

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN 10687-12-4:2023

IEC TR 61400-12-4:2020

Xuất bản lần 1

HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ –

**PHẦN 12-4: HIỆU CHUẨN VỊ TRÍ BẰNG SỐ DÙNG CHO
THỬ NGHIỆM HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG CỦA TUABIN GIÓ**

Wind energy generation systems –

Part 12-4: Numerical site calibration for power performance testing of wind turbines

HÀ NỘI – 2023

Mục lục

Lời nói đầu	4
Lời giới thiệu.....	8
1 Phạm vi áp dụng	9
2 Tài liệu viện dẫn.....	9
3 Thuật ngữ, định nghĩa, thuật ngữ viết tắt và ký hiệu	9
4 Tổng quan về phương pháp mô phỏng số luồng không khí	12
5 Hướng dẫn hiện có cho các ứng dụng mô hình số luồng không khí.....	17
6 Tóm tắt các thử nghiệm phê duyệt đối sánh	22
7 Các khía cạnh kỹ thuật quan trọng để thực hiện mô phỏng luồng không khí trên địa hình cho các ứng dụng năng lượng gió	26
8 Vấn đề mở	28
Thư mục tài liệu tham khảo.....	32

Lời nói đầu

TCVN 10687-12-4:2023 hoàn toàn tương đương với IEC TR 61400-12-4:2020;

TCVN 10687-12-4:2023 do Ban kỹ thuật tiêu chuẩn Quốc gia TCVN/TC/E13 *Năng lượng tái tạo* biên soạn, Viện Tiêu chuẩn Chất lượng Việt Nam đề nghị, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng thẩm định, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Bộ tiêu chuẩn TCVN 10687 (IEC 61400) gồm các phần sau:

- 1) TCVN 10687-1:2015 (IEC 61400-1:2014), Tuabin gió – Phần 1: Yêu cầu thiết kế
- 2) TCVN 10687-21:2018 (IEC 61400-21:2008), Tuabin gió – Phần 21: Đo và đánh giá đặc tính chất lượng điện năng của tuabin gió nổi lưới
- 3) TCVN 10687-22:2018, Tuabin gió – Phần 22: Hướng dẫn thử nghiệm và chứng nhận sự phù hợp
- 4) TCVN 10687-24:2015 (IEC 61400-24:2010), Tuabin gió – Phần 24: Bảo vệ chống sét
- 5) TCVN 10687-12-1:2023 (IEC 61400-12-1:2022), Hệ thống phát điện gió – Phần 12-1: Đo hiệu suất năng lượng của tuabin gió phát điện
- 6) TCVN 10687-12-2:2023 (IEC 61400-12-2:2022), Hệ thống phát điện gió – Phần 12-2: Hiệu suất năng lượng của tuabin gió phát điện dựa trên phép đo gió trên vỏ tuabin
- 7) TCVN 10687-12-4:2023 (IEC TR 61400-12-4:2020), Hệ thống phát điện gió – Phần 12-4: Hiệu chuẩn vị trí bằng số dùng cho thử nghiệm hiệu suất năng lượng của tuabin gió

Ngoài ra bộ tiêu chuẩn IEC 61400 còn có các tiêu chuẩn sau:

- 1) IEC 61400-1:2019, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements
- 2) IEC 61400-2:2013, Wind turbines - Part 2: Small wind turbines

- 3) IEC 61400-3-1:2019, Wind energy generation systems - Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines
- 4) IEC TS 61400-3-2:2019, Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines
- 5) IEC 61400-4:2012, Wind turbines - Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes
- 6) IEC 61400-5:2020, Wind energy generation systems - Part 5: Wind turbine blades
- 7) IEC 61400-6:2020, Wind energy generation systems - Part 6: Tower and foundation design requirements
- 8) IEC 61400-11:2012, AMD1:2018, Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques
- 9) IEC 61400-12:2022, Wind energy generation systems - Part 12: Power performance measurements of electricity producing wind turbines – Overview
- 10) IEC 61400-12-3:2022, Wind energy generation systems - Part 12-3: Power performance - Measurement based site calibration
- 11) IEC 61400-12-5:2022, Wind energy generation systems - Part 12-5: Power performance - Assessment of obstacles and terrain
- 12) IEC 61400-12-6:2022, Wind energy generation systems - Part 12-6: Measurement based nacelle transfer function of electricity producing wind turbines
- 13) IEC 61400-13:2015, AMD1:2021, Wind turbines - Part 13: Measurement of mechanical loads
- 14) IEC TS 61400-14:2005, Wind turbines - Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values
- 15) IEC 61400-21-1:2019, Wind energy generation systems - Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbines
- 16) IEC 61400-21-2:2023, Wind energy generation systems - Part 21-2: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind power plants

TCVN 10687-12-4:2023

- 17) IEC TR 61400-21-3:2019, Wind energy generation systems - Part 21-3: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbine harmonic model and its application
- 18) IEC 61400-23:2014, Wind turbines - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades
- 19) IEC 61400-24:2019, Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection
- 20) IEC 61400-25-1:2017, Wind energy generation systems - Part 25-1: Communications for monitoring and control of wind power plants - Overall description of principles and models
- 21) IEC 61400-25-2:2015, Wind turbines - Part 25-2: Communications for monitoring and control of wind power plants - Information models
- 22) IEC 61400-25-3:2015, Wind turbines - Part 25-3: Communications for monitoring and control of wind power plants - Information exchange models
- 23) IEC 61400-25-4:2016, Wind energy generation systems - Part 25-4: Communications for monitoring and control of wind power plants - Mapping to communication profile
- 24) IEC 61400-25-5:2017, Wind energy generation systems - Part 25-5: Communications for monitoring and control of wind power plants - Compliance testing
- 25) IEC 61400-25-6:2016, Wind energy generation systems - Part 25-6: Communications for monitoring and control of wind power plants - Logical node classes and data classes for condition monitoring
- 26) IEC TS 61400-25-71:2019, Wind energy generation systems - Part 25-71: Communications for monitoring and control of wind power plants - Configuration description language
- 27) IEC 61400-26-1:2019, Wind energy generation systems - Part 26-1: Availability for wind energy generation systems
- 28) IEC 61400-27-1:2020, Wind energy generation systems - Part 27-1: Electrical simulation models - Generic models
- 29) IEC 61400-27-2:2020, Wind energy generation systems - Part 27-2: Electrical simulation models - Model validation

- 30) IEC TS 61400-29:2023, Wind energy generation systems - Part 29:
Marking and lighting of wind turbines
- 31) IEC 61400-50:2022, Wind energy generation systems - Part 50: Wind
measurement – Overview
- 32) IEC 61400-50-1:2022, Wind energy generation systems - Part 50-1:
Wind measurement - Application of meteorological mast, nacelle and
spinner mounted instruments
- 33) IEC 61400-50-2:2022, Wind energy generation systems - Part 50-2:
Wind measurement - Application of ground-mounted remote sensing
technology
- 34) IEC 61400-50-3:2022, Wind energy generation systems - Part 50-3:
Use of nacelle-mounted lidars for wind measurements

Lời giới thiệu

IEC 61400-12-1:2017 là tiêu chuẩn đo hiệu suất năng lượng của tuabin gió phát điện. Tiêu chuẩn này quy định rằng ở địa hình phức tạp, cần hiệu chuẩn vị trí để tìm ra mối liên quan trong các đặc tính luồng không khí giữa vị trí đo và tuabin thử nghiệm. Cách tiếp cận này yêu cầu lắp đặt một cột khí tượng tạm thời, ngoài cột khí tượng cố định được sử dụng cho phép đo đường cong công suất của tuabin, tại vị trí của tuabin cần thử nghiệm trước khi lắp đặt tuabin. Cách tiếp cận này được sử dụng thường xuyên trong thực tế. Tuy nhiên, có một số bất lợi như:

- Thêm chi phí cho cột khí tượng thứ hai và phân tích các kết quả hiệu chuẩn vị trí,
- Thêm thời gian cần thiết để hiệu chuẩn vị trí trong khoảng 3 tháng,
- Phải đưa ra quyết định hiệu chuẩn vị trí trước khi lắp đặt tuabin gió.

Do các bất lợi trên nên cần tìm ra các phương pháp thay thế để hiệu chuẩn vị trí. Một phương pháp thay thế là sử dụng các mô phỏng số để suy ra các hệ số hiệu chỉnh luồng không khí (FCF), tức là mối liên quan giữa tốc độ gió tại vị trí tuabin gió và tốc độ gió tại vị trí cột khí tượng tham chiếu.

Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc tế IEC TC88 đã biên soạn tài liệu này để đánh giá ứng dụng tiềm năng của việc mô phỏng số luồng không khí để hiệu chuẩn vị trí, tức là hiệu chuẩn vị trí bằng số (NSC).

Với NSC, các hệ số hiệu chỉnh luồng không khí được tính sử dụng mô phỏng số luồng không khí. Mặc dù loại bỏ được một số bất lợi được đề cập ở trên nhưng lại có những thách thức khác như:

- Phụ thuộc vào các mô hình mô phỏng,
- Phụ thuộc vào việc bố trí các mô hình,
- Phụ thuộc vào kinh nghiệm của người lập mô hình,
- Định lượng độ không đảm bảo của đặc tính mô hình.

Tài liệu này phác thảo trình độ công nghệ về lập mô hình số luồng không khí và các hướng dẫn hiện có được tóm tắt và kinh nghiệm đối sánh trước đây của phê duyệt và kiểm tra xác nhận. Dựa trên công việc đã thực hiện, nhóm công tác đã nhận dạng các khía cạnh kỹ thuật quan trọng để sử dụng các mô phỏng luồng không khí trên địa hình dùng cho các ứng dụng năng lượng gió cũng như các vấn đề mở tồn tại bao gồm các khuyến nghị để phê duyệt thêm thông qua các thử nghiệm đối sánh.

Hệ thống phát điện gió –

Phần 12-4: Hiệu chuẩn vị trí bằng số dùng cho thử nghiệm hiệu suất năng lượng của tuabin gió

Wind energy generation systems –

Part 12-4: Numerical site calibration for power performance testing of wind turbines

1 Phạm vi áp dụng

Tiêu chuẩn này tóm tắt trình độ công nghệ về lập mô hình số luồng không khí, các hướng dẫn hiện có và kinh nghiệm đối sánh trước đây trong việc kiểm tra xác nhận và phê duyệt mô hình số. Dựa trên công việc đã thực hiện, tiêu chuẩn này nhận dạng các khía cạnh kỹ thuật quan trọng để sử dụng các mô phỏng luồng không khí trên địa hình dùng cho các ứng dụng năng lượng gió cũng như các vấn đề mờ tồn tại bao gồm các khuyến nghị để phê duyệt thêm thông qua các thử nghiệm đối sánh.

2 Tài liệu viện dẫn

Không có.

3 Thuật ngữ, định nghĩa, thuật ngữ viết tắt và ký hiệu

3.1 Thuật ngữ và định nghĩa

Không có.

3.2 Thuật ngữ viết tắt

Tiêu chuẩn này sử dụng các thuật ngữ viết tắt dưới đây.

AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics	Viện Hàng không và Du hành vũ trụ Hoa Kỳ
ABL	atmospheric boundary layer	lớp ranh giới khí quyển
AEP	annual energy production	sản lượng điện hàng năm
AIJ	Architectural Institute of Japan	Viện kiến trúc Nhật Bản

TCVN 10687-12-4:2023

ALEX17	Alaiz experiment 2017	Thực nghiệm Alaiz 2017
ASME	American Society of Mechanical Engineers	Hội Kỹ sư cơ khí Hoa Kỳ
	Compilation and Experimental Data for	Dữ liệu tổng hợp và thực nghiệm để phê
CEDVAL	Validation of Microscale Dispersion	duyet các mô hình phân tán ở cấp độ vi mô
	Models	
CFD	computational fluid dynamics	động lực học chất lỏng tính toán
CHT	computational heat transfer	truyền nhiệt tính toán
COST	European Cooperation in Science and Technology	Hợp tác Châu Âu về Khoa học và Công nghệ
CREYAP	Comparative Resource and Energy Yield Assessment Procedures	Quy trình đánh giá sản lượng tài nguyên và năng lượng so sánh
DES	detached eddy simulation	mô phỏng xoáy tách rời
DDES	delayed detached eddy simulation	mô phỏng xoáy tách rời bị trì hoãn
DEWI	Deutsches Windenergie-Institut	Viện Deutsches Windenergie
DTU	Danish Technical University	Đại học Kỹ thuật Đan Mạch
EWEA	European Wind Energy Association	Hiệp hội năng lượng gió châu Âu
EWTL	Environmental Wind Tunnel Laboratory	Phòng thí nghiệm đường hầm gió môi trường
FCF	flow correction factor	hệ số hiệu chỉnh luồng không khí
GWh	gigawatt-hour	gigawatt giờ
IEA	International Energy Agency	Cơ quan năng lượng quốc tế
IEC	International Electrotechnical Commission	Ủy ban kỹ thuật điện quốc tế
LES	large eddy simulation	mô phỏng xoáy diện rộng
LIDAR	light detection and ranging	phát hiện ánh sáng và phạm vi
MEASNE	Measuring Network of Wind Energy Institutes	Mạng đo của Viện năng lượng gió
MEP	model evaluation protocol	giao thức đánh giá mô hình
NEWA	New European Wind Atlas	Bản đồ gió châu Âu mới
NSC	numerical site calibration	hiệu chuẩn vị trí bằng số
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes	Navier-Stokes lấy trung bình Reynolds
RNG	renormalization group	nhóm tái chuẩn hóa
SC	site calibration	hiệu chuẩn vị trí
SODAR	sound detection and ranging	phát hiện âm thanh và phạm vi
TC	technical committee	ban kỹ thuật
TR	technical report	báo cáo kỹ thuật
UQ	uncertainty quantification	định lượng độ không đảm bảo

URANS	unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes	Navier-Stokes lấy trung bình Reynolds không ổn định
V&V	verification and validation	kiểm tra xác nhận và phê duyệt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	Hiệp hội kỹ sư Đức
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program	Chương trình ứng dụng và phân tích bản đồ gió
WFIP	Wind Forecast Improvement Project	Dự án cải thiện dự báo gió
WTG	wind turbine generator	máy phát điện tuabin gió

3.3 Ký hiệu và đơn vị

Bảng 1 thể hiện các ký hiệu được sử dụng trong nội dung và phương trình của tiêu chuẩn này.

Bảng 1 – Ký hiệu được sử dụng trong tiêu chuẩn

Ký hiệu	Định nghĩa	Đơn vị
$\overline{u_i}$	thành phần thứ i của tốc độ gió đã lọc	m/s
$\overline{p}$	áp suất lọc	Pa
μ	độ nhớt phân tử	Pa s
μ_t	độ nhớt luồng xoáy	Pa s
C_s	hằng số Smagorinsky	-
κ	hằng số von Karman	-
d	khoảng cách đến vách gần nhất	m
Δ	kích thước bộ lọc cục bộ	m
l	thang chiều dài luồng xoáy	m
l_{RANS}	thang chiều dài luồng xoáy thu được từ mô hình RANS	m
l_{LES}	thang chiều dài luồng xoáy thu được từ mô hình LES	m
f_d	hằng số mô hình của mô hình DDES	m
$\overline{U_i}$	thành phần trung bình của vận tốc theo hướng i	m/s
u_i	thành phần luồng xoáy của vận tốc theo hướng i	m/s
x_i	biến không gian theo hướng i	m
$\overline{P}$	áp suất trung bình	Pa
ρ	mật độ	kg/m ³
ν	độ nhớt phân tử động học	m ² /s
$\overline{F_i}$	lực cơ thể theo hướng i	kg m/s
$\overline{u_i u_j}$	ứng suất Reynolds	m ² /s ²
δ_{ij}	delta của Kronecker	-

Bảng 1 (kết thúc)

Ký hiệu	Định nghĩa	Đơn vị
v_T	độ nhớt luồng xoáy động học	m^2/s
k	động năng luồng xoáy	m^2/s^2
L_T	Tỷ lệ chiều dài luồng xoáy	m
P_k	sản lượng của k	m^2/s^3
ε	tốc độ tiêu tán của động năng luồng xoáy	m^2/s^3
C_μ	Hằng số mô hình luồng xoáy RANS	-
$C_{1\varepsilon}$	Hằng số mô hình luồng xoáy RANS	-
$C_{2\varepsilon}$	Hằng số mô hình luồng xoáy RANS	-
σ_ε	Hằng số mô hình luồng xoáy RANS	-
E	sai số so sánh phê duyệt	
δ_{model}	sai số do các giả định mô hình	
δ_{num}	sai số do giải phương trình số	
δ_{input}	sai số do tham số đầu vào	
δ_D	sai số trong các giá trị thực nghiệm	
U_{val}	độ không đảm bảo chuẩn phê duyệt	
U_{num}	độ không đảm bảo nghiệm bằng số	
U_{input}	độ không đảm bảo tham số đầu vào	
U_D	độ không đảm bảo giá trị thực nghiệm	
r	hệ số tương quan	
γ_d	tham số DDES	
A_1	hàm hằng số/bước DDES đã sửa đổi	-
A_2	hằng số DDES	-
K_h	độ nhớt động học ngang hiệu quả	m^2/s
K_v	độ nhớt động học dọc hiệu quả	m^2/s
$\tilde{u}_i$	thành phần vận tốc hỗn loạn theo hướng i	m/s
$\tilde{p}$	hỗn loạn áp suất	Pa
U_j	các thành phần vận tốc ngang của luồng không khí không hỗn loạn theo hướng j	m/s
D	Đường kính rotor	m

4 Tổng quan về các cách tiếp cận mô phỏng số luồng không khí

4.1 Các mô hình luồng không khí tuyến tính

Kể từ cuối những năm 1980, khi các nguồn lực để tính toán còn hạn chế, các mô hình luồng không khí tuyến tính đã trở thành tiêu chuẩn để đánh giá tài nguyên gió. Các mô hình này dựa trên sự tuyến tính hóa của các phương trình Navier-Stokes, được giới thiệu trong tài liệu tham khảo [2]. Chúng được thiết kế để sử dụng một cách đáng tin cậy trong điều kiện khí quyển trung tính trên địa hình có độ dốc vừa phải để đảm bảo các điều kiện luồng không khí được kết hợp hoàn toàn.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \text{với } i = 1, \dots, 3 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + K_h \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) + K_v \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2}, \quad \text{với } i = 1, \dots, 3 \text{ và } j = 1, 2 \quad (2)$$

Trong đó, U_j ($j=1, 2$) là các thành phần vận tốc nằm ngang của luồng không khí không hỗn loạn, $\tilde{u}_i$ ($i = 1, \dots, 3$) là các thành phần hỗn loạn vận tốc và $\tilde{p}$ là hỗn loạn áp suất. K_h và K_v là độ nhớt động học hiệu quả theo phương ngang và phương thẳng đứng.

Các mô hình tuyến tính hoạt động khá tốt khi gió không bị ảnh hưởng đáng kể bởi độ dốc lớn, sự phân tách luồng không khí, luồng không khí bị thay đổi do nhiệt, tia nước mức thấp và các hiện tượng ABL động và phi tuyến tính khác.

Chương trình phân tích và ứng dụng bản đồ gió (WASP) [3] được sử dụng rộng rãi nhất trong số các mô hình tuyến tính. Các quy trình WASP có thể được coi là mô hình hàm truyền liên kết tốc độ gió tại vị trí tham chiếu với tốc độ tại các vị trí dự đoán. Các nguồn sai số đáng kể có thể liên quan đến độ phức tạp của địa hình, sự phân tách luồng không khí lớn, thay đổi hướng gió và các điều kiện khí quyển khác nhau. Các điều kiện khí quyển khác nhau bao gồm hiệu ứng phân tách, hiệu ứng chặn và luồng không khí bị thay đổi do nhiệt (ví dụ: gió biển ban ngày, gió dốc).

Do tính chất nhanh và mạnh, các mô hình tuyến tính vẫn được sử dụng trong ngành công nghiệp gió.

4.2 Mô hình Navier-Stokes lấy trung bình Reynolds (RANS)

Do hạn chế của các mô hình tuyến tính, như đã đề cập trong 4.1, các mô hình tính toán động lực học chất lỏng (CFD) được sử dụng rộng rãi hơn trong ngành công nghiệp gió. Ứng dụng CFD cho lớp ranh giới khí quyển (ABL) đã bị ảnh hưởng bởi cả CFD cho kỹ thuật cơ khí và mô hình khí tượng quy mô trung bình. CFD xem xét các phương trình bảo toàn động lượng và khối lượng với bốn biến chưa biết: áp suất và ba thành phần vận tốc. Các biến khác mô tả trạng thái khí quyển, ví dụ như nhiệt độ, độ ẩm và nồng độ sol khí, thường không được xem xét.

CFD điển hình cho các ứng dụng mô phỏng luồng không khí tuân theo cách tiếp cận hướng gió duy nhất đại diện cho một khu vực từ gió tầng rời rạc. Mô phỏng luồng không khí cho từng khu vực, xem xét ảnh hưởng của địa hình và độ gồ ghề, dẫn đến các yếu tố tăng tốc.

Trong cách tiếp cận Navier Stokes lấy trung bình Reynolds (RANS) [4], do tính chất của luồng xoáy, các biến được mô tả bằng các hàm thống kê được chia thành các thành phần trung bình và biến động (luồng xoáy) (ví dụ: $U_i = \overline{U_i} + u_i$ tạo ra phương trình RANS:

$$\frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial x_i} = 0 \quad \text{và} \quad U_j \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right] + \overline{F_i} \quad \text{với } i, j = 1, \dots, 3 \quad (3)$$

Trong các phương trình RANS, các tương quan luồng xoáy $\overline{u_i u_j}$ (còn gọi là thông lượng hoặc ứng suất luồng xoáy) phải được tham số hóa để khép kín hệ phương trình. Giả thuyết Boussinesq được sử dụng để xác định mối quan hệ giữa các luồng xoáy và độ dốc của các giá trị trung bình bằng cách đưa ra độ nhớt xoáy (khép kín bậc một):

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{với } i, j = 1, \dots, 3 \quad (4)$$

Hai đại lượng cơ bản được giới thiệu để mô tả luồng xoáy: độ nhớt động học luồng xoáy ν_T và động năng luồng xoáy, k . Độ nhớt của luồng xoáy động học phụ thuộc vào động năng của luồng xoáy, k , và kích thước của các xoáy luồng xoáy, L_T , là $\nu_T = k^{1/2} L_T$.

Có nhiều kiểu khép kín khác nhau, ví dụ: mô hình một và hai phương trình. Trong mô hình một phương trình, động năng luồng xoáy, k , phương trình được giải:

$$\overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - C_\mu \frac{k^2}{\nu_T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad \text{với } j = 1, \dots, 3 \quad (5)$$

trong đó P_k là sản lượng của k do độ dốc vận tốc gió trung bình. Thang độ dài luồng xoáy, L_T , được suy ra từ một mô hình phân tích, chẳng hạn như hàm của độ cao so với mặt đất và đôi khi là độ ổn định nhiệt [5].

Trong các mô hình hai phương trình ($k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$, ...), việc khép kín được thực hiện thông qua hai phương trình vận chuyển, một cho k và một cho sự tiêu tán luồng xoáy, ε :

$$\overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad \text{với } j = 1, \dots, 3 \quad (6)$$

$$\overline{U_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad \text{với } j = 1, \dots, 3 \quad (7)$$

Độ nhớt luồng xoáy động học ν_T , được cho bởi phương trình khép kín $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

Nếu không có giả thuyết xác lập được sử dụng trong mô hình RANS, các phương trình chuyển động có thể được mô tả bằng RANS không ổn định (URANS).

So với mô hình tuyến tính, mô hình trạng thái ổn định RANS có thể dự đoán sự phân tách và kết hợp lại luồng không khí trong vùng phân tách trong hầu hết các trường hợp, nhưng độ chính xác của kết quả trong vùng này là đáng nghi ngờ. Hạn chế này là vốn có trong bản chất thống kê của mô hình. Mô hình RANS chủ yếu được áp dụng với giả định phân tầng trung tính, trong nhiều trường hợp hạn chế khả năng ứng dụng của nó. Có những giải pháp được đề xuất để đối phó với giả định giới hạn phân tầng trung tính, ví dụ, thông qua sửa đổi khép kín luồng xoáy dựa trên lý thuyết tương tự Monin-Obukhov [6] hoặc bằng cách giải phương trình năng lượng và thêm số hạng nổi vào phương trình RANS [7]; tuy nhiên, cần kiểm tra xác nhận bổ sung.

Các mô hình RANS yêu cầu tài nguyên tính toán nhiều hơn đáng kể so với các mô hình tuyến tính. Hiện tại, chúng được sử dụng để đánh giá tài nguyên và tính phù hợp của vị trí ở các vị trí phức tạp, ví dụ như địa hình không bằng phẳng, thay đổi độ gồ ghề đột ngột hoặc khu vực có rừng.

4.3 Mô phỏng xoáy diện rộng (LES) và mô hình RANS/LES lai

Ý tưởng về mô phỏng xoáy diện rộng (LES) [8] là bỏ qua các luồng xoáy quy mô nhỏ bằng bộ lọc thông thấp và chỉ giải luồng xoáy có thể được giải bằng lưới. Các phương trình điều chỉnh cho luồng không khí không nén được (sử dụng mô hình tỷ lệ lưới con Smagorinsky [8]) có thể được viết như sau:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

$$L_s = C_s \Delta \quad (11)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (12)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

TCVN 10687-12-4:2023

Trong đó u_i là thành phần i của vận tốc gió được lọc, C_s là hằng số Smagorinsky, và Δ là kích thước bộ lọc cục bộ, $i, j = 1, \dots, 3$. Thông tin thêm về các mô hình quy mô lưới con khác có thể được tìm thấy trong tài liệu tham khảo [9].

Không giống như RANS, LES không giải các phương trình vận chuyển cho các tham số tỷ lệ lưới con, nghĩa là tất cả các xoáy đặc trưng cho luồng không khí phải được giải. Do đó, LES phụ thuộc rất nhiều vào độ phân giải của lưới và việc lựa chọn lưới là rất quan trọng. Mặt khác, khi lưới đủ mịn, LES có thể giải quyết sự phân tách luồng không khí không ổn định thường có thể nhìn thấy phía sau một ngọn đồi hoặc ở rìa của một vách đá và trường luồng không khí mô phỏng trong vùng phân tách luồng không khí như vậy sẽ gần với thực tế hơn RANS [10].

Tuy nhiên, một vấn đề chính của LES là mô hình hóa độ gồ ghề bề mặt. Ví dụ, đối với bề mặt có độ gồ ghề thấp, LES yêu cầu các lưới rất mịn để giải nó, điều này quá tốn kém về mặt tính toán đối với một ứng dụng kỹ thuật.

Các cách tiếp cận RANS/LES lai đã được đề xuất để khắc phục vấn đề này. Mô phỏng xoáy tách rời (DES) [11] là một trong những cách tiếp cận như vậy. Trong DES, phương trình vận chuyển của k và ε được giải và tỷ lệ chiều dài, l , có thể được tính bằng cách sử dụng phương trình sau:

$$l = \min(l_{\text{RANS}}, l_{\text{LES}}) \quad (14)$$

Trong đó

$$l_{\text{RANS}} = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (15)$$

$$l_{\text{LES}} = C_s \Delta \quad (16)$$

Bằng cách sử dụng phương pháp này, mô hình RANS được chọn ở gần ranh giới và LES được chọn ở vùng xa ranh giới. Tuy nhiên, Spalart et al. [12] đã đề cập rằng mô hình DES thể hiện hành vi không chính xác trong lớp ranh giới dày và đề xuất một sửa đổi được gọi là mô phỏng xoáy tách rời bị trì hoãn (DDES). Trong DDES, tỷ lệ chiều dài, l , có thể được tính bằng cách sử dụng phương trình sau [13][14]:

$$l = l_{\text{RANS}} - f_d \max(0, l_{\text{RANS}} - l_{\text{LES}}) \quad (17)$$

Trong đó

$$f_d = 1 - \tanh \left[\left(A_1 \gamma_d \right)^{A_2} \right] \quad (18)$$

Trong tài liệu tham khảo [14], các tác giả đã đề xuất một hàm từng phần của A1 thay vì hằng số để mô phỏng các trường luồng không khí trong lớp ranh giới khí quyển.

5 Hướng dẫn hiện có cho các ứng dụng mô hình số luồng không khí

5.1 Yêu cầu chung

Các cộng đồng khoa học, tổ chức chứng nhận và hiệp hội kỹ thuật quốc gia đã cùng nhau đưa ra các hướng dẫn về kiểm tra xác nhận và phê duyệt, đảm bảo chất lượng và đánh giá các mô hình số luồng không khí. Tổng quan về các hướng dẫn liên quan nhất với NSC được nêu dưới đây.

5.2 AIAA (1998) Hướng dẫn kiểm tra xác nhận và phê duyệt các mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán

Hướng dẫn của Viện Hàng không và Du hành vũ trụ Hoa Kỳ (AIAA) [15] cung cấp các hướng dẫn để đối sánh hiệu suất của các mô hình CFD. Vấn đề là cần thực hiện càng nhiều thử nghiệm kiểm tra xác nhận và phê duyệt (V&V) càng tốt để đạt được độ tin cậy và tín nhiệm đối với các kết quả của mô hình hướng đến mục đích sử dụng cụ thể của mô hình. Độ phức tạp cao của các mô hình khiến việc phê duyệt đầy đủ các điều kiện hoạt động trở nên rất khó khăn. Do đó, mục tiêu chính của quá trình phê duyệt là để phát triển và định lượng đủ độ tin cậy trong các mô hình số sao cho chúng có thể được sử dụng một cách đáng tin cậy để dự đoán các biến quan tâm trong giới hạn chấp nhận được.

Các yếu tố sau đây cần được xem xét cho quy trình V&V:

- mô tả chung về mô hình bao gồm mục đích sử dụng hoặc ứng dụng của nó,
- mô tả các phương trình tiên lượng mà mô hình giải quyết,
- mô tả các giả thuyết và phép xấp xỉ,
- mô tả việc tham số hóa mô hình,
- thang khí quyển và độ phân giải không gian/thời gian,
- mô tả về lưới tính toán,
- điều kiện biên và ban đầu,
- dữ liệu đầu vào và nguồn,
- dữ liệu đầu ra dưới dạng các biến tiên lượng và chẩn đoán (xuất phát từ tiên lượng),
- tham chiếu đến các kết quả đánh giá mô hình định địa chỉ vật liệu đã xuất bản từ mô hình này và các mô hình tương tự khác.

5.3 Tiêu chuẩn để kiểm tra xác nhận và phê duyệt trong động lực học chất lỏng tính toán và truyền nhiệt tính toán – ASME V&V 20-2009

Tiêu chuẩn của Hiệp hội Kỹ sư Cơ khí Hoa Kỳ (ASME) [16] mô tả phương pháp V&V trong động lực học chất lỏng tính toán và truyền nhiệt tính toán (CHT). Ý tưởng của tài liệu này là sai số so sánh, E , giữa giá trị được đo và giá trị mô phỏng có thể được viết bằng cách sử dụng sai số gây ra do các giả định về lập mô hình, δ_{model} , sai số gây ra do các nghiệm bằng số, δ_{num} , sai số gây ra do các tham số đầu vào mô phỏng, δ_{input} và sai số trong các giá trị thực nghiệm, δ_D , như thể hiện trong phương trình sau:

$$E = \delta_{\text{model}} + \delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D \quad (19)$$

Giả sử rằng δ_{num} , δ_{input} và δ_D là độc lập, độ không đảm bảo do các số hạng này (u_{val}) có thể được viết như sau:

$$u_{\text{val}} = \sqrt{u_{\text{num}}^2 + u_{\text{input}}^2 + u_D^2} \quad (20)$$

Trong đó u_{num} là độ không đảm bảo do các nghiệm bằng số (tức là độ lệch chuẩn của δ_{num}), v.v.

Mục đích của tài liệu này là đề xuất các phương pháp để định lượng độ không đảm bảo của các giả định lập mô hình và giải thích giá trị này. Như vậy, nội dung của tài liệu như sau:

- Độ không đảm bảo do các nghiệm bằng số có thể được định lượng bằng cách sử dụng kiểm tra xác nhận quy tắc và kiểm tra xác nhận nghiệm. Việc kiểm tra xác nhận quy tắc có thể được thực hiện bằng cách so sánh nghiệm bằng số với các nghiệm giải tích. Việc kiểm tra xác nhận nghiệm có thể được thực hiện bằng cách làm mịn lưới có hệ thống.
- Độ không đảm bảo do đầu vào mô phỏng có thể được ước tính bằng cách sử dụng phân tích độ nhạy có hệ thống của các tham số đầu vào.
- Khái niệm cơ bản để xác định độ không đảm bảo trong các giá trị thực nghiệm.
- Phương pháp định lượng độ không đảm bảo do các giả định lập mô hình được mô tả cho các trường hợp khác nhau.
- Việc giải thích độ không đảm bảo do các giả định lập mô hình.
- Ví dụ về V&V.

5.4 COST Hành động 732 "Đảm bảo chất lượng của các mô hình khí tượng vi mô"

Hợp tác Khoa học và Công nghệ Châu Âu (COST) hành động 732 "Đảm bảo chất lượng của các mô hình khí tượng vi mô" [17] đã được thiết lập để cải thiện và đảm bảo chất lượng của các mô hình khí tượng vi mô được áp dụng để dự đoán luồng không khí trong môi trường đô thị. Những thực tiễn tốt

nhất này dựa trên các hướng dẫn trước đây dành cho các phương trình RANS ổn định cho các trường dòng không khí phân tầng trung tính.

Các hướng dẫn chung được phát triển để giảm sai số và độ không đảm bảo trong lập mô hình vật lý và trong các cách tiếp cận bằng số. Độ không đảm bảo trong lập mô hình có thể liên quan đến:

- biến mục tiêu,
- các phương trình gần đúng mô tả tính chất vật lý của dòng không khí, ví dụ như các mô hình dòng xoáy,
- biểu diễn hình học của chướng ngại vật,
- định nghĩa của miền tính toán bao gồm các điều kiện biên và ban đầu.

Độ không đảm bảo trong cách tiếp cận bằng số có thể liên quan đến:

- lưới tính toán,
- kích cỡ bước thời gian,
- phép xấp xỉ bằng số (các sơ đồ rời rạc hóa),
- tiêu chí hội tụ lặp.

Hướng dẫn COST hành động 732 vẫn là hướng dẫn chung cho hầu hết các tiêu chí và khuyến khích các kỹ sư sử dụng các phương pháp hay nhất để giảm sai số. Hầu hết các tham số phụ thuộc phần lớn vào các chi tiết của vấn đề ứng dụng và không phải lúc nào cũng chính xác trong các hướng dẫn chung. Ví dụ, không có phương pháp tốt nhất nào cho việc lựa chọn các mô hình dòng xoáy được đưa ra. Tuy nhiên, đối với một số tham số, ví dụ như lựa chọn miền tính toán, hướng dẫn này đưa ra khuyến nghị chính xác: quy mô miền cần được xác định là hàm của mô hình quy mô đô thị, đặc biệt là độ cao của tán đô thị. Hướng dẫn cũng đưa ra lời khuyên rõ ràng về sự rời rạc về không gian và thời gian, cũng như các tiêu chí hội tụ, để giảm sai số bằng số.

Hướng dẫn khuyến khích áp dụng các thử nghiệm độ nhạy bằng số và phê duyệt tính năng của mô hình cho các trường hợp thử nghiệm có sẵn trong tài liệu.

5.5 Các hướng dẫn của Viện Kiến trúc Nhật Bản

5.5.1 Tổng quát

Hai hướng dẫn cho các ứng dụng CFD đã được đề xuất bởi Viện Kiến trúc Nhật Bản (AIJ). Một là *Sách hướng dẫn các ứng dụng thực tế của CFD cho môi trường có gió cho người đi bộ xung quanh các tòa nhà* [18] và cuốn còn lại là *Sách hướng dẫn các khuyến nghị về tải trọng tác dụng lên các tòa nhà 2* [19]. Cả hai hướng dẫn đều bao gồm thông lệ tốt nhất để thiết lập các điều kiện tính toán và quy trình đối sánh. Các điều kiện tính toán như sau:

- mở rộng miền tính toán,

TCVN 10687-12-4:2023

- tạo lưới và độ phân giải,
- điều kiện biên,
- sơ đồ số,
- mô hình luồng xoáy,
- hội tụ của giải pháp.

5.5.2 Sách hướng dẫn các ứng dụng thực tế của CFD cho môi trường có gió cho người đi bộ xung quanh các tòa nhà [18]

Hướng dẫn này tóm tắt các điểm quan trọng khi sử dụng kỹ thuật CFD để dự đoán thích hợp về môi trường có gió dành cho người đi bộ. Các biến quan tâm là tỷ lệ tốc độ gió trung bình và động năng luồng xoáy. Hướng dẫn dựa trên kết quả của các thử nghiệm đối sánh, chẳng hạn như luồng không khí xung quanh một tòa nhà và các dãy tòa nhà, và các tòa nhà trong một khu vực đô thị thực tế và tán cây. Cơ sở dữ liệu phê duyệt có sẵn trên trang web AIJ [21].

5.5.3 Sách hướng dẫn các khuyến nghị về tải trọng tác dụng lên các tòa nhà 2 [19]

Tài liệu này cung cấp một hướng dẫn thực tế để dự đoán tải trọng gió thiết kế cho một tòa nhà, bao gồm ảnh hưởng của địa hình bằng cách sử dụng CFD dựa trên tài liệu tham khảo [20]. Theo hướng dẫn này, CFD có thể được sử dụng thay thế cho thử nghiệm ống gió. Các biến được quan tâm là hệ số áp suất cực đại cũng như tốc độ gió trung bình và động năng luồng xoáy. Trong hướng dẫn này, LES là một kỹ thuật được đề xuất để dự đoán tải trọng gió cực đại trong các sự kiện gió mạnh do khả năng tái tạo của lớp ranh giới luồng xoáy và luồng không khí phân tách xung quanh yêu cầu của tòa nhà. Hướng dẫn này đưa ra các yêu cầu đối với việc thiết lập mô hình, kiểm tra xác nhận và phê duyệt độ chính xác cũng như thiết kế tải trọng gió.

5.6 VDI 3783 Phần 9 Khí tượng môi trường – chế độ trường gió quy mô vi mô tiên lượng – đánh giá luồng không khí xung quanh các tòa nhà và chương ngại vật

Hướng dẫn của Verein Deutscher Ingenieure (VDI, Hiệp hội Kỹ sư Đức) mô tả trình độ công nghệ về khoa học và công nghệ tại Cộng hòa Liên bang Đức và được sử dụng như một công cụ hỗ trợ ra quyết định trong giai đoạn chuẩn bị sơ bộ để xây dựng luật và áp dụng các quy định và pháp lệnh.

Mục đích của hướng dẫn VDI 3783 Phần 9 [22] là đánh giá các mô hình trường gió CFD vi mô trên địa hình giải quyết rõ ràng trường luồng không khí xung quanh các chương ngại vật trong ABL gần mặt đất. Mục đích của quy trình đánh giá được đưa ra trong hướng dẫn VDI này là để đảm bảo chất lượng ở mức cao của các mô hình. Hướng dẫn chứa các khuyến nghị về tiêu chí hội tụ và tính độc lập của độ phân giải lưới. Nó cũng cung cấp các trường hợp thử nghiệm (bao gồm dữ liệu tham khảo thử nghiệm và phân tích) để phê duyệt tính nhất quán của mô hình. Dữ liệu tham khảo thử nghiệm bắt nguồn từ cơ sở dữ liệu CEDVAL của phòng thử nghiệm ống gió môi trường (EWTL), Viện Khí tượng của Đại học

Hamburg [23]. Những dữ liệu này được thiết kế và phù hợp để đánh giá các mô hình RANS. Do thiếu các điều kiện luồng không khí đi vào một cách chi tiết nên không thể áp dụng để việc phê duyệt mô hình LES. Các thước đo để phê duyệt và tiêu chí đạt được cung cấp trong hướng dẫn VDI.

5.7 Nhiệm vụ 31 Wakebench của Cơ quan Năng lượng Quốc tế – Giao thức đánh giá mô hình cho các mô hình luồng không khí của trang trại gió

Một giao thức đánh giá mô hình (MEP) cho các mô hình luồng không khí của trang trại gió đã được phát triển trong khuôn khổ Nhiệm vụ Gió 31 của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA) "Wakebench" [24]. Giao thức đề cập đến khung V&V cho các mô hình luồng không khí của trang trại gió ở cấp độ vi mô, thường được sử dụng trong các ứng dụng đánh giá vị trí/tài nguyên gió và thiết kế trang trại gió.

MEP được phát triển làm cơ sở cho một khuôn khổ cho các hoạt động liên quan đến V&V của các mô hình luồng gió. MEP bao gồm:

- thẩm định mô hình bằng đánh giá khoa học,
- kiểm tra xác nhận quy tắc và nghiệm,
- phê duyệt, bao gồm:
 - phương pháp phê duyệt tòa nhà,
 - yêu cầu và nguồn dữ liệu phê duyệt,
 - các biến quan tâm,
 - thiết lập và chạy một mô hình,
 - các thước đo,
 - tiêu chí chấp nhận chất lượng,
- hiệu chuẩn mô hình.

5.8 MEASNET – Đánh giá điều kiện gió tại vị trí cụ thể

Mạng đo của các Viện năng lượng gió (MEASNET) là sự hợp tác của các công ty hoạt động trong lĩnh vực năng lượng gió và mong muốn đảm bảo các phép đo chất lượng cao, giải thích đồng nhất các tiêu chuẩn và khuyến nghị, và khả năng thay thế lẫn nhau của các kết quả. Tài liệu MEASNET về *Đánh giá các điều kiện gió tại vị trí cụ thể* [25] phác thảo quy trình đánh giá vị trí đã được thống nhất giữa các thành viên MEASNET. Tài liệu mô tả các chủ đề từ dữ liệu đầu vào bắt buộc đến báo cáo kết quả. Phần phù hợp nhất đối với NSC là hướng dẫn ngoại suy về không gian, yêu cầu lập mô hình số của trường gió. MEASNET cung cấp các khuyến nghị chung về kiểm tra xác nhận mô hình, giả định mô hình, phê duyệt mô hình và phân tích độ nhạy. MEASNET cũng nhận ra rằng độ không đảm bảo của mô hình luồng không khí sẽ phụ thuộc vào địa hình và độ phức tạp về khí tượng tại vị trí (khoảng cách

theo chiều dọc và chiều ngang giữa vị trí được đo và vị trí ngoại suy, độ gồ ghề của địa hình, điều kiện ổn định và các phép xấp xỉ của mô hình được sử dụng).

6 Tóm tắt các thử nghiệm phê duyệt đối sánh

6.1 Tổng quan

Điều 6 tóm tắt các thử nghiệm so sánh từ các đợt phê duyệt mô hình luồng gió. Một số dự án đã được hoàn thành và một số đang được tiến hành tại thời điểm này.

6.2 DEWI Round Robin trong mô phỏng luồng không khí số trong năng lượng gió

Thử nghiệm mù này được bắt đầu vào năm 2004 và kết thúc vào năm 2008 [26]. Các mô hình số vào thời điểm đó đã được sử dụng rộng rãi trong phân tích năng lượng gió để ngoại suy các điều kiện gió từ một điểm mà điều kiện gió được đo đến các điểm khác của trang trại gió nơi điều kiện gió chưa biết. Mục đích của round robin test¹ là để đánh giá một cách có hệ thống các khả năng của các mô hình đo gió ngoại suy được xem xét theo chiều ngang và chiều thẳng đứng. Do đó, những người tham gia được cung cấp dữ liệu địa hình và được yêu cầu thực hiện mô phỏng lấy các phép đo gió đầu vào tại một điểm tham chiếu để tính toán các điều kiện gió cho hai điểm mục tiêu khác mà các phép đo gió có sẵn nhưng những người tham gia không biết.

Có tám người tham gia sử dụng các mô hình số khác nhau (ví dụ: mô phỏng quy mô trung bình, RANS và LES), không có người tham gia nào sử dụng cùng một mô hình. Kết quả dự đoán được so sánh với số liệu đo được tại hai vị trí này. Chiều cao đầu vào là 43 m và đầu ra được yêu cầu ở độ cao lên tới 80 m.

Giá trị trung bình của các giá trị tuyệt đối theo khu vực của sai số tốc độ gió trung bình nằm trong khoảng từ 5 % đến 18 %. Tuy nhiên, độ lệch của từng khu vực riêng thì lớn hơn. Sai số sản lượng điện trung bình tuyệt đối nằm trong khoảng từ 1% đến 36%.

6.3 Thử nghiệm Bolund

Thử nghiệm mù Bolund Hill được tổ chức bởi Đại học Kỹ thuật Đan Mạch (DTU) vào năm 2009 và tập trung vào mô hình luồng không khí [27], [28]. Một hòn đảo nhỏ (cao 12 m, dài 130 m và rộng 75 m) gần Roskilde, Đan Mạch, đã có một đợt đo gió mở rộng ở độ cao 2 m, 5 m và 9 m so với mặt đất. Những người tham gia được cung cấp tất cả dữ liệu đầu vào cần thiết cho mô phỏng luồng không khí tại vị trí và phải cung cấp kết quả tại các điểm cụ thể phản ánh các điểm đo lường. Cần lưu ý rằng độ dốc của

¹ Round robin test: quá trình trong đó một hoặc nhiều mẫu được thử nghiệm theo một thủ tục quy định bởi một số tổ chức thử nghiệm khác nhau. (Nguồn: 3.4 của IEC TR 62970:2016)

ngọn đồi và sự thay đổi độ gồ ghề đột ngột trong thực nghiệm đó đã vi phạm các giả định của mô hình tuyến tính.

Bốn hướng gió đã được xác định và 57 mô hình từ số đến vật lý đã được sử dụng, bao gồm mô hình LES, mô hình RANS và mô hình tuyến tính, ngoài các thử nghiệm đường hầm gió và kênh nước. Tất cả những người tham gia có nghĩa vụ trả lại kết quả của họ tại 600 vị trí.

Trong thử nghiệm cụ thể này, các phương pháp RANS khép kín luồng xoáy hai phương trình đã cho kết quả nhất quán nhất. Mô hình hoạt động tốt nhất cho thấy sai số trung bình đối với tất cả các trường hợp là 10,2 % (trường hợp thử nghiệm 1 đến 4: 9,6 %, 10,6 %, 13,8 % và 7,0 % tương ứng) khi tăng tốc nhân tố. Đối với hướng gió có độ dốc vừa phải nhất (thử nghiệm 4) thì sai số nhỏ nhất. Tầm quan trọng của việc có những người lập mô hình có kinh nghiệm sử dụng các phương pháp số có cơ sở vững chắc đã được nhấn mạnh trong báo cáo cuối cùng của dự án.

6.4 Quy trình đánh giá sản lượng năng lượng và tài nguyên gió so sánh I và II của Hiệp hội năng lượng gió châu Âu (2011, 2013)

Thử nghiệm Quy trình Đánh giá So sánh Tài nguyên và Năng lượng (CREYAP) Phần I [29] do DTU thực hiện và kết quả đã được trình bày tại Hội thảo Công nghệ Đánh giá Tài nguyên Gió của Hiệp hội Năng lượng Gió Châu Âu (EWEA) năm 2011, với 37 bộ kết quả được gửi bởi 36 tổ chức từ 16 quốc gia. Thử nghiệm được thực hiện ở một trang trại gió 28MW (14 máy phát điện tuabin gió) với 1 cột khí tượng (đáp ứng). Việc này gồm một nghiên cứu điển hình về trang trại gió bao gồm:

- dữ liệu trang trại gió và tuabin,
- đầu vào khí hậu gió,
- đầu vào địa hình.

Một so sánh các kết quả mô hình đã được thực hiện trên:

- tốc độ gió hiệu chỉnh dài hạn ở 50 m và 60 m,
- phép ngoại suy thẳng đứng (độ trượt gió),
- sản lượng năng lượng chéo,
- sản lượng năng lượng tiềm năng,
- hiệu suất năng lượng rỗng P50 và P90.

Kết quả trượt gió được báo cáo nằm trong khoảng từ 0,015 đến 0,237 (độ lệch chuẩn 0,037 – hệ số biến thiên 22 %) và tổng sản lượng năng lượng của trang trại gió nằm trong khoảng 113 GWh đến 127 GWh (độ lệch chuẩn 3,5 GWh – hệ số biến thiên 35 %) trong số 37 bộ.

Thử nghiệm CREYAP Phần II [30] do DTU thực hiện và kết quả đã được trình bày vào năm 2013 tại hội thảo EWEA. Có 60 đội từ 17 quốc gia bao gồm các công ty tư vấn, nhà phát triển công viên gió và

học viện. Thử nghiệm được thực hiện trên một trang trại gió 28,6 MW (22 máy phát điện tuabin gió) với 7 cột khí tượng.

Round robin test đã làm nổi bật sự lan truyền của các kết quả số trong quá trình dự đoán sản lượng điện hàng năm. Các so sánh được thực hiện ở mỗi bước của quy trình ước tính sản lượng điện hàng năm bao gồm:

- hiệu chỉnh dài hạn,
- phép ngoại suy thẳng đứng (độ trượt gió),
- mô hình luồng không khí và luồng rẽ khí,
- ước tính tổn thất kỹ thuật,
- định lượng độ không đảm bảo.

Các kết quả về độ trượt gió được báo cáo nằm trong khoảng 0,105 đến 0,179 (độ lệch chuẩn 0,013 – hệ số biến thiên 10 %) và tổng sản lượng năng lượng của trang trại gió nằm trong khoảng 79,3 GWh đến 106 GWh (độ lệch chuẩn 5,7 GWh – hệ số biến thiên 5,8 %) trong số 60 bộ.

6.5 IEA Nhiệm vụ 31 Thực nghiệm Wakebench

Các trường hợp thử nghiệm Wakebench [31] được lựa chọn dựa trên lý thuyết tương tự đối với ABL và luồng rẽ khí của tuabin gió, các thí nghiệm nghiên cứu thực địa và đường hầm gió cũng như các đợt đo vận hành từ ngành công nghiệp gió. Các trường hợp bao gồm các đối sánh chính tắc (ví dụ: trang trại gió vô hạn), cả trên đất liền và ngoài khơi (ví dụ: Alaiz, Lillgrund), địa hình bằng phẳng đến rất phức tạp (ví dụ: Sexbierum, San Gregorio) và ABL trung tính đến phân tầng (ví dụ: Askervein, Leipzig). Kết quả có thể được tìm thấy trực tuyến trong tài liệu tham khảo [31].

6.6 Các thực nghiệm Bản đồ gió châu Âu mới [32]

6.6.1 Perdigão (gờ kép)

Một trong những thực nghiệm của New European Wind Atlas (NEWA) được diễn ra ở Bồ Đào Nha gần Perdigão xung quanh hai rặng núi song song, dốc đứng. Thực nghiệm bắt đầu vào mùa thu năm 2016 và chiến dịch chính bắt đầu vào mùa xuân năm 2017. Hơn 50 cột khí tượng có chiều cao từ 10 m đến 100 m và 19 thiết bị quét và phát hiện ánh sáng (LIDAR) đã được sử dụng để đo luồng không khí trong khu vực này. Một loạt các thiết bị bao gồm máy đo gió âm thanh, LIDAR Doppler, LIDAR độ ẩm định hình, máy định hình Doppler radar, máy dò vô tuyến, cảm biến áp suất và bóng bay có dây buộc đã được sử dụng.

6.6.2 Alaiz (địa hình phức tạp với thành phần thang độ trung bình mạnh)

Một thực nghiệm truy cập mở, ALEX17, đã được lên kế hoạch bắt đầu vào tháng 7 năm 2018. Thử nghiệm này gồm có năm máy quét gió tầm xa, sáu cột khí tượng 80 m, một LIDAR, một thiết bị đo

khoảng cách và phát hiện âm thanh (SODAR) và mười trạm khí tượng ở Navarra, Tây Ban Nha. Mục tiêu là mô tả đặc điểm luồng không khí trong thung lũng trải dài khoảng 6 km giữa dãy núi Alaiz và một sườn núi ở thượng nguồn, ảnh hưởng đến điều kiện gió tại vị trí thử nghiệm và các trang trại gió đang hoạt động ở hạ lưu.

6.6.3 Østerild (chạy qua độ gồ ghề không đồng nhất)

Thí nghiệm này nghiên cứu xem độ gồ ghề bề mặt khác nhau (các cánh đồng và rừng xen kẽ) ảnh hưởng như thế nào đến tài nguyên gió ở độ cao hub trên một địa hình gần như hoàn toàn bằng phẳng. Hai LIDAR Doppler quét theo chiều ngang được lắp đặt trên cột khí tượng với phạm vi 5 km hiện đang được đo tại vị trí thí nghiệm ở Østerild, Đan Mạch.

6.6.4 Kassel (luồng không khí qua đồi có rừng)

Mười hai LIDAR Doppler quét tầm xa đo gió trên một ngọn đồi có rừng gần Kassel, Đức, bắt đầu từ tháng 8 năm 2016. Cùng với một cột khí tượng 200 m và 140 m, họ đã lập bản đồ luồng không khí cho một kiểu địa hình trong đó việc đánh giá thấp tài nguyên gió là không phổ biến.

Có thể tham khảo các kết quả sơ bộ từ tất cả các thực nghiệm của NEWA trên trang web của dự án [33].

6.7 Dự án Cải thiện Dự báo Gió 2 [34]

Dự án Cải thiện Dự báo Gió 2 (WFIP2) có mục tiêu chính là cải thiện mô hình dự báo tốc độ gió ở địa hình phức tạp. Để hỗ trợ các mục tiêu của WFIP2, những người tham gia đã tiến hành một chiến dịch thực địa ở phía đông Lưu vực Washington và Oregon Columbia để đánh giá cách các quá trình vật lý trên một phạm vi rộng của quy mô không gian làm thay đổi tốc độ gió trên đường kính rôto. Thiết kế tổng thể cho WFIP2 tập trung vào một tập hợp các hiện tượng thời tiết đặt ra những thách thức đặc biệt đối với dự báo gió và năng lượng gió ở địa hình phức tạp của Hẻm núi Columbia. Một bộ thiết bị quan sát khí tượng lớn, đa dạng đã được triển khai cho WFIP2, bao gồm radar định hình gió, SODAR, LIDAR định hình và quét, máy đo phóng xạ vi sóng, máy đo vi khí áp, máy đo gió âm thanh và hệ thống cân bằng năng lượng bề mặt. WFIP2 đại diện cho sự hợp tác của các phòng thí nghiệm công nghiệp, học viện và liên bang.

6.8 Dữ liệu phê duyệt thử nghiệm đường hầm gió

6.8.1 Tổng hợp dữ liệu thực nghiệm để phê duyệt các mô hình phân tán vi mô [23]

Tổng hợp dữ liệu thực nghiệm để phê duyệt các mô hình phân tán vi mô (CEDVAL) bao gồm các bộ dữ liệu đường hầm gió có thể được sử dụng để phê duyệt các mô hình luồng không khí số. Tất cả các bộ dữ liệu trong CEDVAL đều tuân theo tiêu chuẩn chất lượng cao về tài liệu đầy đủ các điều kiện biên và đảm bảo chất lượng trong quá trình đo. Những dữ liệu này được sử dụng cho quy trình V&V trong hướng dẫn được mô tả trong 5.6.

6.8.2 Ống gió AIJ

So sánh chéo các thực nghiệm đường hầm gió, phép đo hiện trường và kết quả CFD của luồng không khí xung quanh một tòa nhà cao tầng duy nhất được đặt trong lớp ranh giới bề mặt, luồng không khí trong một tòa nhà phức hợp trong một khu vực đô thị thực tế và luồng không khí quanh một cái cây, được lấy từ các mô hình $k-\epsilon$ khác nhau và LES [35]. Những dữ liệu này được sử dụng cho hướng dẫn trong 5.5.

6.8.3 Thử nghiệm ống gió đối với luồng không khí qua đồi

Luồng gió qua một sườn núi hai chiều đơn giản và ngọn đồi ba chiều được đánh giá trong ống gió lớp ranh giới với tỷ lệ 1/1 000. Hai giá trị độ gồ ghề bề mặt khác nhau đã được thử nghiệm: độ gồ ghề thô với $z_0 = 0,3$ mm và một giá trị nhẵn có $z_0 = 0,01$ mm. Các thành phần trung bình và dao động của luồng không khí vào tại các điểm trên địa hình được ghi lại [36]. Việc phê duyệt các mô hình RANS, URANS, LES, DES và DDES đã sửa đổi đã được thực hiện bằng cách sử dụng dữ liệu thử nghiệm đường hầm gió này [14]. Đối với trường hợp bề mặt gồ ghề, người ta thấy rằng ở phía khuất gió của ngọn đồi, tất cả các mô hình đều thể hiện sự phù hợp tốt với các phép đo. Đối với trường hợp bề mặt nhẵn, RANS và URANS đã đánh giá quá cao các yếu tố tăng tốc; giữa LES, DES và DDES đã sửa đổi, DDES đã sửa đổi thể hiện hiệu suất tốt nhất ở phía khuất gió.

7 Các khía cạnh kỹ thuật quan trọng để thực hiện mô phỏng luồng không khí trên địa hình cho các ứng dụng năng lượng gió

7.1 Yêu cầu chung

Điều 7 mô tả các khía cạnh kỹ thuật quan trọng để thiết lập, chạy và trích xuất dữ liệu từ các mô phỏng luồng không khí trên địa hình. Trong ngữ cảnh của NSC, điều quan trọng là đặt vị trí cột khí tượng theo khuyến nghị của TCVN 10678-12-1 (IEC 61400-12-1) [1].

7.2 Chất lượng của dữ liệu đầu vào địa hình

Sử dụng dữ liệu địa hình chất lượng cao (địa hình và độ gồ ghề) để thiết lập mô hình số là yếu tố chính giúp mô hình tính toán các điều kiện gió chính xác nhất và đạt được hiệu suất mô hình cao. Nên sử dụng dữ liệu địa hình với độ phân giải ngang 10 m hoặc tốt hơn xung quanh các điểm quan tâm. Ở khoảng cách xa hơn, độ phân giải thô của thông tin độ cao là đủ (nhưng không quá độ phân giải ngang 30 m).

Ngoài ra, một bản đồ độ gồ ghề chi tiết nên được tạo và phê duyệt, đặc biệt là ở những khu vực nhạy cảm có giá trị bề mặt độ gồ ghề cao (ví dụ: khu vực có rừng).

7.3 Miền tính toán

Việc mở rộng miền theo hướng ngang và thẳng đứng phải đảm bảo rằng trường luồng không khí trong khu vực quan tâm không bị ảnh hưởng. Do đó, nên thực hiện nghiên cứu độ nhạy kích thước mở rộng miền cho từng vị trí cụ thể. Sử dụng vùng đệm nhẵn ở chu vi địa hình là phương pháp tốt nhất được khuyến nghị để cải thiện sự hội tụ mô phỏng.

7.4 Điều kiện biên cho miền tính toán

Các điều kiện biên bề mặt cần được kiểm tra để thể hiện chính xác độ gồ ghề của địa hình. Việc kiểm tra này có thể được thực hiện bằng hình ảnh vị trí hoặc đi đến vị trí đó. Tất cả các điều kiện biên khác phải được quy định sao cho trường luồng không khí trong khu vực quan tâm không bị ảnh hưởng đáng kể.

7.5 Tham số mắt lưới

Cần thực hiện nghiên cứu độ nhạy về độ phân giải lưới ngang và thẳng đứng, kích thước ô đầu tiên và tỷ lệ mở rộng thẳng đứng để đảm bảo rằng trường luồng không khí trong khu vực quan tâm không bị ảnh hưởng đáng kể khi thay đổi mắt lưới.

7.6 Tiêu chí hội tụ

Tiêu chí hội tụ phải đảm bảo rằng trường luồng không khí trong khu vực quan tâm không bị ảnh hưởng.

7.7 Độ ổn định của khí quyển

Độ ổn định của khí quyển thường bị bỏ qua do giả định về điều kiện trung lập trong các sự kiện gió mạnh, nhưng đối với NSC, điều kiện tốc độ gió thấp hơn rất quan trọng do đó cần xem xét độ ổn định. Mô hình thích hợp về độ ổn định của ABL vẫn đang được phát triển trong cộng đồng nghiên cứu và có một số phương pháp tiếp cận. Một cách tiếp cận là thông qua sửa đổi việc khép kín luồng xoáy RANS để tính đến những thay đổi trong thông lượng luồng xoáy trong các điều kiện ổn định khác nhau [6]. Một cách tiếp cận đã biết khác là thông qua việc thêm một số hạng độ nổi vào các phương trình Navier-Stokes và giải một phương trình năng lượng (xấp xỉ Boussinesq) [37].

7.8 Các ảnh hưởng Coriolis

Với các tuabin hiện đại đạt độ cao hub trên 100 m, có thể quan sát thấy các ảnh hưởng lực Coriolis gây ra sự thay đổi hướng gió (xoắn ốc Ekman) trên độ cao rôto, đặc biệt là trong điều kiện khí quyển ổn định. Khuyến nghị rằng các ảnh hưởng của lực Coriolis cần được đưa vào mô hình.

7.9 Các ảnh hưởng của chướng ngại vật

Trong tiêu chuẩn này, chướng ngại vật được coi là vật cản ngăn gió và tạo ra sự biến dạng của luồng không khí. Luồng không khí xung quanh chướng ngại vật có thể được giải quyết thông qua chia cắt lưới và áp đặt các điều kiện biên thích hợp cho bề mặt chướng ngại vật. Một cách khác để lập mô hình luồng không khí xung quanh các chướng ngại vật là thông qua tham số hóa các ảnh hưởng của chướng ngại vật. Trong cách tiếp cận thứ hai, các mô hình tán cây được sử dụng rộng rãi để biểu diễn tác động của các chướng ngại vật đối với luồng không khí. Với sự phê duyệt đầy đủ, các mô hình tán cây có thể được sử dụng để lập mô hình các ảnh hưởng của rừng [7], [38], [39] và [40].

7.10 Đề xuất về khả năng áp dụng mô hình cho NSC

Về bản chất, các mô hình tuyến tính có nhiều hạn chế hơn các mô hình phi tuyến khi có độ dốc địa hình trên 10 %. Việc sử dụng các mô hình tuyến tính trong các điều kiện như vậy có thể gây ra độ không đảm bảo bổ sung trong các kết quả của NSC [41].

Các mô hình RANS có tiềm năng cao hơn các mô hình tuyến tính trong việc dự đoán các yếu tố tăng tốc độ trên các độ dốc địa hình cao hơn 10 %. Tuy nhiên, các phê duyệt ống gió cho thấy rằng các mô hình RANS cũng có thể tính toán sai lưu lượng gió ở hạ lưu các ngọn đồi và chướng ngại vật. Việc sử dụng các mô hình RANS trong các điều kiện như vậy có thể gây ra độ không đảm bảo bổ sung trong kết quả NSC [42].

Các mô hình LES và RANS/LES lại có tiềm năng cao nhất về mặt giải quyết trường luồng không khí trên địa hình phức tạp. So với RANS, các mô hình này thể hiện độ nhạy cao hơn đáng kể đối với các tham số đầu vào (ví dụ: độ phân giải lưới, như được chỉ ra bởi một thử nghiệm đối sánh [43]).

Độ trung thực của mô hình cao hơn đòi hỏi chuyên môn cao hơn và công suất tính toán cao hơn.

NSC trên các vị trí có điều kiện chủ yếu là ổn định sẽ yêu cầu mô hình luồng không khí có xem xét sự phân tầng của ABL [37].

8 Vấn đề mờ

8.1 Tổng quan

Việc hiệu chuẩn vị trí, như được mô tả trong IEC 61400-12-1:2017 sử dụng hai cột khí tượng làm thiết bị đo: cột khí tượng cố định và cột khí tượng tạm thời tại vị trí tuabin. Sau khi hoàn thành hiệu chuẩn vị trí, hàm truyền tốc độ gió và độ không đảm bảo liên quan được quy định, cột khí tượng tạm thời được gỡ bỏ và tuabin được lắp đặt để bắt đầu các phép đo phê duyệt hiệu suất năng lượng.

Trong quá trình phê duyệt hiệu suất ở địa hình phức tạp, NSC được dự tính để không sử dụng cột khí tượng tạm thời để tạo hàm truyền tốc độ gió. Sự kết hợp giữa cột khí tượng cố định với các kết quả mô phỏng số sẽ tạo ra tốc độ gió tại vị trí tuabin. Ở Điều 8, những hạn chế tiềm ẩn của việc sử dụng các

phương pháp hiện có cho mô hình số luồng không khí và ứng dụng của chúng cho NSC được trình bày. Đề xuất cần một đợt phê duyệt đối sánh để phá bỏ những lỗ hổng đang tồn tại trước cho các ứng dụng sau này.

8.2 Xác định hệ số hiệu chỉnh luồng không khí từ kết quả mô phỏng số cho thử nghiệm đường cong công suất

8.2.1 Tổng quát

Quy trình hiệu chuẩn vị trí (SC) là một phần quy định của IEC 61400-12-1:2017. Tiêu chuẩn này mô tả cách tính kết quả SC và cả khi kết quả được coi là hợp lệ cho mục đích thử nghiệm hiệu suất năng lượng. NSC cần xem xét các kiểm tra chất lượng dữ liệu được quy định trong IEC 61400-12-1:2017.

Kết quả chính của thử nghiệm SC là một bảng các hệ số hiệu chỉnh luồng không khí (FCF) cho tất cả các hướng gió trong khu vực đo. Đối với từng bin hướng gió 10° , một đường hồi quy tuyến tính bình phương nhỏ nhất thông thường sẽ được thực hiện với tốc độ gió ở vị trí tuabin là biến phụ thuộc và tốc độ gió tham chiếu là biến độc lập. Nếu độ trượt gió có ảnh hưởng đáng kể thì áp dụng phương pháp bin hướng gió và trượt gió. Thử nghiệm có thể cung cấp thông tin chứng minh cho khu vực đo cho phép. IEC 61400-12-1:2017, Phụ lục C, đưa ra các quy trình kiểm tra chất lượng có thể kích hoạt loại trừ các khu vực gió, dữ liệu đo hoặc tăng độ không đảm bảo. Các kiểm tra chất lượng chính được mô tả dưới đây.

8.2.2 Kiểm tra tương quan cho hồi quy tuyến tính

Đối với mỗi bin hướng gió, mức độ tương quan cần được đánh giá dựa trên hệ số tương quan hồi quy, thường được gọi là giá trị r . Thông qua phân tích K-fold, IEC 61400-12-1:2017, các giá trị độ không đảm bảo được điều chỉnh theo kết quả kiểm tra chất lượng.

8.2.3 Thay đổi hiệu chỉnh giữa các bin hướng gió liền kề

Nên loại bỏ các bin hướng gió khỏi các khu vực đo khi hiệu chỉnh luồng không khí thay đổi hơn 2 % giữa các bin lân cận.

8.2.4 Hiệu chuẩn vị trí và các phép đo hiệu suất năng lượng trong các mùa khác nhau

Những thay đổi theo mùa về điều kiện gió và những thay đổi về độ gồ ghề bề mặt do thảm thực vật, lượng mưa (băng và tuyết) và sự đóng băng của các vùng nước có thể gây ra sự phụ thuộc theo mùa trên các hiệu chỉnh luồng không khí có hiệu chuẩn vị trí. Do đó, nên tiến hành hiệu chuẩn vị trí và đo hiệu suất năng lượng trong cùng một mùa trong năm (ví dụ: cả hai đều diễn ra vào mùa hè).

Các quy trình tương tự để xác định các khu vực hợp lệ được sử dụng cho NSC (với mục đích phê duyệt đường cong công suất) sẽ được nghiên cứu thêm. Dựa trên kết quả của trường hợp phê duyệt đối sánh NSC được đề xuất trong 8.4, các quy trình chi tiết cho NSC có thể được thiết lập. Các quy trình liên quan đến định lượng độ không đảm bảo được thảo luận trong 8.3.

8.3 Định lượng độ không đảm bảo

Định lượng độ không đảm bảo để hiệu chuẩn vị trí được định nghĩa trong IEC 61400-12-1:2017, Điều C.6.

Để tính toán định lượng độ không đảm bảo cho NSC, nên phát triển một phương pháp khác để xác định số lượng độ không đảm bảo liên quan đến hệ số hiệu chỉnh luồng không khí cho từng khu vực hợp lệ.

Cách tiếp cận mới này nên xem xét độ không đảm bảo do các phép đo cùng với các nguồn không đảm bảo khác sau đây:

- các thông số liên quan đến điều kiện ban đầu và điều kiện biên, điều kiện môi trường, các hàm cường bức và các phương trình cấu thành của mô hình số được sử dụng,
- thiếu sự hội tụ của bộ giải phương trình tuyến tính hoặc phi tuyến tính và thiếu sự hội tụ của lưới.

Phương pháp ước tính độ không đảm bảo của mô hình do độ không đảm bảo hội tụ của tham số và lưới được cung cấp trong tài liệu tham khảo [15], [44] và [45].

8.4 Đề xuất đợt phê duyệt các quy trình NSC

8.4.1 Tổng quan

Mục đích của 8.4 là giải quyết các đợt đo còn thiếu liên quan đến phê duyệt quy trình NSC. Việc sử dụng NSC để thay thế các phép đo chưa được phê duyệt và kiểm tra xác nhận dựa trên các phép đo. Do đó, thử nghiệm phê duyệt được đề xuất, trong đó kết quả NSC được so sánh với kết quả hiệu chuẩn vị trí sử dụng hai cột khí tượng đáp ứng như được định nghĩa trong IEC 61400-12-1:2017.

Vị trí được đề xuất và cách bố trí thực nghiệm cho một thử nghiệm như vậy được mô tả dưới đây.

8.4.2 Đánh giá địa hình tại vị trí thử nghiệm

IEC 61400-12-1:2017, Bảng B.1, mô tả các tiêu chí (về độ dốc địa hình và sự thay đổi địa hình tối đa so với mặt phẳng là hàm của khoảng cách giữa tuabin và thiết bị đo gió), khi hiệu chuẩn vị trí phải được thực hiện. Các vị trí có mức độ phức tạp khác nhau vượt quá tiêu chí trong IEC 61400-12-1:2017, Bảng B.1, cần được điều tra.

8.4.3 Bố trí thực nghiệm

Dữ liệu hiệu chuẩn vị trí thực nghiệm hiện có có thể được sử dụng để phê duyệt các quy trình NSC nhưng nên thiết lập thử nghiệm chi tiết hơn để phê duyệt tất cả các khía cạnh mô hình số và nên bao gồm những điều sau đây:

- Hai cột khí tượng ở địa hình phức tạp phải ở khoảng cách tương ứng với $2,5D$ của tuabin hiện đại (ví dụ: nếu D = đường kính rôto, giả sử bằng 130 m thì $2,5D = 325$ m).

- Độ cao của máy đo gió lắp đặt phía trên phải bằng với độ cao hub dự kiến của tuabin (ví dụ: độ cao hub 100 m).
- Việc lắp đặt thiết bị đo phải đáp ứng các tiêu chí của IEC 61400-12-1:2017.
- Căn chỉnh cột khí tượng phải theo hướng gió chủ đạo.
- Tất cả các phép đo nên được thực hiện trong cùng một khoảng thời gian.
- Thiết bị đo cho từng cột khí tượng đáp ứng tối thiểu phải bao gồm:
 - Máy đo gió đỉnh và tham chiếu phải cùng loại và kiểu dáng được lắp đặt theo IEC 61400-12-1:2017.
 - Các van gió phải được lắp đặt theo IEC 61400-12-1:2017.
 - Máy đo gió tại hai vị trí bổ sung (chế tạo và kiểu như nhau) – chiều cao đầu dưới và ở giữa giữa đầu dưới và độ cao hub – nên được lắp đặt để ước tính độ trượt gió.
 - Máy đo gió âm thanh nên được lắp ở độ cao từ 5 m đến 10 m tính từ độ cao hub và ở độ cao đầu thấp hơn để đánh giá hiệu ứng luồng không khí ba chiều và độ ổn định của khí quyển.
 - Một máy đo gió âm thanh ba chiều khác nên được đặt cách mặt đất 3 m, để thu được các dòng nhiệt có tốc độ ít nhất là 10 Hz.
 - Các cảm biến nhiệt độ vị sai nên được đặt ở độ cao của máy đo gió tham chiếu và độ cao của đầu thấp hơn để có thể kiểm tra xác nhận độ ổn định của khí quyển.
 - Nên đặt cảm biến độ ẩm cách mặt đất 3 m.
- Thời gian thử nghiệm của phép đo phải phù hợp với thời gian được yêu cầu ở IEC 61400-12-1:2017 để thu thập lượng dữ liệu tối thiểu; tuy nhiên, thời gian thử nghiệm cho phép thu thập lượng dữ liệu cao hơn đáng kể để cho phép đánh giá chi tiết hơn (ví dụ: ngày-đêm, thay đổi theo mùa, thay đổi độ ổn định), là gấp đôi thời gian yêu cầu trong IEC 61400-12-1:2017.
- Việc lọc dữ liệu nên được áp dụng bằng cách sử dụng các điều kiện tương tự như các phép đo hiệu suất theo IEC 61400-12-1:2017.
- Nên sử dụng khu vực đo 60° liên tục tối thiểu.
- Nên sử dụng cảm biến lượng mưa để có thể lọc ra và phân tích dữ liệu riêng biệt trong các khoảng thời gian mưa.
- Dữ liệu chuỗi thời gian với tần suất tối thiểu theo khuyến nghị trong IEC 61400-12-1:2017 phải được thu thập và lưu giữ ở tần suất lấy mẫu ban đầu.

Thư mục tài liệu tham khảo

- [1] IEC 61400-12-1:2017² Wind energy generation systems – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (Hệ thống phát năng lượng gió – Phần 12-1: Các phép đo hiệu suất năng lượng của tuabin gió phát điện)
- [2] JACKSON, P. S. and HUNT, J. C. R., Turbulent Wind Flow over a Low Hill, Quart. J. R.Met. Soc., 101, 929-955, 1975 (Luồng gió xoáy trên một ngọn đồi thấp)
- [3] TROEN, I., A High Resolution Spectral Model for Flow in Complex Terrain, Proc. 9th Symposium on Turbulence and Diffusion, Roskilde, Denmark, 1990 (Mô hình quang phổ độ phân giải cao cho luồng không khí trong địa hình phức tạp)
- [4] WILCOX, D. C., Turbulence modelling for CFD, DCW Industries Inc., 1993 (Mô hình luồng xoáy cho ngành CFD, DCW)
- [5] HURLEY, S. P. J., An evaluation of several turbulence schemes for the prediction of mean and turbulent fields in complex terrain, Boundary Layer Meteorology, 83(1) 43-73, 1997 (Đánh giá một số sơ đồ luồng xoáy để dự đoán trường trung bình và luồng xoáy trong địa hình phức tạp, Khí tượng lớp ranh giới)
- [6] LI, R. and DELAUNAY, D., A new Turbulence Model for the Stable Boundary Layer with application to CFD in Wind Resource Assessment, Proc. EWEA 2015, 2015 (Mô hình luồng xoáy mới cho Lớp ranh giới ổn định với ứng dụng cho CFD trong Đánh giá tài nguyên gió)
- [7] SOGACHEV, A., KELLY, M. and LECLERC, M. Y., Consistent Two-Equation Closure Modelling for Atmospheric Research: Buoyancy and Vegetation Implementations, Boundary-Layer Meteorology. 145(2) 307-327, 2012 (Mô hình khép kín hai phương trình nhất quán cho nghiên cứu khí quyển: Triển khai thực vật và độ nổi, Khí tượng học lớp ranh giới)
- [8] SMAGORINSKY, J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations, Monthly Weather Review, 91 (3), 99–164, 1963 (Các thực nghiệm tuần hoàn chung với các phương trình nguyên bản)
- [9] SAGAUT, P., Large Eddy Simulation for Incompressible Flows, ISBN 978-3-540-26403-3, Springer, 2006 (Mô phỏng xoáy diện rộng cho các luồng không khí không nén được)
- [10] BECHMANN, A., SØRENSEN, N. N. and Johansen, J., Atmospheric flow over terrain using hybrid RANS/LES., Proc. EWEA2007, Milan, 2007 (Luồng khí quyển trên địa hình sử dụng RANS/LES lai)

² Đã có TCVN 10687-12-1:2023 hoàn toàn tương đương với IEC 61400-12-1:2022.

- [11] SPALART, P. R., Comments on the feasibility of LES for wing and on a hybrid RANS/LES approach. 1st ASOSR CONFERENCE on DNS/LES. Arlington, 1997 (Nhận xét về tính khả thi của LES cho cánh và phương pháp kết hợp RANS/LES)
- [12] SPALART, P. R., DECK, S. and SHUR, M. L., SQUIRES, K. D., STRELETS, M. Kh. And TRAVIN, A., A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities, Theoretical and computational fluid dynamics 20(3) 181-195, 2006 (Một phiên bản mới của mô phỏng xoáy tách rời, chịu mật độ lưới không rõ ràng, Động lực học chất lỏng lý thuyết và tính toán)
- [13] GRITSKEVICH, M. S., GARBARUK, A. V., SCHÜTZE, J. and MENTER, F. R., Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model, Flow, Turbulence and Combustion 88(3), 431-449, 2012 (Phát triển các phương trình DDES và IDDES cho mô hình vận chuyển ứng suất trượt gió $k-\omega$, luồng không khí, luồng xoáy và Đốt cháy)
- [14] ISHIHARA, T. and QI, Y. H., Numerical study of turbulent flow fields over steep terrains by using a modified delayed detached eddy simulations, Boundary-Layer Meteorology pp.1-24, <https://doi.org/10.1007/s10546-018-0389-8>, 2018 (Nghiên cứu số về các trường luồng xoáy trên địa hình dốc bằng cách sử dụng mô phỏng dòng xoáy tách rời bị trì hoãn đã sửa đổi, Khí tượng học lớp ranh giới)
- [15] AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-G-077-1998, 1998 (Hướng dẫn AIAA về Kiểm tra xác nhận và Xác nhận Mô phỏng Động lực học Chất lỏng Tính toán)
- [16] ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, The American Society of Mechanical Engineers, 2009 (Tiêu chuẩn ASME V&V 20-2009 để Kiểm tra xác nhận và Xác nhận trong Tính toán Động lực học Chất lỏng và Truyền nhiệt)
- [17] FRANKE, J., HELLSTEN, A., SCHLÜNZEN, H. and CARISSIMO, B. ed., Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment – Quality Assurance of Microscale Meteorological Models, COST Action 732, 2007 (Hướng dẫn thực hành tốt nhất cho mô phỏng CFD của luồng không khí trong môi trường đô thị – Đảm bảo chất lượng của các mô hình khí tượng vi mô)
- [18] The guidebook for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings (in Japanese), ISBN 978-4818926653, Architectural Institute of Japan, 2007 (Sách hướng dẫn các ứng dụng thực tế của CFD đối với môi trường gió dành cho người đi bộ xung quanh các tòa nhà)
- [19] Guidebook of recommendations for loads on buildings 2 – Wind-induced response and load estimation/Practical guide of CFD for wind resistant design (in Japanese), ISBN978-4818906389, Architectural Institute of Japan, 2017 (Sách hướng dẫn khuyến nghị về tải trọng tác dụng lên tòa nhà 2 – Ước tính tải trọng và phản ứng do gió gây ra/Hướng dẫn thực hành CFD cho thiết kế chống gió)

- [20] AIJ recommendations for loads on buildings (in Japanese), ISBN978-4-8189-0626-6, 2015 (Khuyến nghị AIJ cho tải trọng trên các tòa nhà)
- [21] AIJ Benchmarks for Validation of CFD Simulations Applied to Pedestrian Wind Environment around Buildings, http://www.aij.or.jp/eng/publish/index_ddonly.htm, Accessed on 13 September 2018 (Đối sánh AIJ để phê duyệt mô phỏng CFD áp dụng cho môi trường gió dành cho người đi bộ xung quanh các tòa nhà)
- [22] VDI 3783 Blatt 9:2017-05, Environmental meteorology – Prognostic microscale wind field models – Evaluation for flow around buildings and obstacles, Verein Deutscher Ingenieure, 2017 (Khí tượng môi trường – Mô hình trường gió vi mô tiên lượng – Đánh giá luồng không khí xung quanh các tòa nhà và chướng ngại vật)
- [23] Data sets, CEDVAL at Hamburg University, <http://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=432>, Accessed 13 September 2018 (Bộ dữ liệu)
- [24] JAVIER, S. R. and MORIARTY, P. ed., WAKEBENCH Model Evaluation Protocol for Wind Farm Flow Models, First Edition, IEA-Wind Task 31, 2015 (Giao thức đánh giá mô hình WAKEBENCH cho các mô hình luồng không khí của trang trại gió)
- [25] Evaluation of site-specific wind conditions version 2, MEASNET, 2016 (Đánh giá điều kiện gió cụ thể tại chỗ phiên bản 2)
- [26] DURANTE, F., RIEDEL, V., BUNSE, U., BUSCHE, P., MELLINGHOFF, H., MONNICH, K. and SCHORER, T. ed., Round Robin Numerical Flow Simulation in Wind Energy, Final Report, DEWI GmbH-Deutsches Windenergie-institut, 2008 (Mô phỏng luồng không khí số luân phiên trong năng lượng gió)
- [27] BERG, J., COURTNEY, M. S., JØRGENSEN, H. E., MANN, J. and SØRENSEN, N. N., The Bolund Experiment: Overview and Background, Risø-R-1658(EN), 2009 (Thực nghiệm Bolund: Tổng quan và nền tảng)
- [28] BECHMANN, A., SØRENSEN, N. N., BERG, J., MANN, J. and RÉTHORÉ, P. E., The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Microscale Flow Models, BoundaryLayer Meteorol., 141, 245-271, 2011 (Thực nghiệm Bolund, Phần II: So sánh mù các mô hình luồng không khí vi mô, BoundaryLayer Meteorol)
- [29] MORTENSEN, N. G. and JØRGENSEN, H. E., Comparison of Resource and Energy Yield Assessment Procedures, EWEA Wind Resource Assessment Technology Workshop, 2011 (So sánh các quy trình đánh giá sản lượng tài nguyên và năng lượng)
- [30] MORTENSEN, N. G. and JØRGENSEN, H. E., Comparative Resource and Energy Yield Assessment Procedures (GREYAP) Pt. II, EWEA Technology Workshop: Resource Assessment, Dublin, 2013 (Quy trình đánh giá sản lượng tài nguyên và năng lượng so sánh)

- [31] IEA-Wind Task 31 WAKEBENCH, <http://windbench.net/wakebench>, Accessed on 13 September 2018 (IEA-Wind nhiệm vụ 31 WAKEBENCH)
- [32] MANN, J., ANGELOU, N., ARNQVIST, J., CALLIES, D., CANTERO, E., CHÁVEZ ARROYO, R., COURTNEY, M., CUXART, J., DELLWIK, E., GOTTSCHALL, J., IVANELL, S., KÜHN, P., LEA, G., MATOS, J. C., VEIGA RODRIGUES, C., PALMA, J. M. L. M., PAUSCHER, L., PEÑA, A., SANZ RODRIGO, J., SÖDERBERG, S., VASILJEVIC, N., Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas. Phil. Trans. R. Soc. A, 20160101, doi: 10.1098/rsta.2016.0101, 2017 (Thí nghiệm địa hình phức tạp trong Bản đồ gió châu Âu mới)
- [33] New European Wind Atlas, <http://www.neweuropeanwindatlas.eu/>, Accessed on 13 September 2018 (Bản đồ gió châu Âu mới)
- [34] WFP2 Wind Forecast Improvement Project 2, Atmosphere to Electrons, US Department of Energy, <https://a2e.energy.gov/projects/wfp2>, Accessed on 13 September 2018 (Dự án Cải thiện Dự báo Gió 2, Khí quyển tới Electron, Bộ Năng lượng Hoa Kỳ)
- [35] Architectural Institute of Japan, Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings, http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm, Accessed on 13 September 2018 (Sách hướng dẫn về các ứng dụng thực tế của CFD đối với môi trường gió dành cho người đi bộ xung quanh các tòa nhà)
- [36] ISHIHARA, T., FUJINO, Y. and HIBI, K., A wind tunnel study of separated flow over a two-dimensional ridge and a circular hill, Journal of Wind Engineering, 89: 573-576, 2001 (Một nghiên cứu về đường hầm gió về luồng không khí tách biệt trên một sườn núi hai chiều và một ngọn đồi hình tròn)
- [37] ALINOT, C. and MASSON, C., Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications, ASME Wind Energy Symposium, Reno, U.S.A., 2002 (Mô phỏng khí động học của tuabin gió hoạt động trong lớp ranh giới khí quyển với các phân tầng nhiệt khác nhau)
- [38] QI, Y. H. and ISHIHARA, T., Numerical study of turbulent flow fields around of a row of trees and an isolated building by using modified k- ϵ model and LES model, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 177:293-305, 2018 (Nghiên cứu số về các trường luồng xoáy xung quanh một hàng cây và một tòa nhà biệt lập bằng cách sử dụng mô hình k- ϵ đã sửa đổi và mô hình LES)
- [39] SOGACHEV, A. and PANFEROV, O., Modification of two-equation models to account for plant drag, Boundary-Layer Meteorology, 121, 229–266, 2006 (Sửa đổi các mô hình hai phương trình để giải thích cho lực cản của thực vật)
- [40] CHÁVEZ ARROYO, R., SANZ RODRIGO, J. and GANKARSKI, P., Modelling of atmospheric boundary-layer flow in complex terrain with different forest parametrizations, Journal of Physics:

Conference Series 524, 2014 (Mô hình hóa luồng không khí lớp ranh giới khí quyển ở địa hình phức tạp với các tham số rừng khác nhau)

[41] YAMAGUCHI, A., ISHIHARA, T. and FUZINO, Y., Applicability of linear and nonlinear wind prediction models to wind flow in complex terrain, Proc. World Wind Energy Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 2002 (Khả năng ứng dụng của mô hình dự báo gió tuyến tính và phi tuyến tính đối với luồng không khí ở địa hình phức tạp)

[42] BECHMANN, A., SØRENSEN, N. and JOHANSEN, J., Atmospheric Flow over Terrain using Hybrid RANS/LES, Proc. European Wind Energy Conference and Exhibition, 2007 (Luồng khí quyển qua địa hình sử dụng Hybrid RANS/LES)

[43] HEFNY, M. M. and OOKA, R., Influence of cell geometry and mesh resolution on large eddy simulation predictions of flow around a single building, Building Simulation, 1(3), 251–260, 2008 (Ảnh hưởng của hình học ô và độ phân giải lưới đối với các dự đoán mô phỏng dòng xoáy lớn của luồng không khí xung quanh một tòa nhà)

[44] OBERKAMPF, W. L. and ROY, C. J., Verification and Validation in Scientific Computing, Cambridge University Press, 2010 (Tính toán khoa học về kiểm tra xác nhận và phê duyệt)

[45] ROACHE, P. J., Fundamentals of Verification and Validation, Hermosa Publishers, 2010 (Nguyên tắc cơ bản về kiểm tra xác nhận và phê duyệt)