

Aspecte privind calculul încărcării din vânt la panourile fotovoltaice

Ovidiu Bogdan, Dan Crețu

Departamentul de Rezistența Materialelor, Poduri și Tuneluri – Universitatea Tehnică de Construcții București

Abstract

Evaluarea încărcării date de acțiunea vântului pe suprafața panourilor fotovoltaice creează unele dificultăți date pe de o parte de interpretarea normativului de calcul și pe de altă parte de particularitățile acestor tipuri de structuri. Potrivit codului românesc de calcul, panourile fotovoltaice trebuie considerate ca fiind structuri de tipul copertinelor. Copertinele sunt însă structuri distincte, individuale sau atașate construcției principale, având o durată de exploatare medie, în timp ce panourile fotovoltaice sunt structuri dezvoltate pe suprafețe mari și cu o durată de exploatare redusă.

The wind action load evaluation for the photovoltaic panels is generating some difficulties by the interpretation of the wind action evaluation code and on the other hand, by this type of structures particularities. Due to the code prescriptions, the photovoltaic panels must be considered as canopy type structures. The canopies are individual or secondary structures attached to the principal structure, with medium time serviceability, but the photovoltaic panels are grouped structures with short time serviceability.

1. Introducere

Calculul încărcării din vânt pentru panouri fotovoltaice se face conform codului de calcul intrat recent în vigoare, CR 1-1-4-2011 [5]. Acesta înlocuiește vechiul cod de proiectare “Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului” având indicativul NP-082-04 [4]. Noua versiune a codului de proiectare nu elimină însă toate dificultățile de interpretare din vechiul cod. Potrivit codului de proiectare, evaluarea încărcării din vânt pentru acest tip de structuri se încadrează în categoria copertinelor.

Investițiile în parcuri de panouri fotovoltaice, ca și în alte tipuri destinate producerii de energie verde cum sunt parcurile eoliene, au avut în ultimii ani o creștere importantă. Potrivit datelor de la Transelectrica, în 2013 este estimat a se ajunge la o putere totală instalată de 140 MW în parcuri fotovoltaice. Tendința de creștere în următorii ani este evidențiată de previziunile Autorității Naționale de Reglementare în domeniul Energiei, care consideră că la sfârșitul anului 2016 puterea totală instalată în parcuri fotovoltaice va ajunge la 1500 MW, depășind cu 100 de MW puterea celor două reactoare nucleare de la Cernavodă. La un cost estimat de instalare de 2-3 milioane de euro pentru a produce un MW prin panouri fotovoltaice, valoarea investițiilor în acest tip de energie poate ajunge la 4 miliarde de euro. Este vorba așadar de sume foarte mari, din care o parte deloc neglijabilă este cea a structurii metalice de susținere. Aceste costuri sunt determinate de nivelul încărcărilor, în special de cele din vânt și zăpadă. Pe de altă parte, durata de viață a panourilor fotovoltaice este estimată la doar 20 de ani.

2. Evaluarea încărcării din acțiunea vântului. Dificultăți de interpretare a normativului

Evaluarea încărcării din vânt conform prescripțiilor din normativ prezintă unele incoerențe. Astfel nu rezultă suficient de clar când se folosesc presiunile distribuite $w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e)$ pe suprafețele exterioare ale copertinei și/sau forțele globale pe direcția vântului $F_w = c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$. Pe de altă parte, la paragraful 3.3 “Forțe din vânt” se precizează la aliniatul (3) că A_{ref} este *aria de referință orientată perpendicular pe direcția vântului* pentru clădiri/structuri (rel. 3.3) sau elementele sale (rel. 3.4). Ca urmare, conform textului, pentru calculul unor copertine la care panta este $\alpha = 0$ ar trebui ca $A_{ref} = 0$ și ca urmare, forța rezultantă din vânt F_w rezultă nulă. În realitate $A_{ref} \neq 0$ cu toate că forța globală nu este pe direcția vântului decât în cazuri particulare (pereți verticali, steaguri, etc.). Confuzia din textul codului provine de la traducerea eronată a textului codului original EN1991-1-4:2005 [2], în care:

- “ F_w - resultant wind force” alin. (2), paragraf 1.7 Symbols
- “The wind force F_w acting on a structure or a structural component may be determined directly by using Expression (5.3)

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

or by *vectorial summation* over the individual structural elements (as shown in 7.2.2) by using Expression (5.4)”

- “ A_{ref} is the reference area of the structure or structural element, given in Section 7 or Section 8”, în paragraful 5.3 alin. (2)
- “*vectorial summation* of the forces $F_{w,e}, F_{w,i}, F_{fr}$ ” și “ A_{ref} is the area of the individual surface”, paragraful 5.3 alin. (3).

După cum se poate vedea în textul original, nu este prevăzută poziția A_{ref} față de direcția vântului, sau de natura globală a acesteia, ci strict de ariile pe care se exercită presiuni/sucțiuni din vânt precum și de *sumarea vectorială* a rezultatelor individuale.

Formularea din noua versiune de cod contravine fenomenului fizic produs de prezența unor obstacole pe direcția de acțiune a vântului, considerat ca un fluid cu o curgere laminară. Formarea turbioanelor, care generează presiunile și suucțiunile cu o distribuție neuniformă pe suprafața copertinelor, indiferent de orientarea acestora, este de altfel prezentată în figura 4.15 din subcapitolul 4.3 “Copertine”.

O altă problemă care ar fi trebuit lămurită se referă la poziția forței globale F_w . În codul românesc NP-082 [4], cât și în codul original EN1991-1-4, se arată că presiunile distribuite sunt valori maxime locale și se utilizează la proiectarea elementelor de acoperiș și de fixare (îmbinare), iar F_w pentru calculul elementelor de rezistență structurale. Un calcul simplu arată că F_w calculat cu coeficienți de forță c_f este diferit față de F_w^* calculat pe baza presiunilor distribuite $c_{p,net}$, valorile din urmă fiind mai mari $F_w^* \gg F_w$. Diferența provine de la faptul că valorile

coeficienților de presiune $c_{p,net}$ pentru calculul presiunilor/sucțiunilor se referă la presiuni maxime locale.

Codul de proiectare CR-1-1-4-2011 este de fapt într-o însemnată proporție traducerea codului european EN 1991-1-4. Deși codul european este tradus și adoptat sub indicativul SR EN 1991-1-4:2006[3], având și o anexă națională indicativ SR EN 1991-1-4:2006/NB:2007 conținând valorile vitezelor vântului pe teritoriul României, se pune întrebarea, ca și în cazul altor coduri europene traduse și adoptate, de ce a mai fost necesar să se elaboreze un cod românesc cu același conținut.

3. Evaluarea încărcării din acțiunea vântului pentru panourile considerate

Panourile fotovoltaice la care ne vom referi au dimensiunile de 9740 mm x 3302 mm și sunt așezate sub un unghi de 25 de grade față de planul orizontal. Acestea se vor amplasa într-o zonă în câmp deschis, fără obstacole în apropiere. Structura de susținere este alcătuită din 5 cadre transversale din oțel dispuse la distanța de 2.10 m. Panourile fotovoltaice reazemă pe 4 pane longitudinale din aluminiu având lungimea de 9740 mm, dispuse la distanța de 0.825 m. Poziția primei pane față de marginea panoului fotovoltaic este la 351 mm. Paneele reazemă pe grinzile transversale din oțel.



Fig. 1 Structura panourilor fotovoltaice considerate (www.koenigsolar.com)

Cadrele transversale sunt alcătuite din:

- un stâlp vertical din oțel S355 având înălțimea de 2800 mm, din care 1400 sunt îngropați în teren;
- o grindă transversală din oțel S355 înclinată la 25 de grade, având lungimea de 2600 mm, prinsă articulat de capătul superior al stâlpului;
- două contrafișe din oțel S235 având lungimile de 988 mm și respectiv 692 mm, prinse articulat la nivelul stâlpului și al grinzii.

Dimensionarea și verificarea elementelor componente ale structurii de susținere a panoului ține seama de greutatea proprie a structurii și a panoului, de încărcarea din zăpadă având valoarea caracteristică $s_k = 1.6 \text{ KN/m}^2$ pentru amplasamentul considerat și de presiunea dinamică din vânt având valoarea de referință $q_b = 0.5 \text{ KN/m}^2$. Determinarea încărcării din vânt la nivelul panoului fotovoltaic se face considerând un amplasament din categoria a II-a de teren pentru care se obține o presiune dinamică de vârf cu valoarea $q_p(z) = 74.148 \text{ daN/m}^2$. Coeficienții de presiune neți (Fig. 2) sunt considerați pentru două direcții de acțiune a vântului, o direcție care imprimă o antrenare ascendentă a copertinei (sucțiune) și o altă direcție care imprimă antrenarea descendentă a acesteia (presiune). Ultima situație se cumulează cu efectul încărcărilor din zăpadă și greutate proprie, reprezentând de regulă combinația de încărcare defavorabilă care va dimensiona elementele structurale ale copertinei.

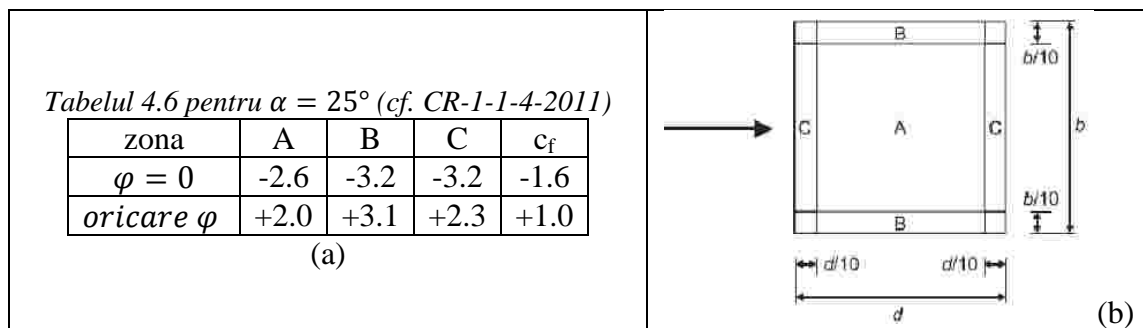


Fig.2 Valorile coeficienților de presiune $c_{p,net}$ și c_f pentru cazul considerat

Pentru dimensiunile panoului descrise mai sus, la nivelul unui cadru transversal se obțin forțele rezultante din acțiunea vântului în două situații: folosind coeficienți de forță și folosind coeficienți de presiune, conform valorilor din tabelul anterior. Forța rezultantă calculată cu coeficienți de forță și având efect de antrenare ascendentă a copertinei rezultă $F_w = 8.23 \text{ KN}$ iar cea având efect de antrenare descendentă a copertinei are valoarea $F_w = 5.142 \text{ KN}$. Evaluarea aceleiași forțe rezultante, însă calculată pe baza coeficienților de presiune, conduce la obținerea unor valori semnificativ mai mari, de $F_w^* = 14 \text{ KN}$ pentru forța având efect de antrenare ascendentă a copertinei și de $F_w^* = 10.6 \text{ KN}$ pentru forța având efect de antrenare descendentă a acesteia. Se poate observa că valorile forței rezultante din acțiunea vântului sunt mai mari dacă aceasta se determină pe baza coeficienților de presiune $c_{p,net}$. Este deci necesară precizarea clară a situației în care trebuie folosită forța rezultantă calculată pe baza coeficienților de presiune. Mai mult, trebuie să se țină seama de faptul că forța rezultantă calculată cu coeficienți de forță este aplicată excentric, la distanța $d/4$, astfel încât va determina și apariția unui moment încovoietor, spre deosebire de cea calculată pe baza coeficienților de presiune care, conform distribuției presiunilor din Fig. 2(b), se va aplica în centrul suprafeței expuse vântului.

4. Comparație între forțele rezultate din acțiunea vântului în diferite normative

Valorile coeficienților de presiune aerodinamică sunt determinate pe baza unor teste la vânt realizate în tunelul aerodinamic pe elemente la scară reală sau redusă. Este deci de așteptat ca pentru același tip de element să se obțină indiferent de codul de proiectare aceleași valori ale coeficienților de presiune. Nu se precizează însă pe ce bază sunt determinați coeficienții de presiune din normativul de calcul în vigoare *CR-1-1-4-2011*: au valori determinate pe baze deterministe sau pe baze probabilistice? Pentru a evidenția evoluția acestor coeficienți în normativele românești și pentru a compara valorile din codul în vigoare cu alte coduri similare din alte țări, s-au determinat componentele tursorului de reducere pentru cele două situații de evaluare la nivelul capătului superior al stâlpului (legătura cu grinda înclinată) pentru următoarele coduri de proiectare destinate evaluării încărcărilor provenite din acțiunea vântului: STAS 10101/20-90, EN 1991-1-4 Eurocode 1, SR EN 1991-1-4 Eurocod 1, NP-082-04, CR-1-1-4/2011, DIN 1055-4:2005-03 și ASCE 7-05.

Componentele tursorului de reducere (forță și moment) au fost determinate pentru un panou având aceleași dimensiuni, descrise la început, însă cu o înclinare de 10 grade, întrucât codul de calcul german DIN 1055-4:2005-03 nu prevede valori ale coeficienților de presiune pentru înclinări ale copertinelor mai mari de 10 grade. Pe de altă parte, se poate observa că noile coduri românești recente și eurocodurile precizează atât valorile coeficienților de presiune necesare pentru calculul elementelor acoperișului, cât și valorile coeficienților de forță necesari pentru evaluarea forței rezultante din vânt aplicată excentric. Spre deosebire de aceste coduri, normativul german, cel american și vechiul normativ de calcul românesc STAS 10101/20-90, prezintă doar valori ale coeficienților de presiune, pentru diferite înclinări ale copertinelor, indiferent de elementele structurale care trebuie calculate.

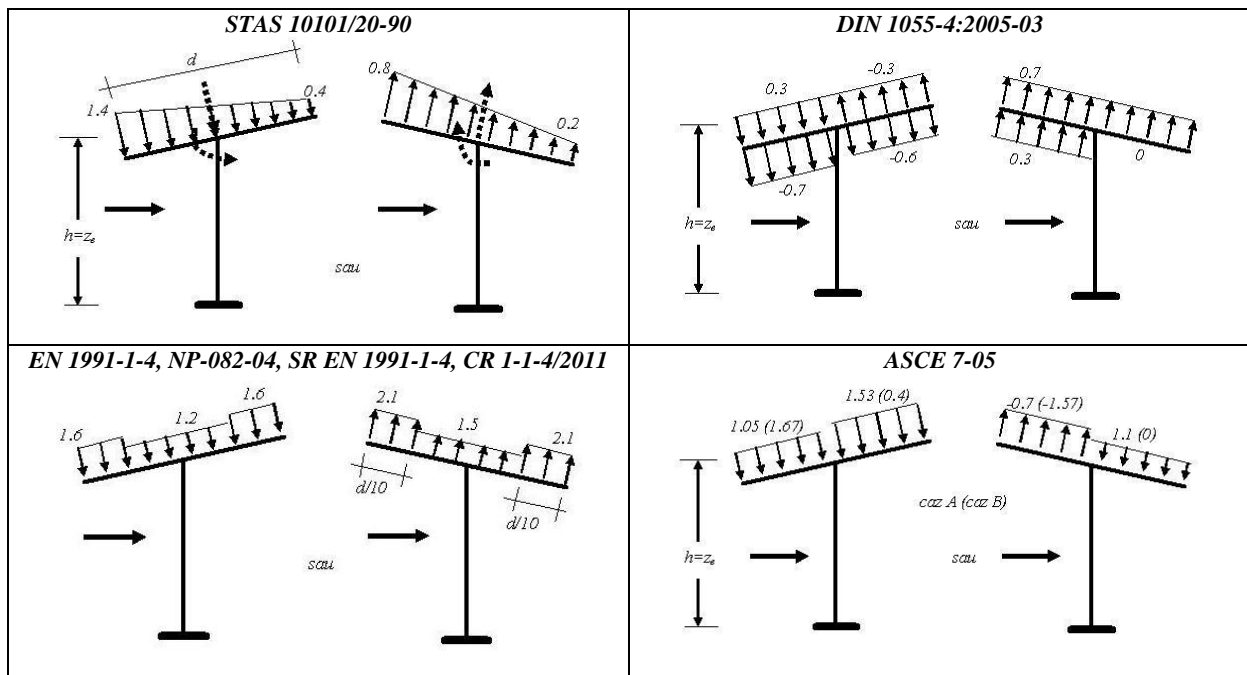


Fig. 3 Distribuția coeficienților de presiune în codurile considerate

Norma		Vânt descendent (pres.)		Vânt ascendent (suct.)	
		F_w	M_w	F_w	M_w
STAS 10101/90 [1]		0.9d	0.083d ²	0.5d	0.05 d ²
DIN 1055 [6]		0.65d	0.0875d ²	0.85d	0.0375 d ²
EN 1991-1-4 [2]	pres.	1.28d	0	1.62d	0
	c_f	0.5d	0.125d ²	0.9d	0.225 d ²
ASCE [7]	caz A	1.29d	0.06d ²	0.2d	0.225 d ²
	caz B	1.035d	0.159d ²	0.785d	0.196 d ²

Tabelul 1. Comparație între forțele rezultante determinate cu diferite coduri de proiectare

În tabelul anterior sunt prezentate valorile forțelor rezultante la nivelul îmbinării grindă-stâlp determinate pentru fiecare din normativele considerate. Codurile de proiectare românești recente SR EN 1991-1-4, NP-082-04, CR-1-1-4/2011 și eurocodul EN 1991-1-4 sunt toate reunite în tabel, deoarece pe de o parte, valorile coeficienților de presiune sunt identice, iar pe de alta acestea sunt singurele care specifică atât valori pentru coeficienții de forță cât și pentru cei de presiune. Din comparația forțelor rezultante pentru cele două cazuri de acțiune a vântului, cea cu efect de antrenare ascendentă a copertinei (sucțiune) și cea cu efect de antrenare descendentă (presiune), se poate observa că vechiul normativ românesc STAS 10101/90 conduce la valori ale forțelor rezultante comparabile cu cele date de normativul german, în timp ce codurile europene și românești actuale se apropie de codul american ASCE. Tendința așadar a fost de a corela normele europene cu cele americane și deci de a crește valorile coeficienților de presiune. Pe de altă parte însă, această tendință nu poate fi justificată decât în ipoteza unor niveluri de asigurare superioare, deci a unei evaluări a coeficienților de presiune pe baze probabilistice. Așadar valorile date în normative trebuie înțelese ca valori maxime așteptate. Acestea vor fi superioare celor obținute pe baza unor teste experimentale în tunelul aerodinamic. Pe de altă parte, valorile coeficienților din cod sunt valori determinate pentru cazul general al copertinelor, acestea fiind de obicei elemente structurale singulare cu o durată de exploatare medie, în timp ce panourile fotovoltaice sunt elemente grupate cu o durată de exploatare redusă. Efectul grupării elementelor de tip copertină, cum este cazul panourilor fotovoltaice (Fig. 1), nu este în nici un fel considerat în normativele enumerate. Efectul de grupare poate determina reduceri ale coeficienților de presiune pentru panourile fotovoltaice adăpostite, care nu se află în prima linie de acțiune a vântului.

5. Comparație între forțele rezultate din acțiunea vântului în tunelul aerodinamic și din codul românesc de proiectare CR-1-1-4/2011

Distribuția coeficienților de presiune poate fi determinată pe baza unor teste pe modele reale sau la scară redusă în tunelul aerodinamic, considerând diferite direcții de acțiune a vântului. Normativul american ASCE 7-05 recomandă folosirea a trei metode pentru calculul acțiunii vântului: o metodă simplificată pentru structurile regulate pentru care efectul turbulențelor este redus, o metodă analitică care ține seama de efectul turbulențelor și o metodă

bazată pe teste în tunelul aerodinamic. Aceasta din urmă poate fi aplicată oricărei structuri, însă devine obligatorie pentru acelea care pot avea neuniformități importante ale distribuției presiunilor date de acțiunea vântului.

Testele în tunelul aerodinamic au fost realizate de către Wacker Ingenieure din Germania [7], pe un model la scară redusă a panourilor fotovoltaice în discuție. Unghiul de incidență a acțiunii vântului a fost considerat în intervalul 0-90 de grade (vânt frontal – vânt lateral).

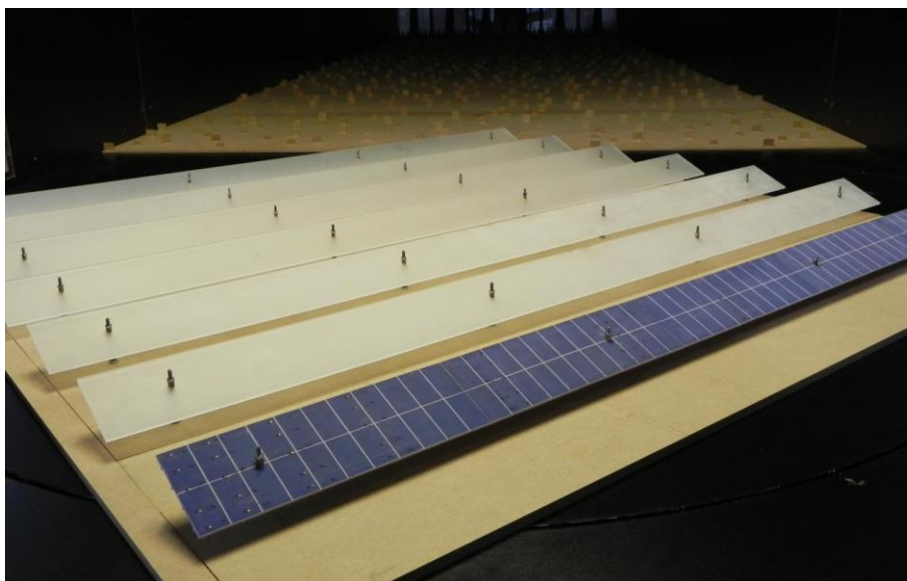


Fig. 4 Modelul la scară redusă în tunelul aerodinamic [7]

Valorile forțelor rezultante la nivelul îmbinării grindă-stâlp, calculate pe baza codului românesc [5] și a coeficienților de presiune obținuți experimental pe modelul încercat în tunelul aerodinamic [7] pentru o înclinare de 25^0 a panourilor, sunt comparate în Tabelul 2.

Norma/Test		Vânt descendent (presiune)		Vânt ascendent (sucțiune)	
		F_w	M_w	F_w	M_w
EN 1991-1-4	pres.	2.06d	0	2.72d	0
	c_f	1.00d	$0.2500d^2$	1.60d	$0.400 d^2$
Tunel de vânt	Max.	1.45d	$0.1160d^2$	1.70d	$0.204 d^2$
	Min.	0.30d	$0.039d^2$	0.60d	$0.102 d^2$

Tabelul 2. Comparație între forțele rezultante determinate conform codului european de proiectare și experimental în tunelul aerodinamic

Valorile maxime ale forțelor obținute experimental pe modelul din tunelul aerodinamic corespund unei zone de lățime 1m aflată în marginea grupului de panouri, iar cele minime pentru o zonă centrală situată în mijlocul grupului de panouri. Se pot observa diferențe importante între

valorile forțelor și momentelor rezultante calculate pe baza codului de proiectare și cele obținute experimental, ceea ce justifică necesitatea studiilor experimentale pe baterii de panouri.

Diferențe în minus s-au obținut experimental și la nivel de coeficienți de presiune. Această diferență va influența atât dimensiunile structurii de susținere cât și elementele directe de rezemare a panourilor fotovoltaice (panele).

6. Concluzii

Panourile fotovoltaice au o durată de exploatare redusă, de aproximativ 20 de ani, însă valoarea investiției într-un parc fotovoltaic este foarte ridicată. În normativul american pentru calculul la acțiunea vântului, ASCE-7-05, se consideră un factor de importanță al structurii, care în cazul unor structuri mai puțin importante poate determina o reducere a încărcării din vânt cu 13%. Credem că introducerea unui factor de importanță în codul românesc ar rezolva problemele asociate evaluării globale a tuturor structurilor de tip copertină și ar permite dimensionarea acestora în funcție de importanță.

Codul românesc [5] nu este îndeajuns de clar în privința situațiilor când ar trebui folosită o forță rezultantă din vânt determinată cu coeficienți de forță și când cu coeficienții de presiune. Se observă valori mai mari ale forțelor rezultante în situația din urmă. Normativele american [7] și german [6], la fel ca și vechiul normativ românesc [1], au preferat o singură variantă de evaluare a forței rezultante din vânt, cea pe baza presiunilor, lăsând astfel deoparte orice ambiguitate de interpretare.

Testele în tunelul aerodinamic ar trebui să fie o variantă acceptată și reglementată și de codul de proiectare, astfel încât pentru anumite structuri sau la dorința beneficiarului să poată fi evaluată sau verificată forța rezultată la nivelul structurii din acțiunea vântului.

Autorii doresc să mulțumească firmelor Alukönigstahl srl, Königsolar GmbH și Wacker Ingenieure GmbH pentru sprijinul acordat în realizarea acestei lucrări.

Bibliografie

- [1] STAS 10101/20-90 Acțiuni în construcții. Încărcări din vânt;
- [2] EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions. Wind action;
- [3] SR EN 1991-1-4 Eurocod 1: Acțiuni asupra structurilor. Partea 1-4: Acțiuni generale – Acțiuni ale vântului (ASRO octombrie 2001);
- [4] NP-082-04 Cod de proiectare. Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului (Monitorul Oficial al României partea I nr. 784/29.08.2005);
- [5] CR-1-1-4/2011 Cod de proiectare. Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului (revizuire NP 082-04);
- [6] DIN 1055-4:2005-03 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten;
- [7] ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and other Structures (2006);

[8] Wacker Ingenieure, König Solar: PV Freilandsystem 25 Grad
Windkanaluntersuchungen zur Ermittlung der bemessungsrelevanten
Winddruckverteilungen für geneigte, über dem Boden angebrachte Photovoltaikmodule,
April 2013