentru deplasări fiind aproape identic cu cel obținut prin aplicarea *SR EN1991* și foarte apropiat de codul italian.

Metoda de calcul generalizat 3D GEF a fost aplicată pe pilonul obiect al studiului de caz, cu secțiune și masă variabilă pe înălțime, în vederea obținerii factorilor de rafală G_{α}^e în mod diferențiat, pentru deplasare, moment și forță tăietoare și analizării variației acestora cu înălțimea. Analiza a fost continuată cu obținerea forței static echivalente în cazul efectului

deplasare. Variația incrementală a masei pe înălțimea pilonului studiat, frecvența și amortizarea, influențează valorile factorilor de rafală pentru moment și forță tăietoare, forma acestora fiind diferită față de cazul coșurilor cu secțiune și masă constantă pe înălțime. În toate cazurile, valorile la bază pentru factorii de rafală aferenți momentelor și forțelor tăietoare sunt mai mici decât cele obținute în mod tradițional pentru deplasări, diferența fiind mai sesizabilă în cazul factorului de rafală aferent forței tăietoare.

În cazul unui pilon metalic cu masă și secțiune constante pe înălțime (au fost alese caracteristicile bazei pilonului), factorul de rafală aferent momentului încovoietor la bază a rezultat cu 6% mai redus, raportat la factorul de rafală clasic pentru deplasare, în timp ce factorul de rafală aferent forței tăietoare la bază a rezultat cu 13% mai redus.

Forța static echivalentă pe direcția de acțiune a vântului a fost evaluată pentru atât pentru pilonul inițial cu masă și secțiune variabile cu înălțimea, obiect al studiului de caz, cât și pentru un pilon cu masă și secțiune constante (au fost alese caracteristicile bazei pilonului) de la bază la vârf, observându-se diferențele (Fig.6.2), (Rădăceanu, 2017 a).

Tab.6.3 Valorile factorilor de vârf $g_e(z)$ și factorilor de efect la rafală $G_e(z)$ calculați prin aplicarea metodei Factorului Generalizat de Efect la Rafală (3DGEF)

B.	Date obținute prin calcul etapizat metoda 3D GEF					
B.1	Parametri obținuți prin calcul					
Înălțime z (m)	Factorii de vârf $g_e(z)$			Factorii de efect la rafală $G_e(z)$		
	gdx	gm _x	gt _x	Gdx	Gm _x	Gt _x
	deplasare	moment	tăietoare	deplasare	moment	tăietoare
0.1	3.631	3.626	3.601	2.491	2.455	2.364
1.5	3.631	3.627	3.605	2.491	2.465	2.371
3.0	3.631	3.629	3.609	2.491	2.477	2.387
4.5	3.631	3.630	3.614	2.491	2.488	2.407
6.0	3.631	3.631	3.618	2.491	2.498	2.429
7.5	3.631	3.632	3.622	2.491	2.508	2.452
9.0	3.631	3.633	3.625	2.491	2.516	2.475
10.5	3.631	3.633	3.628	2.491	2.523	2.497
12.0	3.631	3.633	3.631	2.491	2.527	2.517
13.5	3.631	3.633	3.633	2.491	2.529	2.534
15.0	3.631	3.633	3.634	2.491	2.529	2.547
16.5	3.631	3.632	3.635	2.491	2.526	2.556
18.0	3.631	3.631	3.635	2.491	2.520	2.560
19.5	3.631	3.629	3.634	2.491	2.511	2.557
21.0	3.631	3.627	3.633	2.491	2.498	2.549
22.5	3.631	3.624	3.631	2.491	2.482	2.533
24.0	3.631	3.621	3.628	2.491	2.462	2.511
25.5	3.631	3.616	3.623	2.491	2.439	2.481
27.0	3.631	3.611	3.616	2.491	2.413	2.444
28.5	3.631	3.604	3.607	2.491	2.384	2.401
30.0	3.631	3.594	3.594	2.491	2.357	2.358

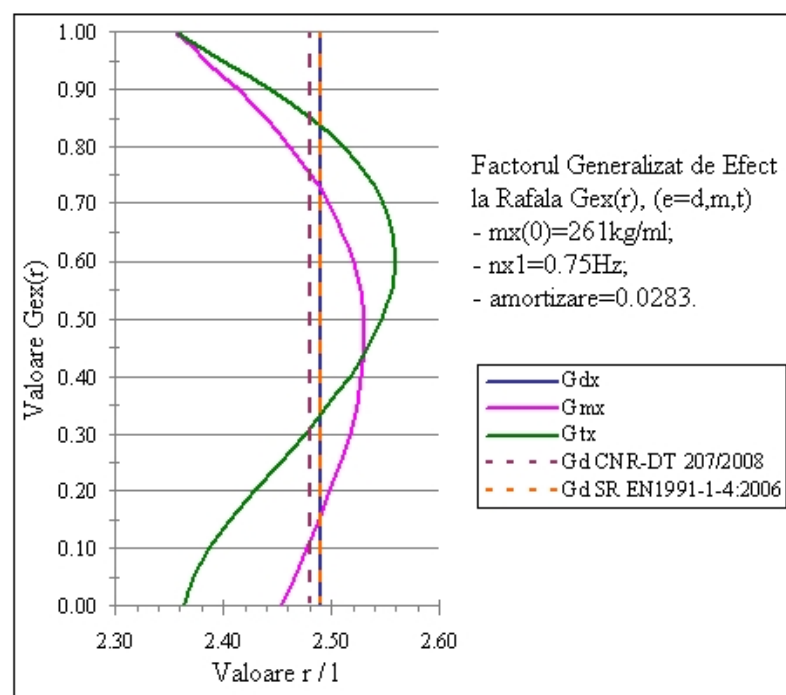


Fig. 6.1 Variația Factorului de efect la rafală cu înălțimea pilonului ($l=30\text{m}$), pentru calculul momentelor încovietoare G_{mx} (magenta), forțelor tăietoare G_{tx} (verde) și deplasărilor G_{dx} (albastru). Comparatie cu Factorul de rafală G , calculat conform codurilor CNR-DT207/2008 și SR EN1991-1-4:2006.

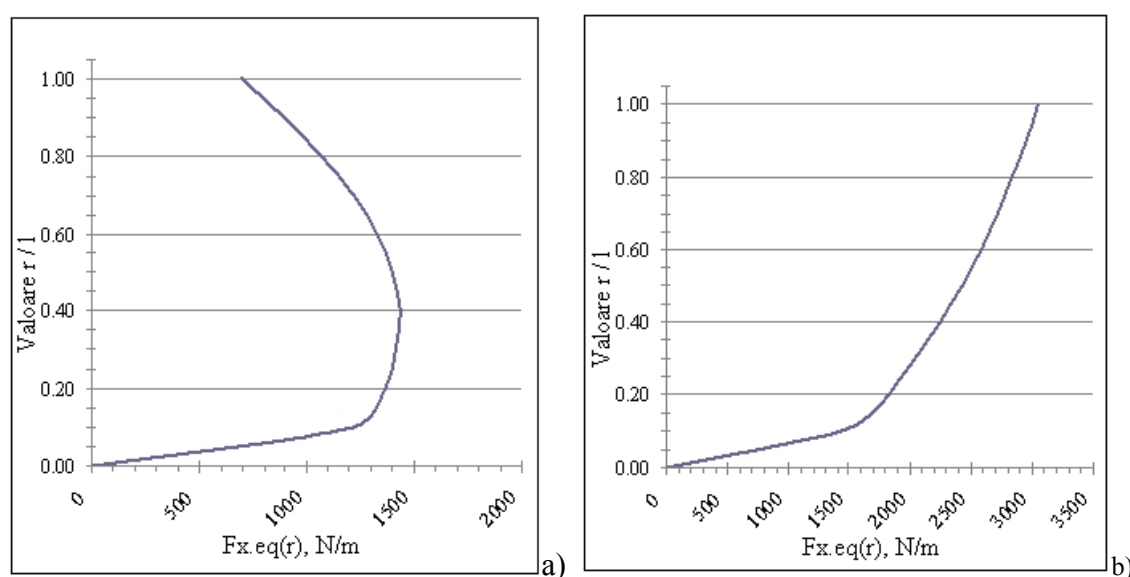


Fig. 6.2 Variația Forței Static Echivalente $F_{x,eq}(r)$ pe direcția de acțiune a vântului cu $v_b=33.5\text{m/s}$, calculată cu metoda 3D GEF, pentru efectul deplasare ($e=d$).

- a) Pilon metalic cu înălțimea $l=30\text{m}$ și secțiunea și masa variabile inițiale, $d(0)=1009.4\text{mm}$, $m_x(0)=261\text{kg/ml}$;
b) Pilon metalic cu înălțimea $l=30\text{m}$ și secțiunea și masa constante, $d(0-30)=1009.4\text{mm}$, $m_x(0-30)=261\text{kg/ml}$.

6.2. Răspunsul pilonilor pe direcția transversală acțiunii vântului

Fenomenul de desprindere a vârtejurilor

În privința evaluării efectelor fenomenului de desprindere a vârtejurilor asupra pilonului, au fost calculate forțele aferente modului fundamental, conform codurilor *CRI*, *CNR-DT 207* și *SR EN 1991-1-4*, obținându-se valori similare. Analiza a fost continuată prin calculul, conform codului *CNR-DT 207*, forțelor produse de acțiunea de desprindere a vârtejurilor pentru modul 2 de vibrație al pilonului și compararea acestuia cu rezultatul aferent modului 1.

Tab.6.4 Evaluarea prin calcul a Forței produse de acțiunea de desprindere a vârtejurilor, pentru modurile 1 și 2 de vibrație, $F_{L1}(s)$ și $F_{L2}(s)$, conform codului CNR-DT 207/2008.

Nr. crt.	Denumire parametru	Cod CNR-DT 207/2008 (ITA)	
		modul 1 de vibrație	modul 2 de vibrație
1	viteza critica a vantului pt modurile 1 si 2, $v_{crit,1,2}$ (m/s)	0.974	3.740
2	numarul lui Strouhal St	0.190	0.190
3	numarul lui Scruton $Sc_{1,2}$	25.270	33.890
4	numarul lui Reynolds pt $v_{crit,1,2}$	$1.52 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^4$
5	amortizarea totala egala cu cea structurala, $\xi_t = \xi_s$	0.002	0.002
6	factorul formei modale de vibratie K_i	0.130	0.180
7	factorul lungimii de corelatie L_j , K_{wi}	0.141	0.214
8	coeficientul aerodinamic de forta pe directie transv. clat	0.700	0.700
9	deplasarea max pe directie transv. met. armonica, $y_{f,max}$ (mm)	3.460	5.438
10	* forta pe dir perpendiculara din desp. vartejurilor, $FL1(s)$ si $FL2(s)$, (N/ml)	$0.0768 \cdot m(z) \cdot (z/30)^2$	$1.7807 \cdot m(z) \cdot [-5.5(z/30)^2 + 8(z/30)^3 - 1.5(z/30)^4]$

În consecință, în cadrul evaluării prin calcul a forțelor transversale generate de desprinderea vârtejurilor, aferente primelor două moduri de vibrație, s-a remarcat influența mai mare a forței laterale aferentă modului 2 de vibrație și a variației acesteia pe înălțime în funcție de masă, observându-se fluctuațiile în zonele de îmbinare ale tronsoanelor ce formează pilonul metalic de iluminat.

Tab.6.5 Valorile parametrilor aferenți calculului Forței $F_{L1}(s)$ produsă de acțiunea de desprindere a vârtejurilor, pe direcția perpendiculară acțiunii vântului, pentru modul fundamental, conform codurilor CR1, CNR-DT, SR EN1991.

Nr. crt.	Denumire parametru	Cod CR1-1-4-2012 (RO)	Cod CNR-DT 207/2008 (ITA)	EC1-SR EN1991-1-4:2006
1	viteza critica a vantului pt modul1, $v_{crit,1}$ (m/s)	1.028	0.974	1.028
2	* $vm(30)$ (m/s)	40.467	49.106	42.540
3	numarul lui Strouhal St	0.180	0.190	0.180
4	numarul lui Scruton Sc	24.130	25.270	24.130
5	numarul lui Reynolds pt $v_{crit,1}$	$1.69 \cdot 10^4$	$1.52 \cdot 10^4$	$1.69 \cdot 10^4$
6	factorul formei modale de vibratie K	0.130	0.130	0.130
7	factorul lungimii de corelatie L_j , K_w	0.141	0.141	0.141
8	coeficientul aerodinamic de forta pe directie transv. clat	0.700	0.700	0.700
9	deplasarea max pe directie transv. met. armonica, $y_{f,max}$ (mm)	4.044	3.460	4.044
10	forta pe dir perpendiculara din desp. vartejurilor, $FL1(s)$ (N/ml)	$0.0898 \cdot m(z) \cdot (z/30)^2$	$0.0768 \cdot m(z) \cdot (z/30)^2$	$0.0898 \cdot m(z) \cdot (z/30)^2$
11	nr. cicluri de incarcare datorat desp. vartejurilor, N ($>10^4$)	-	$1.017 \cdot 10^7$	$1.036 \cdot 10^7$

*În cazul CNR-DT, $vm(30)$ se calculează pentru un interval mediu de recurență de 500 ani în loc de 50 ani.

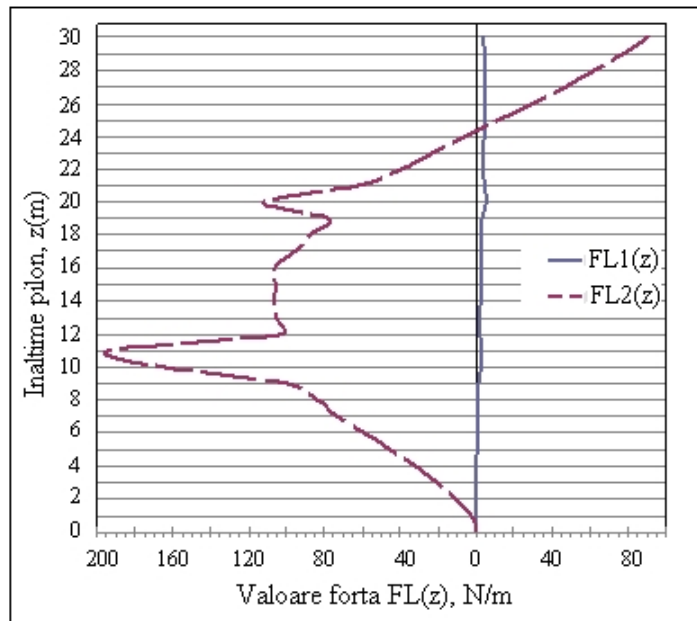


Fig. 6.3 Valoarea forțelor transversale generate de desprinderea vârtejurilor $F_L(z)$, aferente primelor două moduri de vibrație, pentru pilonul cu înălțime $l=30\text{m}$.

Fenomenul de galopare

Prin verificarea conform codului *CNR-DT*, $v_{G,i} > v_{m,i}$, pentru primele două moduri de vibrație și cu considerarea aproximativă a $a_G = 1$, se obține:

$$v_{G,1} = (2 \cdot 0.75 \cdot 0.246741 \cdot 25.27) / 1.0 = 9.35 \text{ m/s} < v_{m,1} = 49.1 \text{ m/s};$$

$$v_{G,2} = (2 \cdot 2.88 \cdot 0.246741 \cdot 33.89) / 1.0 = 48.17 \text{ m/s} < v_{m,2} = 49.1 \text{ m/s},$$

consemnându-se sensibilitatea mai ales pentru modul fundamental. Evaluarea experimentală a a_G este însă determinantă. Dacă valoarea a_G este semnificativ subunitară, $v_{G,i}$ are valori mari și galoparea este în general evitată; este esențială și verificarea acțiunii vântului sub diferite unghiuri de atac. În continuare, se verifică conform aceluiași cod, evitarea apariției corelării fenomenului de desprindere a vârtejurilor cu cel de galopare. Acest fenomen apare când se verifică relația:

$0.7 < v_{G,i} / v_{cr,i} < 1.5$. Pentru primele două moduri de vibrație se obțin relațiile:

$$v_{G,1} / v_{cr,1} = 9.35 / 0.974 = 9.60 > 1.5 \text{ și } v_{G,2} / v_{cr,2} = 48.17 / 3.74 = 12.88 > 1.5.$$

În consecință, fenomenul de corelare a desprinderii vârtejurilor cu galoparea este clar evitat.

Calcul număr cicluri de încărcare și calcul ovalizare

Calculul numărului de cicluri de încărcare aferent fenomenului de desprindere a vârtejurilor a fost calculat conform codurilor *CNR-DT* și *SR EN1991*. Conform codului *CNR-DT207/2008*, numărul total de cicluri de încărcare este $1.017 \cdot 10^7 > 10^4$, în timp ce conform *SR EN1991-1-4*, numărul de cicluri de încărcare este $1.036 \cdot 10^7 > 10^4$.

Verificarea apariției fenomenului de ovalizare, specifică secțiunilor circulare cu diametre mai mari și grosimi ale învelișului mici și foarte mici raportat la diametru, a relevat ca acesta este complet evitat de structura analizată întrucât $v_{o,1} = 108.10 \text{ m/s} > v_{m,1} = 49.1 \text{ m/s}$.

6.3. Răspunsul pilonului la acțiunea seismică

Deplasările maxime obținute în cadrul verificării SLS, la partea superioară a pilonului calculate cu factorul de reducere $v=0.5$, sunt de 0.12m, adică 0.004H, sub valoarea maximă de 0.01H prevăzută de *P100-1/2013* anexa E.

Momentul încovoietor și forța tăietoare la baza pilonului au valori semnificativ mai mici ca în cazul efectelor acțiunii vântului. Aplicarea metodei forțelor statice echivalente a generat eforturi secționale mai mari decât în cazul calculului modal cu spectre de răspuns. Eforturile maxime obținute au fost: N (forță axială)=56.70 kN, T (forță tăietoare; V conform notațiilor Eurocod)=18.58 kN, M (moment încovoietor)=368.16 kNm.

Concluzii

- *Concluzii privind analiza statistică a valorilor vitezei vântului din baza de date, în amplasamentul dat (stația meteo Aeroport Iași)*

Corectitudinea, omogenitatea și reprezentativitatea bazelor de date cu înregistrări privind viteza vântului într-un amplasament dat, sunt factori determinanți în obținerea unor repartiții corecte atât pentru populația de date, cât și pentru valorile extreme. Acuratețea înregistrărilor influențează calitatea analizei datelor, în cazul bazei de date analizate existând unele diferențe privind valorile înregistrate în perioada de înregistrare manuală până în anul 2000 și perioada de înregistrare automată, după anul 2000. Calitatea datelor de intrare are implicații tehnico-economice în industria construcțiilor.

Roza vânturilor reprezentând valorile populației de date (1976-2015, NOAA) obținută în cadrul studiului, confirmă în totalitate informațiile din studiile anterioare cu privire la direcția locală predominantă a vântului dinspre Nord-Vest, urmată de direcția Est. Referitor la valorile extreme anuale (atât $\geq 20\text{m/s}$ și $\geq 25\text{m/s}$), circa 40% dintre acestea se situează pe direcție predominantă Nord-Vest, demonstrând o corelare între valorile maxime și direcția predominantă.

În perioada 1976-06.2000 (25ani) s-au regăsit 16 din cele 17 valori înregistrate $v_{10min}(1h) \geq 25\text{m/s}$ și 67 din cele 75 valori înregistrate $v_{10min}(1h) \geq 20\text{m/s}$, stația meteo automată înregistrând în perioada 06.2000-2015 (15ani) doar o singură valoare $\geq 25\text{m/s}$ și doar 8 valori $\geq 20\text{m/s}$; cea mai mare viteză maximă înregistrată în intervalul studiat a fost de 30m/s, în datele 20.06 și 21.09.1998.

Pentru analiza statistică a populației de date incluzând densitățile de probabilitate $f(v)$ și funcțiile de repartiție $F(v)$, a fost utilizat modelul Weibull biparametric pentru date fără calm de vânt, cel mai utilizat în acest caz, obținându-se parametrul de scalare $c = 3.445$ și parametrul de formă $k = 1.834$. Acești parametri pot fi folosiți în cadrul verificării la oboseală a structurilor din amplasamentul respectiv.

Pentru analiza statistică a valorilor extreme au fost analizate două cazuri: $v_{max} \geq 20\text{m/s}$ (75 valori) și $v_{max} \geq 25\text{m/s}$ (17 valori). Pentru fiecare din cazuri au fost realizate și comparate, cu rezultate satisfăcătoare, distribuțiile Frechet, General Extreme Value, Gumbel Max și Lognormală. Întrucât acuratețea datelor înregistrate și interpretarea fenomenelor ciclonice sau locale tip furtună sunt elemente deosebit de importante pentru distribuția valorilor maxime, fiecare fenomen în parte aferent acestor valori trebuie analizat în detaliu, în corelare cu valoarea presiunii, vitezele ante și post eveniment (la acțiuni sinoptice), etc. Deși nu există pe deplin un consens, repartițiile asimptotice de probabilitate reprezintă abordările clasice și cel

mai des utilizate în analiza valorilor extreme, repartiția Tip I Gumbel fiind cel mai des recomandată, oferind un rezultat acoperitor, mai ales pe zona intervalelor de recurență mai mari, peste 50ani.

Înregistrările privind viteza vântului la rafală au fost efectuate în mare parte numai după anul 1995, ele relevând în mod majoritar valori în intervalul 10-20m/s. Cea mai mare valoare a fost cea de 26m/s, înregistrată în data de 25.11.2001, însă datorită lipsei înregistrărilor continue și de calitate, nu reprezintă în mod necesar valoarea maximă potențială, sau chiar a intervalului analizat, aceasta fiind putând fi mai mare, posibil peste 30-35m/s.

Evenimentul meteo excepțional menționat de literatura de specialitate, înregistrat la Stația Meteo Aeroport Iași în perioada 4-7 ianuarie 1966, cea mai mare viteză a vântului înregistrată iarna, din România, a fost identificat în baza de date achiziționată de la ANM, însă cu valori înregistrate diferite. În aceeași bază de date (perioada 1961-2015), au fost izolate valorile maxime ale vântului de peste 34m/s. Toate aceste valori se situează în intervalul 1963-1966.

- Concluzii privind evaluarea acțiunii vântului asupra structurilor

În Codurile Internaționale, intervalele de mediere ale vitezelor de bază ale vântului, precum și intervalele medii de recurență diferă, în special între Europa, SUA și Canada. În Europa intervalul de mediere este de 10minute, iar intervalul mediu de recurență este de 50 de ani. În privința reprezentării variației vitezei medii cu înălțimea, în Europa se utilizează profilul logaritm, în timp ce alte țări precum SUA, China, Japonia, Canada utilizează profilul exponențial, iar Marea Britanie, Australia și Noua Zeelandă utilizează profilul logaritm și polinomial tip Deaves&Harris (utilizat și de codul internațional ISO).

În viitor, avându-se în vedere diferențele fundamentale dintre evenimentele meteo staționare și gaussiene și cele non-staționare și non-gaussiene și amploarea din ce în ce mai mare a celor din ultima categorie, va fi necesară luarea în calcul a două cazuri distincte de încărcări privind acțiunea vântului asupra structurilor, unul (cel clasic) pentru evenimente sinoptice tip cicloni având presiunea static echivalentă și unul pentru evenimente non-sinoptice, cum sunt și furtunile, iar pe măsura stabilirii unor modele viabile simplificate (spectre de proiectare) bazate pe date exacte, acest lucru se va regăsi și în codurile de proiectare. Pentru construcții joase și de înălțime medie, furtunile pot juca un rol important în dimensionarea structurală, în timp ce pentru structuri înalte (ex. peste cca. 80m) acțiunea vântului provenită din cicloni dimensionează elementele structurale.

- Concluzii privind răspunsul dinamic al structurilor zvelte/flexibile supuse acțiunii vântului

În cazul structurilor tip consolă verticală flexibilă, amortizarea totală ξ joacă un rol important în evaluarea cât mai exactă a coeficientului de răspuns dinamic și ca o consecință, a acțiunii static-echivalente a vântului pe direcția acestuia și a oscilațiilor structurii pe direcția vântului. Componenta aerodinamică a amortizării reduce semnificativ răspunsul dinamic, iar neconsiderarea acesteia în calcul poate conduce la unele supradimensionări.

Efectele generate de desprinderea vârtejurilor reprezintă tranziția între răspunsul dinamic clasic și răspunsul aeroelastic. Numărul lui Scruton Sc indică tipul de răspuns și oferă indicii asupra comportării structurii sub acțiunea vântului turbulent și a fenomenelor aeroelastice. Turbulența redusă reprezintă o condiție defavorabilă pentru răspunsul pe direcție transversală acțiunii vântului. În același timp fenomenul de galopare este un fenomen aeroelastic ce reprezintă în esență o anulare a amortizării structurale.

La structurile de tip consolă verticală flexibilă, ca urmare a dezvoltării fenomenelor aeroelastice, începând cu desprinderea vârtejurilor și continuând cu galoparea, se produc efecte asupra structurilor, incluzând un răspuns al structurii, în cadrul căruia trebuie analizate contribuțiile cât mai multor moduri de vibrație; modurile superioare pot avea o contribuție semnificativă.

Acțiunea vântului turbulent, a desprinderii vârtejurilor sau galopării asupra construcțiilor de tip console verticale zvelte/flexibile poate produce oscilații importante la viteze obișnuite ale vântului, iar în acest caz apariția fenomenului de oboseală este probabilă. Studiile privind comportarea la oboseală a structurilor tip console verticale zvelte/flexibile, au relevat că avarierea/prabușirea unor astfel de structuri este legată și de anumite particularități ale amplasamentului cu privire la acțiunea vântului. Standardele actuale de proiectare prezintă factori de siguranță viabili pentru verificări la SLU, dar au limitări privind verificarea structurilor zvelte/flexibile (piloni iluminați, piloni cu antene de telecomunicații, cu structură metalică) la oboseală sub acțiuni ale vântului din amplasament (ex. inclusiv la viteze de 10-20m/s).

Pentru simularea acțiunii vântului asupra construcțiilor și studiul răspunsului acestora sub acțiunea vântului se efectuează teste în tunelurile de vânt cu strat limită atmosferic (BLWT). O importanță deosebită o au scările aferente diferitelor dimensiuni fizice (v , t , l , ρ , etc), numărul lui Reynolds Re , sau lungimea scării integrale a turbulenței, putându-se realiza teste statice sau aeroelastice complete. În cazul testării pilonilor (de iluminați, cu antene de comunicații, etc) este importantă analizarea modelelor complete (cu scări, paturi de cabluri, platforme de odihnă/de lucru), întrucât acestea devin asimetrice și pot deveni instabile aeroelastic în anumite condiții.

- Concluzii privind evaluarea acțiunilor dinamice provenite din vânt și cutremur și a efectelor acestora asupra structurilor tip consolă verticală flexibilă cu masă redusă, în urma utilizării unor coduri europene și a unor metodologii specifice de calcul

În urma evaluării forțelor static echivalente prin aplicarea codurilor *CRI*, *CNR-DT* sau *EN1991* și apoi a obținerii eforturilor secționale, se remarcă valorile apropiate obținute, cea mai mare valoare (majorare cu cca 7% față de *CRI*) fiind totuși obținută prin aplicarea codului italian *CNR-DT*. Efectul aplicării încărcărilor provenite din existența gheții pe structură (grosime aplicată 10mm), pentru pilonul de iluminat analizat, nu a condus la modificări semnificative ale efectelor (majorare cu cca. 2%).

Eforturile secționale la bază și deplasările la vârf obținute ca efect al acțiunii vântului sunt semnificativ mai mari decât cele obținute ca efect al acțiunii cutremurului, chiar în condițiile utilizării unui factor de comportare cu valoare unitară.

În cadrul evaluării prin calcul a forțelor transversale generate de desprinderea vârtejurilor, aferente primelor două moduri de vibrație, s-a remarcat influența mai mare a forței laterale aferentă modului 2 de vibrație și a variației acesteia pe înălțime în funcție de masă.

În urma verificărilor prin calcul, s-a constatat că în cazul pilonului analizat, sunt evitate fenomenul de ovalizare secțională, ca și fenomenul de corelare a desprinderii vârtejurilor cu galoparea.

Metodele 3D GRF și 3D GEF, generalizări ale metodei factorului de răspuns la rafală a lui A. Davenport au fost aplicate în mod practic în cazul pilonului de iluminat, fiind obținute rezultate precise. În cazul aplicării metodei 3D GRF a fost obținută o forță static echivalentă

cu circa 8% diferită față de aplicarea codului italian, iar în cazul aplicării metodei 3D GEF, rezultatele privind factorul de rafală G pentru deplasări fiind aproape identic cu cel obținut prin aplicarea *EN1991* și foarte apropiat de codul italian.

Prin aplicarea metodei 3D GEF în vederea obținerii factorilor de rafală G diferențiat pentru deplasare, moment și forță tăietoare, s-a constatat variația acestora doi din urmă pe înălțimea pilonului studiat. Variația incrementală a masei pe înălțimea pilonului studiat, frecvența și amortizarea, influențează valorile factorilor de rafală pentru moment și forță tăietoare, forma acestora fiind diferită față de cazul coșurilor cu secțiune și masă constantă pe înălțime. În cazul unui pilon metalic cu masă și secțiune constante pe înălțime (au fost alese caracteristicile bazei pilonului), factorul de rafală aferent momentului încovoietor la bază a rezultat cu 6% mai redus raportat la cel clasic pentru deplasare, respectiv 13% mai redus în cazul factorului de rafală aferent forței tăietoare. Forța static echivalentă a fost evaluată pentru atât pentru pilonul inițial cu masă și secțiune variabile cu înălțimea, obiect al studiului de caz, cât și pentru un pilon cu masă și secțiune constante (caracteristicile bazei pilonului) de la bază la vârf, observându-se diferențele. Ca urmare a aplicării metodei 3D GEF, prin intermediul factorilor de rafală variabili, pot fi obținute, după caz, reduceri ale forțelor static echivalente și implicit ale eforturilor secționale M (moment încovoietor) și T (forță tăietoare) la baza structurilor tip consolă verticală flexibilă, cu implicații în proiectarea fundațiilor.

Contribuții personale

Studiul prezentat ce analizează baza de date privind viteza vântului din perioada 1976-2015, furnizează informații utile pentru zona Aeroportului Iași privind direcțiile predominante ale vântului, valorile maxime, vântul la rafală și poate constitui o completare a studiilor anterioare cum este cel al E. Erhan din 1979, ce analizează bazele de date aferente Stației Meteo Aeroport Iași (interval 1951-1975), putând fi comparat și cu alte studii similare.

Obținerea parametrilor c și k ai distribuției Weibull pentru populația de date aferentă unor înregistrări privind viteza vântului pe o durată de 40 de ani dintr-un amplasament din România, reprezintă un element de cvasi-noutate pe plan național (excepția e reprezentată de studiile de fezabilitate din domeniul ingineriei eoliene, care însă studiază baze de date cu înregistrări dintr-un interval de timp mult mai redus), în același timp, subiectul fiind unul de mare actualitate în literatura internațională de specialitate. Studiul constituie o bază de pornire pentru o analiza mai aprofundată, iar valorile parametrilor c și k ai distribuției Weibull pot fi utilizați în verificarea la oboseală a structurilor din zona aeroportului Iași.

Prezentarea unui studiu de caz privitor la un pilon de iluminat cu structură metalică, cu înălțimea de 30m, analiza comparativă a datelor de intrare și a rezultatelor obținute, mai ales privind fenomenele aeroelastice, prezentarea normelor tehnice în domeniul pilonilor metalici și al acțiunii vântului, analiza comparativă a acestora, a procesului de proiectare, a factorilor potențiali care pot genera inexactități în cadrul acestuia, constituie informații de interes pentru specialiștii implicați în domeniu.

Prezentarea aplicării metodelor 3D GRF și 3D GEF pentru un pilon înalt cu secțiune și masă variabilă, convergența rezultatelor cu cele obținute prin aplicarea codurilor de proiectare, dar și avantajele aplicării metodei 3D GEF în evaluarea eforturilor la baza pilonilor cu implicații tehnico-economice concrete asupra sistemelor de fundare, reprezintă informații extrem de utile pentru practicanții din domeniul proiectării în construcții.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- AASHTO 2009 *Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*, Fifth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington;
- AASHTO LRD LTS 2015 *Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*, First Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington;
- Aichinger R., Higgins W., 2006, *Toe Cracks in Base Plate Welds – 30years later*. Valmont Industries, Nebraska;
- ASCE 7-10, *Încărcări de proiectare pentru construcții și alte structuri. Cap 26-31, Încărcări provenite din vânt*, SUA;
- Black C.J.M, Barrios H.H., Lopez A.L., 2009, *A comparison of cross-wind response evaluation for chimneys following different international codes*, 11th Americas Conference on Wind Engineering, Puerto Rico;
- Choi E.C.C., 2009, *Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles*, The Seventh Asia-Pacific Conference;
- CICIND, 2000, *Model Code for Steel Chimneys, Commentaries and Appendices*, International Committee for Industrial Chimneys, Switzerland;
- CNR-DT 207/2008, *Ghid pentru evaluarea acțiunii vântului și a efectelor acestuia asupra structurilor*, Italia;
- CR-1-1-4/2012, *Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor*, România;
- Davenport A.G., 1961, *The application of statistical concepts to the wind loading of structures* Proc. Inst. Civil Eng., vol.19, London, UK;
- Davenport A.G., 1963, *The buffeting of structures by gusts*, International Conference on wind effects on buildings and structures. Teddington, UK;
- Davenport A.G., 1967, *Gust Loading Factors*, J. Struct. Div., ASCE 93;
- Eiffel G., 1900, *La Tour de Trois Cents Metres*, Edition Lemerrier, Paris;
- Erhan E., 1979, *Clima și microclimatele din zona orașului Iași*, editura Junimea, Iași;
- Feldmann M., et al., 2010, *Hot dip zinc coating of prefabricated structural steel components*, JRC Scientific Technical Reports, EUR24286 EN-2010;
- Freeman S.A., Nicoletti J.P., Tyrell J.V., 1975, *Evaluation of existing buildings for seismic risk-a case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton*, Proceedings of 1st US National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, USA;
- GB 50009-2012, *Cod privind evaluarea încărcărilor pentru proiectarea structurilor aferente construcțiilor*, China;
- Gumbel E.J., 1958, *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, New York, USA;

- Gunathilaka A.M.L.N., Lewangamage C.S., Jayasinghe M.T.R., 2013, *Analysis of 4 legged self-supporting telecommunication towers for seismic loading using response spectrum method*, 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy, Sri Lanka;
- Hellman Gustav, 1916, *Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre*;
- Ifrim M., 1984, *Dinamica Structurilor și Inginerie Seismică*, Editura Didactică și Pedagogică, București;
- Kawecki J., Zuranski J., 2007, *Cross-wind vibrations of steel chimneys. A new case history*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics;
- Kinstler T.J., 2005, *Current Knowledge of the Cracking of Steels During Galvanizing*, GalvaScience LLC, Springfield, Alabama;
- London County Council (General) Powers Act, 1894-1909, *Section E*;
- Lungu D., Solari G., Bartoli G., Righi M., Vacareanu R., Villa A., 2002, *Reliability under wind loads of the Brancuși Endless Column, Romania*, International Journal of Fluid Mechanics Research;
- Lungu D., Văcăreanu R., 2000, *Technical Report – Wind action on Brancuși Endless Column at Targu Jiu, Romania, according to the wind loading codes from EU, USA and Romania*, Bucharest;
- Machacek J., Jandera M., Florea D., 2014, *Lecture18, Sustainable Constructions under Natural Hazards and Catastrophic Events*, EU Erasmus Mundus Master Course;
- NBCC 2010, *Codul Național al Construcțiilor. Încărcări provenite din vânt și efecte ale acestuia*, Canada;
- Newmark N.M., Hall W.J., 1982, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA;
- Nguyen CH., Freda A., Solari G., Tubino F., 2015, a. *Aeroelastic instability and wind-excited response of complex lighting poles and antenna masts*, Elsevier – Engineering Structures;
- Nguyen CH., Freda A., Solari G., Tubino F., 2015, b. *Experimental investigation of the aeroelastic behavior of a complex prismatic element*, Techno-Press, Wind and Structures;
- P100-1/2013, *Cod de proiectare seismică. Partea I-Prevederi de proiectare pentru clădiri*;
- Pagnini L.C., Solari G., 2015, *Joint modeling of the parent population and extreme value distributions of the mean wind velocity*, Journal of Structural Engineering ASCE;
- Piccardo G., Solari G., 2000, *3D Wind-excited response of slender structures: closed-form solution*, Journal of Structural Engineering, ASCE;
- Piccardo G., Solari G., 2002, *3D Gust effect factor for slender vertical structures*, Elsevier – Probabilistic Engineering Mechanics;
- Rădăceanu V., 2016, *Acțiunea dinamică a vântului pe structuri zvelte/flexibile*, Rap. Cercetare II, UTCB;

- Rădăceanu V., 2017, a., *Evaluation of alongwind response and crosswind forces for lighting masts at Iași International Airport*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, secția construcții - arhitectură, vol.63, UT Gh. Asachi, Iași;
- Rădăceanu V., 2017, b., *Wind speed statistics at Iași International Airport*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, secția construcții - arhitectură, vol.63, UT Gh. Asachi, Iași;
- Rădăceanu V., 2018, *Aspecte tehnice privind fabricarea și proiectarea pilonilor metalici înalți pentru iluminat cu secțiune monotubulară*, Buletinul Științific al UTCB, serie nouă, nr.1-2/2018, București;
- Repetto M.P., Solari G., 2012, *Closed-form prediction of the along-wind induced fatigue of structures*, Journal of Structural Engineering, ASCE;
- Simiu E., Scanlan R.H., 1985, *Wind Effects on Structures*, 2nd ed, Wiley Interscience;
- Solari G., 2013, *Brancuși Endless Column: A Masterpiece of Art and Engineering*, International Journal of High-Rise Buildings;
- Solari G., 2016, *Wind Engineering*, master degree course, University of Genoa, Italy;
- SR EN 1090-2+A1-2012, *Execuția structurilor de oțel și structurilor de aluminiu, Partea 2: Cerințe tehnice pentru structuri de oțel*;
- SR EN 1991-1-4-2006, Eurocod1, *Acțiuni asupra construcțiilor; acțiuni generale – acțiunea vântului*;
- SR EN 1993-1-9-2006, Eurocod3, *Proiectarea structurilor de oțel. Partea 1-9 Oboseala*;
- SR EN 1993-3-1-2007, Eurocod3, *Proiectarea structurilor de oțel. Turnuri, Piloni și Coșuri – Turnuri și Piloni*;
- SR EN 1993-3-2-2007, Eurocod3, *Proiectarea structurilor de oțel. Turnuri, Piloni și Coșuri – Coșuri*;
- SR EN 1998-6-2005, Eurocod8, *Proiectarea structurilor pentru rezistență la cutremur. Turnuri, Piloni și Coșuri*;
- SR EN 40-3/2003/2013, *Stâlpi pentru iluminat public. Proiectare și verificare*; echivalent al EN40-3;
- Tackle E.S., Brown J.M., 1978, *Note on the use of Weibull statistics to characterize wind speed data*, J. Appl. Meteorology 17;
- Tissandier G., 1889, *La Tour Eiffel de 300 metres – Description du monument, sa construction, ses organes mecaniques, son but et son utilite*, Edition G. Masson, Paris
- UBC 1927 Edition, *Unified Building Code*, International Conference of Building Officials, Long Beach, California.