

NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG CÁNH ĐIỀU CHỈNH GIÓ FLAP TRÊN MẶT CẮT NGANG DẦM HÌNH CHỮ NHẬT CÓ TỈ SỐ TIẾT DIỆN NHỎ THÔNG QUA MÔ PHỎNG CFD SỬ DỤNG MÔ HÌNH RANS

TS. TRẦN ANH ĐẠT

*Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh,
Trường Đại học Giao thông vận tải*

TÓM TẮT:

Thời gian gần đây, các giải pháp cải tiến hình dáng khí động học cho mặt cắt ngang dầm cầu nhịp lớn nhằm giảm thiểu hoặc tránh những tác động nguy hiểm do tải trọng gió gây ra rất được quan tâm. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu hiệu ứng của cánh điều chỉnh gió flap được gắn trên mặt cắt ngang hình chữ nhật có tỉ số tiết diện chiều rộng trên chiều cao nhỏ thông qua mô phỏng số động lực học chất lưu CFD (Computational Fluid Dynamics) ứng dụng mô hình RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). Kết quả nghiên cứu đóng vai trò quan trọng trong việc hoàn thiện bộ hướng dẫn về ứng dụng cánh điều chỉnh gió flap nói riêng và các giải pháp cải tiến hình dáng khí động học khác nói chung cho mặt cắt ngang cầu.

Từ khóa: giải pháp khí động học, mặt cắt ngang cầu nhịp lớn, tải trọng gió, flap, RANS.

ABSTRACT:

In recent years, there have been deep concerns regarding aerodynamic countermeasures attached to long-span bridge cross-sections so as to reduce or avoid the negative impacts of wind load. This paper presents research results on the effect of flap attached to a rectangular cross-section with the width-to-depth ratio of small value through numerical simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) using RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) approach. The results play vital role in contributing a guidance of using flap in specific and other aerodynamic countermeasures in general for long-span bridge cross-sections.

Keywords: aerodynamic countermeasures, long-span bridge section, wind load, flap, RANS.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thiết kế kháng gió cho cầu nhịp lớn, cánh điều chỉnh gió flap được gắn trên kết cấu nhịp nhằm điều chỉnh dòng chảy gió qua mặt cắt ngang dầm để từ đó làm giảm biên độ dao động hoặc tránh các tác động bất lợi do tải trọng gió gây ra. Tuy nhiên, một cơ chế rõ ràng về dòng chảy gió cũng như ứng xử khí động học của kết cấu nhịp với sự có mặt của cánh điều chỉnh gió flap vẫn cần nhiều nghiên cứu đầy đủ hơn. Những nghiên cứu sâu hơn sẽ đóng góp đáng kể trong

việc xây dựng bộ hướng dẫn sử dụng các giải pháp cải tiến hình dáng khí động học của kết cấu nhịp.

Cánh điều chỉnh gió flap thường được thiết kế dựa trên các kết quả thí nghiệm thu được trong hầm gió. Với cách truyền thống trên, việc lựa chọn kích thước và các thông số định vị flap được thực nghiệm rất nhiều lần và tốn nhiều thời gian, nhưng nhiều trường hợp vẫn không thu thập đủ thông tin cơ chế dòng chảy theo yêu cầu. Ngày nay, sự phát triển của kỹ thuật mô

phỏng số động lực học chất lưu Computational Fluid Dynamics (CFD) đem đến nhiều thuận lợi trong công tác khảo sát dòng chảy gió qua chướng ngại vật, điều này tạo ra triển vọng lớn để làm rõ cơ chế dòng chảy gió qua mặt cắt ngang dầm.

Nhiều kết quả thú vị được tìm thấy trong các nghiên cứu của Sarwar [1] và tác giả [2]. Theo các nghiên cứu trước đây, cánh điều chỉnh gió flap lắp đặt trên một dầm hộp với thông số định vị, kích thước và góc đặt lớn sẽ đem lại hiệu quả cao trong việc chiết giảm dao động do xoáy khí vortex gây ra (vortex-induced vibration VIV). Để cung cấp thông tin nền tảng cho việc xây dựng bộ hướng dẫn ứng dụng flap, các nghiên cứu tiếp theo nên được mở rộng theo hướng điều tra hiệu ứng của flap đối với các mặt cắt ngang hình chữ nhật. Bài báo này khảo sát và điều tra hiệu ứng của flap gắn trên mặt cắt ngang hình chữ nhật với tỉ số tiết diện chiều rộng trên chiều cao của mặt cắt B/D bằng 2 thông qua mô phỏng số CFD sử dụng cách tiếp cận RANS cùng mô hình mới về $k-\epsilon$ để xử lý độ rối của các xoáy khí phát sinh (new $k-\epsilon$ eddy viscosity turbulent model). Các vị trí lắp đặt flap được thay đổi trong các mô phỏng nhằm làm rõ sự ảnh hưởng và hiệu quả của cánh điều chỉnh gió. Một cách cụ thể hơn, mật độ phổ (Power Spectrum Density - PSD) của lực nâng (lift force) do tải trọng gió gây ra, hệ số ứng suất trung bình và giá trị hiệu dụng (Root Mean Square - RMS) của hệ số ứng suất trên mặt cắt ngang dầm (surface pressure coefficient) sẽ được khảo sát chi tiết để khẳng định vai trò của flap.

2. PHƯƠNG TRÌNH CHỦ ĐẠO VÀ MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN

Tất cả mô phỏng tính toán trong bài báo được thực hiện trên nền tảng của những phương trình chủ đạo theo cách tiếp cận RANS. Những phương trình Navier-Stokes được giải bằng cách lấy trung bình những thông số không ổn định tương ứng với tính chất rối của gió. Mô hình mới về k-ε để xử lý độ rối các xoáy khí phát sinh được ứng dụng để đóng các phương trình chủ đạo. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm thương mại STAR-CCM+ để thực hiện các phân tích ứng xử khí động học.

2.1. Phương trình chủ đạo

Phương trình chủ đạo đối với dòng chảy không nén và không xét đến lực thể tích được viết dưới dạng tensor trong hệ tọa độ Descartes bởi Ferziger và Peric năm 2002 như sau [3]:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u_i' u_j'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Trong đó: \bar{u}_i, \bar{u}_j là những vận tốc trung bình của dòng chảy; u_i', u_j' là độ dao động của vận tốc dòng chảy; \bar{p} là ứng suất trung bình; ρ là mật độ dòng chảy; $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ được gọi là các ứng suất Reynolds và $\overline{\rho u_i' u_j'}$ là các thành phần tensor ứng suất nhớt trung bình của dòng chảy, được tính như sau:

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} \delta_{ij} k; \quad \overline{\rho \tau_{ij}} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Trong đó: μ là độ nhớt động của dòng chảy; μ_t là độ nhớt do xoáy khí; δ_{ij} là delta Kronecker; k là động năng rối của dòng chảy.

Mô hình mới về k-ε xử lý độ rối của các xoáy khí phát sinh được sử dụng để đóng các phương trình trên. Mô hình này được đề xuất bởi Shih và cộng sự vào năm 1994 [4] để cải thiện mô hình k-ε tiêu chuẩn truyền thống trong các trường hợp dòng chảy rối có chỉ số Reynolds cao. Các phương trình và cách xác định các đại lượng liên quan được mô tả như sau:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \varepsilon}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} L = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$P_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2; \quad S = \sqrt{2 S_j S_j}; \quad S_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* \frac{k}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \bar{\Omega}_{ij} \bar{\Omega}_{ij}}; \quad \bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k; \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi; \quad \varphi = \arccos(\sqrt{6} W); \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3}; \quad \bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

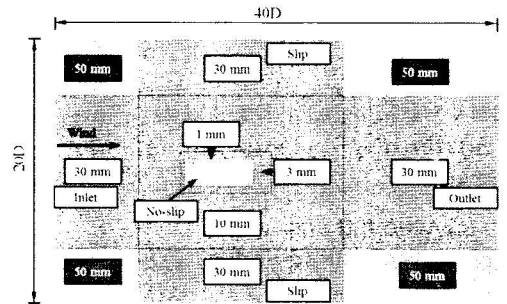
$$C_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\eta}{5 + \eta} \right\}; \quad \eta = \frac{S k}{\varepsilon}; \quad (10)$$

$$\sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30;$$

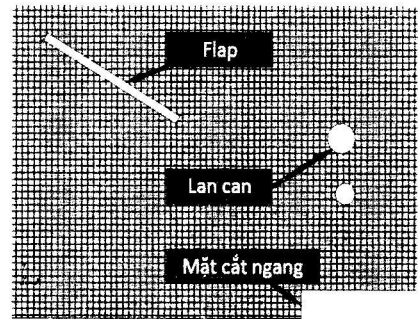
$$C_2 = 1.9; \quad A_0 = 4.0$$

2.2. Mô phỏng tính toán

Nghiên cứu này khảo sát vùng ảnh hưởng dòng chảy ứng với miền tính toán có chiều rộng 40D và chiều cao 20D, D là chiều cao của mặt cắt ngang kết cấu nhịp. Để tiếp cận gần nhất với điều kiện trong thực tế, điều kiện biên không trượt “no-slip” được cài đặt dọc chu vi mặt cắt ngang và điều kiện biên trượt “slip” được gán tại các biên giới hạn của miền tính toán như hình 1. Miền tính toán được cấu thành từ 200.000 các ô lục giác và tứ giác thông qua hệ thống phân chia lưới như hình 2. Kích thước các ô chia trong miền tính toán được tối ưu hóa để đảm bảo độ chính xác và thời gian phân tích các mô phỏng.



Hình 1. Miền mô phỏng tính toán

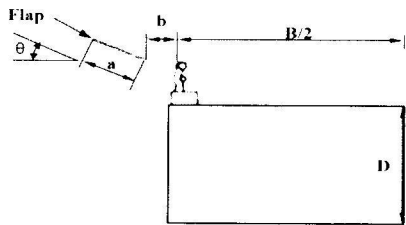


Hình 2. Hệ thống lưới trong mô phỏng

Kích thước đặc trưng của mặt cắt ngang dầm hình chữ nhật, thông số dòng chảy gió, tỉ lệ dùng trong mô phỏng số được thể hiện trong bảng 1. Để khảo sát vai trò của cánh điều chỉnh gió flap, cánh này được thiết lập vào mô phỏng dưới các trường hợp: phía đầu gió, phía cuối gió và cả hai phía.

Bảng 1. Các thông số dùng trong mô phỏng

Thông số	Đơn vị	Tỉ lệ
Bề rộng (B)	(m)	0.2
Chiều cao (D)	(m)	0.1
Tỉ lệ (B/D)		2
Số lượng phần tử		200,000
Chỉ số Reynolds number		10,000
Tỉ lệ mô hình		1/50
Bước thời gian (Δt)	(s)	0.0005



Hình 3. Kích thước hình học của flap

2.3. Độ tin cậy của mô phỏng tính toán

Độ tin cậy của mô phỏng tính toán CFD được xác thực thông qua việc so sánh kết quả thu được của nghiên cứu ứng với các trường hợp mặt cắt ngang hình chữ nhật điển hình (có tỉ lệ tiết diện B/D bằng 3.0, 3.5, 4.0) với kết quả nghiên cứu của các tác giả khác. Kết quả thu được trên các mô phỏng số tiếp cận gần với các giá trị thu được từ nghiên cứu thực nghiệm của Nakaguchi cùng cộng sự năm 1968 [5] và Mizota cùng cộng sự năm 1988 [6]. Ngoài ra, kết quả của tác giả cũng hội tụ tốt với các giá trị thu được từ nghiên cứu mô phỏng số của Sohankar [7]. Các so sánh về hệ số lực đẩy trung bình C_D (mean drag coefficient) và giá trị hiệu dụng của hệ số lực nâng (RMS của C_L) do dòng chảy gây ra được thể hiện lần lượt trong các bảng 2, bảng 3.

Bảng 2. Bảng so sánh hệ số lực đẩy trung bình do dòng chảy ()

STT	Tỉ lệ mặt cắt	Kết quả của tác giả	Kết quả của Nakaguchi	Kết quả của Mizota	Kết quả của Sohankar
1	3.0	1.55	1.26	1.40	1.21
2	3.5	1.59	-	-	1.20
3	4.0	1.32	1.18	1.40	1.20

Bảng 3. Bảng so sánh giá trị hiệu dụng hệ số lực nâng do dòng chảy (RMS của)

STT	Tỉ lệ mặt cắt	Kết quả của tác giả	Kết quả của Sohankar
1	3.00	0.53	0.60
2	3.50	0.51	0.53
3	4.00	0.42	0.50

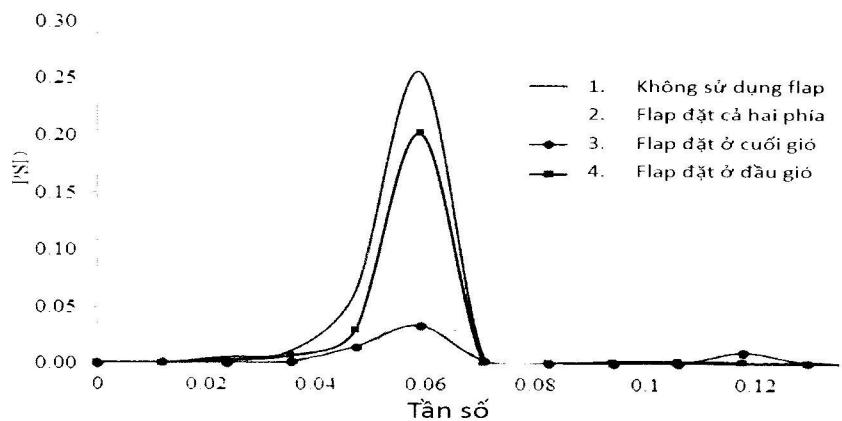
3. KẾT QUẢ

3.1. Lực nâng do dòng chảy tác động

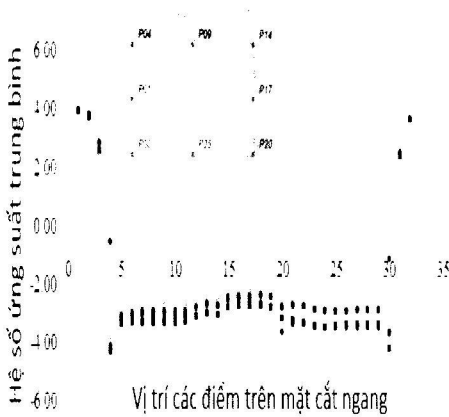
Kết quả của mô phỏng chỉ ra rằng mật độ phổ của lực nâng PSD C_L do dòng chảy gây ra đối với dầm có mặt cắt ngang đang khảo sát có giá trị lớn nhất trong trường hợp không sử dụng cánh điều chỉnh gió flap. Trường hợp lắp đặt flap tại phía đầu gió, giá trị này giảm không đáng kể. Tuy nhiên, PSD C_L giảm đáng kể khi flap được đặt ở cả hai phía đầu và cuối gió. Kết quả tốt nhất thu được trong trường hợp chỉ cần lắp đặt flap tại vị trí cuối gió. Điều này chứng tỏ flap ở phía cuối gió đóng vai trò rất quan trọng trong việc điều tiết các xoáy khí Karman xuất hiện ở đuôi gió. Sự giống nhau về hiện tượng trên được tìm thấy trong nghiên cứu này và nghiên cứu trước đây đối với trường hợp mặt cắt ngang dạng hình hộp [2].

3.2. Ứng suất trên mặt cắt ngang dầm

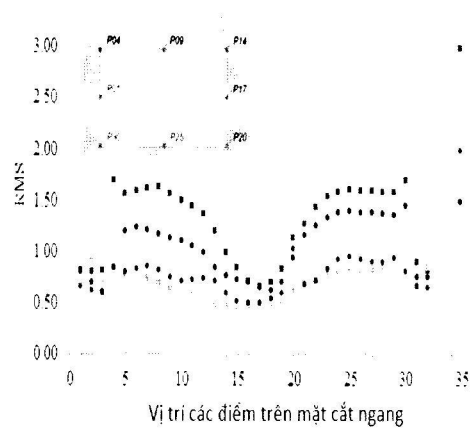
Hệ số ứng suất trung bình và giá trị hiệu dụng của ứng suất trên mặt cắt ngang được trình bày lần lượt ở hình 5 và hình 6. Trường hợp có hoặc không có mặt flap, nghiên cứu này không tìm thấy sự khác nhau đáng chú ý tại các giá trị của hệ số ứng suất trung bình. Tuy nhiên, giá trị hiệu dụng của ứng suất trên mặt cắt ngang thì ứng xử khác. Hình 6 thể hiện sự thay đổi lớn về giá trị ứng suất theo thời gian tại các điểm trên mặt cắt ngang trong trường hợp không lắp đặt flap. Giá trị RMS cao tập trung chủ yếu tại mặt trên (từ điểm P04 đến P14) và mặt dưới (từ điểm P20 đến P30) của tiết diện. Flap được lắp đặt ở phía đầu gió bắt đầu mang lại hiệu quả trong việc làm giảm sự biến động của ứng suất trên tiết diện dầm, RMS của ứng suất tại các điểm này được tìm thấy có giá trị nhỏ hơn đáng kể so với trường



Hình 4. Mật độ phổ lực nâng do dòng chảy gây ra PSD C_L



Hình 5. Hệ số ứng suất trung bình trên mặt cắt ngang



Hình 6. Giá trị hiệu dụng ứng suất trên mặt cắt ngang- RMS của ứng suất

- 1. Không sử dụng flap
- 2. Flap đặt cả hai phía
- 3. Flap đặt ở cuối gió
- 4. Flap đặt ở đầu gió

- 1. Không sử dụng flap
- 2. Flap đặt cả hai phía
- 3. Flap đặt ở cuối gió
- 4. Flap đặt ở đầu gió

hợp không sử dụng flap. Hiệu quả của flap càng được khẳng định khi chúng được bố trí ở cả hai phía hoặc chỉ ở phía cuối gió, khi đó giá trị RMS của ứng suất tại các điểm trên tiết diện đều giảm đi rõ rệt.

Vai trò của flap tại phía cuối gió rất quan trọng khi điều tiết dòng khí khu vực đuôi gió. Flap mang lại hiệu quả cao trong việc chiết giảm sự hình thành vùng hỗn loạn phía đuôi gió. Sự có mặt của flap tại phía cuối gió làm cho dòng chảy được điều chỉnh đi xuống nhằm làm giảm sự hình thành các xoáy khí Karman [2]. Chính vì vậy, mật độ phổ lực nâng và giá trị hiệu dụng của ứng suất trên mặt cắt ngang dầm đều có giá trị nhỏ khi flap được bố trí tại phía cuối gió.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các mô phỏng tính toán CFD sử dụng cách tiếp cận RANS cùng với mô hình mới về k-ε, hiệu quả của cánh điều chỉnh gió flap được điều tra và phân tích trong bài báo này ứng với trường hợp mặt cắt ngang dầm hình chữ nhật có tỉ số tiết diện B/D bằng 2. Một vài kết luận và kiến nghị được đúc kết như sau:

- Cách tiếp cận RANS cùng với mô hình mới về k-ε để xử lý tính rối cục bộ của dòng chảy do Shih và cộng sự đưa ra vào năm 1994

[4] tỏ ra phù hợp khi ứng dụng cho trường hợp dòng chảy gió qua mặt cắt ngang dầm hình chữ nhật sử dụng trong nghiên cứu này;

- Cánh điều chỉnh gió flap mang lại hiệu quả cao trong việc điều tiết dòng chảy khu vực cuối gió. Với tỉ số tiết diện mặt cắt B/D bằng 2, flap phía cuối gió có vai trò rất quan trọng trong việc chiết giảm sự hình thành các xoáy khí Karman

ở đuôi gió. Mật độ phổ lực nâng và giá trị hiệu dụng của ứng suất tại các điểm trên mặt cắt ngang dầm đều giảm rõ rệt khi lắp đặt flap tại phía cuối gió.

- Kiến nghị: Nghiên cứu thêm tác dụng của flap ứng với các kích thước khác nhau cho nhiều mặt cắt ngang dầm hình chữ nhật có tỉ số tiết diện B/D từ nhỏ đến lớn. ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sarwar, M. W. and Ishihara, T., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, pp. 701-711, 2010, "Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge section by aerodynamic countermeasures";

[2]. Tran D., Katsuchi H., Yamada H. and Nishio M, *Journal of Structural Engineering, JSCE*, vol.60A, pp.387-396, 2014, "Numerical Analysis for Effect of Flap on Wind Flow across Box Girder Section";

[3]. Ferziger, J.H., Peric, M., *Book, Springer, Berlin, Germany 2002*, "Computational methods for fluid dynamics";

[4]. Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., *NASA Technical Memorandum 106721*, pp. 1-30, 1994, "A New Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation";

[5]. Nakaguchi H., Hashimoto K. and Muto S., *Journal of Japan Society of Aeronautical and Space Science*, vol. 16, pp. 1-5, 1968, "An experimental study on aerodynamics drag of rectangular cylinders";

[6]. Mizota T. and Okajima A., *Japan Society of Civil Engineering*, vol. 312, pp. 39-47, 1981, "Experimental studies of unsteady flows around rectangular prisms";

[7]. Sohankar A., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, pp. 640-655, 2008, "Large eddy simulation of flow past rectangular section cylinders: side ratio effects".