

# ĐÁP ỨNG KHÍ ĐỘNG HỌC CỦA MỘT KẾT CẤU CỘT THEO PHƯƠNG VUÔNG GÓC VỚI HƯỚNG GIÓ

## BUFFETING RESPONSES OF A SCULPTURAL TOWER IN ACROSS-WIND VIBRATION

Nguyễn Đình Kha<sup>1</sup>, Nguyễn Huy Cung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Tp.HCM, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Công Nghiệp Tp.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 2/3/2020, ngày phản biện đánh giá 4/5/2020, ngày chấp nhận đăng 3/6/2020.

### TÓM TẮT

Trong nhiều nghiên cứu và tiêu chuẩn thiết kế, tính toán kết cấu chịu tải trọng gió hiện hành, các thành phần khác nhau của dòng gió rối không được xem xét đầy đủ trong quá trình tính toán đáp ứng chuyển vị của kết cấu do gió. Điều này có thể dẫn đến những kết quả gây ảnh hưởng bất lợi đối với sự an toàn của kết cấu. Bài báo này trình bày một mô hình giải tích trong phân tích đáp ứng khí động lực học của các kết cấu mảnh thẳng đứng khi xét dao động của kết cấu theo phương vuông góc với hướng gió. Ảnh hưởng của các thành phần dòng rối khác nhau đến chuyển vị của kết cấu sẽ được nghiên cứu. Ví dụ số áp dụng cho một kết cấu thực tế sẽ minh họa cho lý thuyết và chỉ ra những hạn chế trong các cách tính toán được dùng phổ biến trong kỹ thuật.

**Từ khóa:** Dao động do gió; khí động lực học; dòng rối; kết cấu mảnh; đáp ứng theo phương vuông góc hướng gió.

### ABSTRACT

In many studies and current design wind codes, not all turbulent components are considered to estimate the displacement responses of structures subjected to wind loading. This limitation may result in estimations unsafe to structures. This paper presents an analytical approach for buffeting analysis of slender vertical structures in cross-wind direction. Effect of different turbulent components on structural displacements is investigated. A numerical application on a real structure will illustrate the theory and point out the limitations of conventional approaches used in engineering practice.

**Keywords:** Wind-induced vibrations; aerodynamics; turbulence; slender structures; cross-wind response.

### 1. DẪN NHẬP

Các kết cấu mảnh thẳng đứng như nhà cao tầng, cột điện, cột ăng-ten... thường rất nhạy cảm dưới tác động của gió. Các kết cấu này có tần số dao động riêng tương đối thấp nên dễ bị gió gây ra các chuyển vị lớn. Vì đặc tính tự nhiên của gió là một dòng rối (turbulence) với 3 thành phần chính theo các phương dọc (cùng phương với phương gió), ngang (vuông góc với phương gió) và đứng, chuyển vị của kết cấu do gió cũng thường được phân tích thành 3 thành phần cùng

phương tương ứng. Với kết cấu thẳng đứng thì thành phần dòng rối theo phương thẳng đứng không gây ra chuyển vị. Do đó, hai thành phần chuyển vị được quan tâm là chuyển vị theo phương gió (along-wind) và phương vuông góc với phương gió (cross-wind).

Hơn 60 năm qua, đáp ứng động của kết cấu mảnh chịu tác động của gió là một trong những chủ đề quan trọng trong lĩnh vực kỹ thuật gió. Nhiều nghiên cứu đã được đề xuất bằng các phương pháp khác nhau như:

phương pháp giải tích, phương pháp số, thí nghiệm bằng hầm gió cũng như các công cụ đo đạc thực tế... [1]. Các nghiên cứu đầu tiên được thực hiện từ thập niên 1960 với sự đóng góp tiên phong của Davenport [2, 3]. Ông đã tính các dạng dao động cơ bản và chuyển vị trung bình theo phương tác động và vuông góc với phương gió. Nhiều mô hình sau này đã được đề xuất để cải tiến những nghiên cứu của Davenport. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn chưa hoàn thiện. Các mô hình này được tổng hợp ở tài liệu [2].

Các nghiên cứu trước và các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành sử dụng nhiều mô hình khác nhau để tính toán các đáp ứng của kết cấu do gió theo phương vuông góc với phương gió [4, 5]. Trong đó, thành phần dòng rối cùng phương gió thường bị bỏ qua mà chỉ xét đến thành phần dòng rối vuông góc với phương gió [6, 7]. Điều này giúp cho các kỹ sư thiết kế có những công thức đơn giản hơn trong việc tính toán ứng xử của kết cấu do gió. Tuy nhiên, nó có thể dẫn tới kết quả thiếu chính xác vì các thành phần của dòng rối đều có thể tác động đến chuyển vị của kết cấu.

Xuất phát từ những nhận xét trên, bài báo này nhằm xây dựng bài toán phân tích đáp ứng chuyển vị của kết cấu theo phương vuông góc với phương gió. Thành phần dòng rối cùng phương với phương gió, vốn thường bị bỏ qua, đều được xem xét trong nghiên cứu này. Lý thuyết phổ và dao động ngẫu nhiên sẽ được áp dụng trong việc thiết lập lý thuyết tính toán. Để minh họa và kiểm chứng lý thuyết, một áp dụng cho kết cấu thực tế và so sánh kết quả tính toán với các cách tính toán hiện có sẽ được tiến hành. Từ đó, vai trò của các thành phần khác nhau của dòng rối đến chuyển vị kết cấu sẽ được làm rõ.

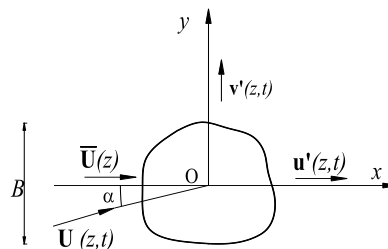
## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Xét một kết cấu mảnh thẳng đứng có chiều cao  $L$ , bề rộng đón gió  $B$ , có tiết diện bất kì như Hình 1 trong hệ trục tọa độ Decartes  $Oxyz$ . Trục  $z$  trùng với trục kết cấu. Kết cấu chịu tác động của gió có vận tốc trung bình  $\bar{U}(z)$  cùng hướng với trục  $x$ .

Đối với kết cấu thẳng đứng, vận tốc gió tức thời  $\mathbf{U}(z,t)$  có thể được biểu diễn bởi [2]:

$$\mathbf{U}(z,t) = \bar{\mathbf{U}}(z) + \mathbf{u}'(z,t) + \mathbf{v}'(z,t) \quad (1)$$

Trong đó  $\mathbf{u}'$  là thành phần rối theo phương tác động (cùng phương với trục  $x$  – along-wind);  $\mathbf{v}'$  là thành phần rối theo phương vuông góc với gió (cùng phương với trục  $y$  cross-wind),  $t$  là thời gian.



**Hình 1.** Tác động khí động lực học theo phương vuông góc lên một tiết diện bất kỳ tại độ cao  $z$ ;  $\alpha$ : góc tác động [2],[6]

Phương trình chuyển động của hệ theo phương vuông góc (phương  $y$ ) theo [8]:

$$m(z)\ddot{Y}(z,t) + c(z)\dot{Y}(z,t) + k(z)Y(z,t) = F_y(z,t) \quad (2)$$

$$F_y(z,t) = \bar{F}_y(z) + F_y'(z,t) \quad (3)$$

Trong đó  $\bar{F}_y$  (N/m) là lực gió trung bình theo phương  $y$ , phân bố trên một đơn vị chiều dài;  $F_y'$  (N/m) là lực gió theo phương  $y$ , phân bố trên một đơn vị chiều dài, gây ra bởi dòng rối;  $Y$  (m) là chuyển vị theo phương  $y$ ;  $\dot{Y}$  (m/s) là vận tốc theo phương  $y$ ;  $\ddot{Y}$  (m/s<sup>2</sup>) là gia tốc theo phương  $y$ ;  $k$  (N/m<sup>2</sup>) là độ cứng;  $c$  (Kg/ms) là hệ số cản;  $m$  (Kg/m) là khối lượng phân bố trên một đơn vị chiều dài của hệ.

Áp dụng giả thiết về tính dừng trong dao động (quasi-steady theory) và giả thiết  $\bar{U} \square u'$ ,  $\bar{U} \square v'$ , với  $\bar{U} = \|\bar{\mathbf{U}}\|$ ,  $u' = \|\mathbf{u}'\|$ ,  $v' = \|\mathbf{v}'\|$  là các thành phần vận tốc (m/s), lực tác động của gió như sau [2]:

$$\bar{F}_y(z) = \frac{1}{2} \rho B \bar{U}^2(z) C_L \quad (4)$$

$$F'_y(z, t) = \rho \bar{U}(z) BC_L u'(t) + \frac{1}{2} \rho \bar{U}(z) B(C_D + C'_L) v'(t) \quad (5)$$

Trong đó  $C_D$  và  $C_L$  lần lượt là hệ số lực đẩy (drag) và nâng (lift);  $C'_L$  là đạo hàm của  $C_L$  theo góc tác động;  $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) là khối lượng riêng của không khí.

Đối với kết cấu vẫn còn làm việc trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính thì chuyển vị có thể được phân tích thành:

$$Y(z, t) = \bar{Y}(z) + Y'(z, t) \quad (6)$$

Trong đó  $\bar{Y}$  (m) và  $Y'$  (m) lần lượt là đáp ứng chuyển vị gây ra bởi  $\bar{F}_y$  và  $F'_y$ .

Giả thiết rằng bề mặt nhám địa hình đồng nhất tại vị trí đang xét; phản ứng của kết cấu vẫn còn trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính; dạng dao động riêng đầu tiên là ảnh hưởng đáng kể nhất; các dạng dao động riêng còn lại (bậc hai trở lên) xem như tác động không đáng kể [2, 8, 9]. Thành phần trung bình của chuyển vị  $\bar{Y}$  được cho bởi [8]:

$$\bar{Y}(z) = \frac{\int_0^L \bar{F}_y(z) \phi_1(z) dz}{m_1 (2\pi f_1)^2} \quad (7)$$

Trong đó  $\phi_1(z)$  là dạng dao động riêng thứ 1 của kết cấu;  $f_1$  (Hz) là tần số riêng của kết cấu ở dạng dao động riêng thứ 1;  $m_1$  (Kg) là khối lượng suy rộng (generalised mass) tương ứng dạng dao động thứ 1:

$$m_1 = \int_0^L m(z) \phi_1^2(z) dz \quad (8)$$

Đáp ứng chuyển vị  $Y'$  là hàm ngẫu nhiên theo thời gian. Nếu xem gió là một quá trình ngẫu nhiên có tính dừng, đồng nhất và ergodic thì các giá trị này có thể được xử lý theo lý thuyết dao động ngẫu nhiên được rút ra từ các giá trị phương sai [1, 8]:

$$\sigma_Y^2(z) = \int_0^\infty S_Y(f) df \quad (9)$$

Trong đó  $S_Y$  (m<sup>2</sup>) là phổ đáp ứng của  $F'_y$  trong miền tần số;  $\sigma_Y^2$  (m<sup>2</sup>) là phương sai của chuyển vị theo phương vuông góc (phương y).

Áp dụng lý thuyết phân tích theo phổ,  $S_Y$  có thể được tính toán như sau [10]:

$$S_Y(f) = \int_0^L \int_0^L \left[ (\rho BC_L)^2 \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \cdot \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) S_{uu}(z_1, z_2, f) \right] dz_1 dz_2 + \int_0^L \int_0^L \left[ (\rho B)^2 (C_D + C'_L) C_L \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \cdot \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) S_{uv}(z_1, z_2, f) \right] dz_1 dz_2 + \int_0^L \int_0^L \left[ \frac{1}{2} [\rho B (C_D + C'_L)]^2 \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \cdot \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) S_{vv}(z_1, z_2, f) \right] dz_1 dz_2 \quad (10)$$

Trong đó  $S_{ab}$  là phổ của thành phần rời  $a, b$ .

Đối với kết cấu thẳng đứng, thành phần dòng rời  $u'$ ,  $v'$  hầu như không tương quan (uncorrelated) với nhau [2]. Do đó, công thức (9) được viết lại thành:

$$\sigma_Y^2(z) = \sigma_{Y(uu)}^2(z) + \sigma_{Y(vv)}^2(z) \quad (11)$$

Trong đó  $\sigma_{Y(uu)}^2$  (m<sup>2</sup>) là phương sai của chuyển vị theo phương vuông góc do thành phần khí rời phương tác động gây ra;  $\sigma_{Y(vv)}^2$  (m<sup>2</sup>) là phương sai của chuyển vị theo phương vuông góc do thành phần khí rời phương vuông góc gây ra.

$$\sigma_{Y(uu)}^2(z) = \int_0^\infty \int_0^L \int_0^L \left[ (\rho BC_L)^2 \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) S_{uu}(z_1, z_2, f) \right] dz_1 dz_2 df \quad (12)$$

$$\sigma_{Y(vv)}^2(z) = \int_0^\infty \int_0^L \int_0^L \left[ \frac{1}{2} [\rho B (C_D + C'_L)]^2 \bar{U}(z_1) \bar{U}(z_2) \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) S_{vv}(z_1, z_2, f) \right] dz_1 dz_2 df \quad (13)$$

Giá trị cực đại của chuyển vị tại độ cao  $z$  sẽ bằng tổng chuyển vị trung bình và chuyển vị lớn nhất ở độ cao đó [8]:

$$Y_{\max}(z) = \bar{Y}(z) + g_Y \sigma_Y(z) \quad (14)$$

Trong đó  $g_Y$  là hệ số đỉnh (Peak factor) theo phương vuông góc  $y$ , xác định bởi lý thuyết phân bố cực trị tiệm cận.

### 3. HÀM PHỔ CỦA CÁC THÀNH PHẦN RỐI

#### 3.1 Hàm phổ $S_{uu}(z_1, z_2, f)$

Phổ gió  $S_{uu}$  của thành phần rối  $u$  được cho bởi [2, 9, 11]:

$$S_{uu}(z_1, z_2, f) = \sqrt{S_u(z_1, f) \cdot S_u(z_2, f)} \cdot \text{coh}_{uu}(z_1, z_2; f) \quad (15)$$

Trong đó  $S_u$  là phổ vận tốc gió của thành phần rối theo phương  $x$  tại độ cao  $z$ ;  $\text{coh}_{uu}(z_1, z_2; f)$  là hàm gắn kết (coherence function) của  $S_u(z_1, f)$  và  $S_u(z_2, f)$ .

$$S_u(z, f) = \frac{4\chi^2}{[1 + \chi^2]^{4/3}} \frac{u_*^2}{f} \quad (16)$$

$$u_{*1} = \frac{k_a \bar{U}(z)}{\ln(z/z_0)} \quad (17)$$

$$\chi = \frac{1200f}{\bar{U}(10)} \quad (18)$$

$$\text{coh}_{uu}(z_1, z_2; f) = \exp \left\{ -K_{xu}(z_1, z_2, f) \frac{|z_1 - z_2|}{L} \right\} \quad (19)$$

$$K_{xu}(z_1, z_2, f) = \frac{2 \cdot f \cdot c_{zu} \cdot L}{\bar{U}(z_1) + \bar{U}(z_2)} \quad (20)$$

Trong đó  $u_*$  ( $\text{m/s}^2$ ) là vận tốc nhám bề mặt được điều chỉnh từ vận tốc nhám ứng với địa hình đồng cỏ  $u_{*1}$  với tỉ số  $u_*/u_{*1}$  được tra bảng theo [8];  $k_a$  là hằng số Karman;  $z_0$  (m) là chiều cao nhám bề mặt địa hình;  $c_{zu}$

là hệ số tác động phương đứng theo phương tác động của gió;  $\bar{U}(10)$  ( $\text{m/s}^2$ ) là vận tốc gió trung bình tại độ cao 10m.

#### 3.2 Hàm phổ $S_{vv}(z_1, z_2, f)$

Phổ gió  $S_{vv}$  của thành phần rối  $v$  được cho bởi [2, 9, 11]:

$$S_{vv}(z_1, z_2, f) = \sqrt{S_v(z_1, f) \cdot S_v(z_2, f)} \cdot \text{coh}_{vv}(z_1, z_2; f) \quad (21)$$

$$S_v(z, f) = \frac{17T_m}{[1 + 9.5T]^{5/3}} \cdot \frac{u_*^2}{f} \quad (22)$$

$$T_m = \frac{f \cdot z}{\bar{U}(z)} \quad (23)$$

$\text{coh}_{vv}(z_1, z_2; f)$  tính tương tự như  $\text{coh}_{uu}(z_1, z_2; f)$  trong công thức (19).

### 4. VÍ DỤ SỐ

Lý thuyết đề xuất nêu trên được áp dụng để tính toán đáp ứng khí động lực học của công trình nổi tiếng “Endless Column” hay còn gọi là cột Brancusi ở Romania chịu tác động của tải trọng gió theo [12] như Hình 2. Bảng 1 và Bảng 2 tóm tắt các thông số kết cấu kỹ thuật chính. Bảng 3 mô tả các thông số của gió tác động và địa hình.



Hình 2. Cột “Endless Column” Nguồn <http://www.romania-insider.com/>

**Bảng 1.** Thông số kết cấu tháp Endless Column [12]

Ký hiệu	Giá trị
$L$ (m)	29
$B$ (m)	0.9
$m$ (Tấn)	31
$f_1$ (Hz)	0.513
$f_1(z)$	$(z/L)^{1.75}$

**Bảng 2.** Hệ số khí động học tương ứng góc tác động [12]

Góc tác động $\alpha$	$0^\circ$	$5^\circ$	$45^\circ$
$C_D$	1.093	1.087	1.503
$C_L$	-0.0014	-0.159	0.020
$C'_D$	0	-0.060	0.062
$C'_L$	-1.5360	-1.6904	-0.3966

**Bảng 3.** Thông số gió và địa hình [12]

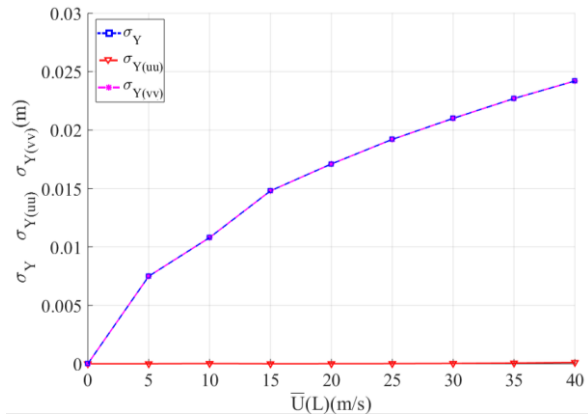
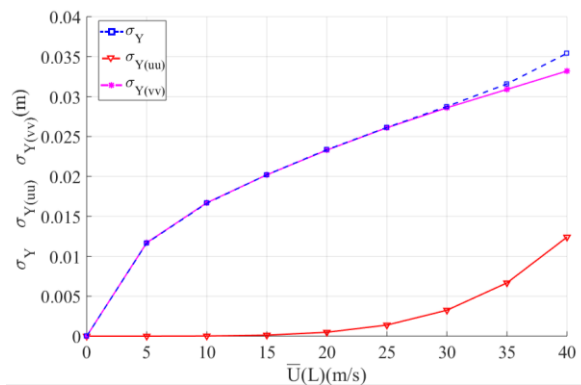
Ký hiệu	Giá trị
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1.225
$z_0$ (m)	0.05
$\bar{U}(z)$ (m/s)	$\bar{U}(h) \times (z/L)^{0.15}$
$\bar{U}(h)$ (m/s)	0 ~ 40
$c_{zu}$	7
$g_Y$	3.5

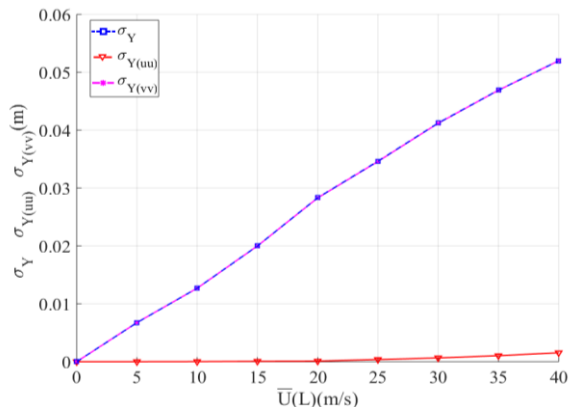
Dựa các công thức 11-13, số liệu từ Bảng 1, Bảng 2, Bảng 3, và dùng phương pháp số tính toán bằng Matlab, bài báo có được kết quả như sau.

Hình 3 thể hiện chuyển vị tại đỉnh tháp theo phương vuông góc của gió (cross-wind) tại góc tác động  $0^\circ$ , trong đó  $\sigma_Y$  là độ lệch chuẩn của chuyển vị theo phương  $y$  do gió gây ra;  $\sigma_{Y(uu)}$  là độ lệch chuẩn của chuyển vị theo phương  $y$  do thành phần khí rối phương  $x$  gây ra;  $\sigma_{Y(vv)}$  là độ lệch chuẩn của chuyển vị theo phương  $y$  do thành phần khí rối phương  $x$  gây ra. Có thể nhận thấy rằng giá trị  $\sigma_Y$  nằm gần trùng với giá trị  $S_{Y(vv)}$ , giá trị  $S_{Y(uu)}$

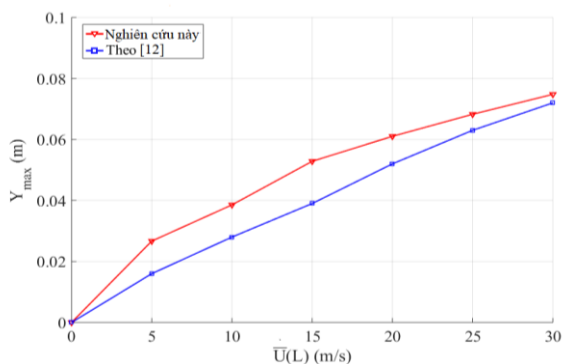
bằng 0. Do đó, thành phần khí rối  $u'$  có thể bỏ qua khi tính toán chuyển vị  $S_Y$ .

Hình 4 thể hiện chuyển vị tại đỉnh tháp theo phương vuông góc của gió (cross-wind) tại góc tác động  $5^\circ$ . Có thể nhận thấy rằng giá trị  $S_Y$  nằm gần trùng với giá trị  $S_{Y(vv)}$ , khi  $\bar{U}(L) < 25\text{m/s}$  giá trị  $S_{Y(vv)}$  rất nhỏ không đáng kể (gần bằng 0) nhưng khi  $\bar{U}(L) \geq 25\text{m/s}$  thì giá trị  $\sigma_{Y(uu)}$  có giá trị lớn. Nhận xét này tương tự ở Hình 5 tại góc tác động bằng  $45^\circ$ . Điều đó chứng tỏ rằng khi vận tốc gió tương đối lớn, thành phần khí rối  $u'$  có đóng góp vào chuyển vị  $S_Y$ . Do đó, việc bỏ qua phần này như các nghiên cứu trước cũng như ở một số tiêu chuẩn chống gió sẽ dẫn tới  $S_Y$  nhỏ hơn khi xét đầy đủ các thành phần của dòng rối. Khi đó, việc tính toán sẽ gây bất lợi cho kết cấu trong điều kiện gió mạnh.

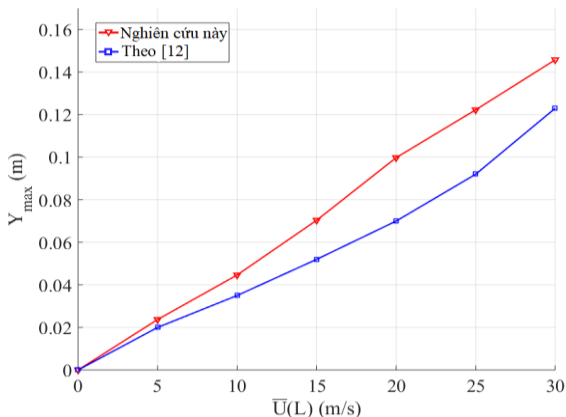
**Hình 3.** Độ lệch chuẩn của chuyển vị tại đỉnh kết cấu ở góc  $0^\circ$ **Hình 4.** Độ lệch chuẩn của chuyển vị tại đỉnh kết cấu ở góc  $5^\circ$



**Hình 5.** Độ lệch của chuyển vị tại đỉnh kết cấu ở góc  $45^0$



**Hình 6.** So sánh giá trị cực đại của chuyển vị tại đỉnh kết cấu ở góc  $0^0$  giữa nghiên cứu của bài báo và theo [12]



**Hình 7.** So sánh giá trị cực đại của chuyển vị tại đỉnh kết cấu ở góc  $45^0$  giữa nghiên cứu của bài báo và theo [12]

Hình 6-7 so sánh chuyển vị tại đỉnh kết cấu tại góc  $0^0$  và  $45^0$  tính theo phương pháp của bài báo và nghiên cứu của Solari [12]. Điều cần nhấn mạnh là phương pháp sử dụng ở nghiên cứu [12] là giống với một số tiêu chuẩn hiện hành, trong đó có Eurocode [5] và ASCE [4]. Theo đó, đối với chuyển vị phương vuông góc với hướng gió (cross-wind), thành phần rời theo phương gió dọc ( $u'$ ) bị bỏ qua. Có thể nhận thấy từ hình 6-7 rằng chuyển vị tính theo [12] nhỏ hơn so với phương pháp của bài báo này. Do đó, việc không xét đầy đủ các thành phần của dòng rời sẽ gây bất lợi cho kết cấu.

## 5 KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết lập mô hình giải tích để phân tích đáp ứng của kết cấu mảnh thẳng đứng theo phương vuông góc của gió. Bên cạnh thành phần dòng rời vuông góc với phương gió, mô hình này có xét đến thành phần dòng rời cùng phương với phương gió vốn bị bỏ qua trong các nghiên cứu trước.

Ví dụ số được áp dụng cho một kết cấu thực tế đã chỉ ra vai trò rất quan trọng của thành phần dòng rời cùng phương với phương gió. Đối với kết cấu mảnh thẳng đứng, việc bỏ qua thành phần có thể dẫn tới những kết quả thiếu chính xác và ảnh hưởng bất lợi đối với kết cấu.

Những nhận xét trên cho thấy rằng cần thêm các nghiên cứu để kiểm chứng thêm vấn đề mà bài báo đã đặt ra cũng như các tiêu chuẩn chống gió đang được sử dụng.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.04-2017.321.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Kim, K. You, J. You, Across and along-wind responses of tall building, Journal of Central South University, 21, pp.4404-4408, 2014.
- [2] G. Solari & F. Tubino, Wind Effects on Buildings and Design of Wind-sensitive Structures, International Centre for Mechanical Sciences, pp.137-163, New York, USA, 2007.

- [3] A.G. Davenport, The spectrum of horizontal gustiness near the ground in the high wind, *Quart J Roy Meteorol Soc*, 87, pp.194-211, 1961.
- [4] ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, 2010
- [5] Eurocode 1: Actions on structures - General Actions - Part 1-4: Wind Actions, 1992.
- [6] E. Simiu, Design of buildings for wind. A guide for ASCE 7-10 Standard users and designers of special structures, John Wiley & Sons, 2, 2011.
- [7] I. Calotescu & G. Solari, Alongwind load effects on free-standing lattice towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016.
- [8] E. Simiu & R. Scanlan, Wind effects on structures - Fundamentals and Application to Design, New York: John Wiley & Sons, 3rd ed, 1996.
- [9] G. Solari & G. Picardo, Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16, pp.73-86, 2001.
- [10] K. D. Nguyen, Phân tích đáp ứng khí động lực học cho kết cấu mảnh thẳng đứng chịu tải trọng gió, Luận Văn Thạc Sĩ, trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia TPHCM, 2020.
- [11] G. Picardo & G. Solari, 3D gust effect factor slender vertical structures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17, pp.143-155, 2002.
- [12] G. Solari, Brancusi Endless Column: A Masterpiece of Art and Engineering, *Internal Journal of High-Rise Building*, Vols. 2-3, pp. 193-212, 2013.

**Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:**

Nguyễn Huy Cung

Trường Đại học Công Nghiệp TP.HCM

Email: nguyenuyhucung@iuh.edu.vn