

第十一屆全國風工程學術研討會

結合CFD模擬與實地風場量測之校園風能潛力評估

陳朋葦¹ 阮于軒²

¹台北科技大學 製造科技研究所/學生

²台北科技大學機械工程系/助理教授

一. 摘要

本研究結合計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬與現場量測，全面評估高密度都市校園中的風能潛力。研究場域為國立臺北科技大學，位於臺北市建築密集市中心區域。由於都市環境形貌複雜、氣流紊亂，本研究場域之風場評估尤為困難。為驗證CFD模擬風場結果，研究在校園目標建築物屋頂架設多種風速量測設備，如圖1所示，三軸超音波風速計與微型氣象站設置於目標建築物之10樓屋頂，地面光達(Ground-Based LiDAR)則設置於同棟建築之3樓平台，地面雷達提供高解析度垂直風速剖面，使研究得以深入分析都市冠層內不同高度的風場結構。結果顯示模擬預測與實測結果間具有一致性，驗證模擬方法之可信度。本研究結果可為都市中小型風力系統的規劃與設置提供實用依據，說明結合CFD模擬與多儀器現場量測(包含垂直風速剖面分析)為評估屋頂風能潛力與推動都市永續能源規劃的有效方式。



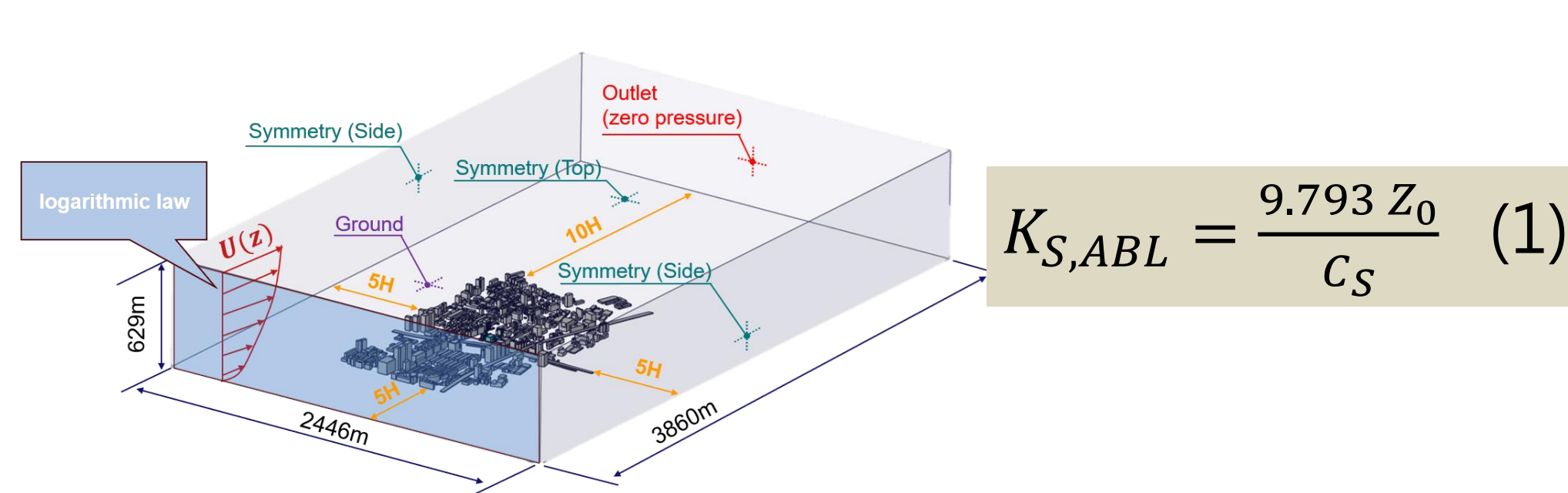
圖1.量測儀器位置圖

二. 研究方法

本研究以臺北市高密度都市區為場域，圖2為模擬範圍涵蓋臺北科技大學校園及周邊建築，區域大小約 1,751 m × 1,232 m，邊界條件取自校園屋頂三軸超音波風速計(高度 40.2 m)與西南側臺北氣象站(高度 6.3 m)之 2025 年2月實測平均數據，並依據對數律(log law)推估各高度之風速分布。參考風速取自超音波風速計量測之 3.66 m/s，並乘以經先前模擬所得之倍率因子1.4，設定為 5.12 m/s，作為此研究參考風速。CFD 模擬採用 ANSYS Fluent，使用三維穩態 RANS 與 k- ω SST 湍流模型SIMPLEC 演算法，二階離散化。計算域前後分別預留 5H 與 10H (H = 129 m) 如圖3所示。網格總數約 3,500 萬，主要為 Poly-Hexcore，最小網格尺寸 0.1 m。粗糙度長度設定 $Z_0 = 1.2$ m，摩擦速度 $C_\mu = 0.09$ 、馮卡門常數 $\kappa = 0.42$ 、 $C_s = 0.5$ 。表面粗糙度依據 Blocken 等[1]方法轉換為等效砂粒粗糙度 K_s ，由公式(1)計算，都市地表設定為 23.5 m，建築表面則為 0.03 m。此設定可合理反映地表紊流結構，提升模擬精度與可靠性。



圖2.臺北科技大學校園及周邊建築 圖3.計算域與邊界條件設定



三. 結果與討論

超音波風速計&微氣象站與CFD模擬風速比較

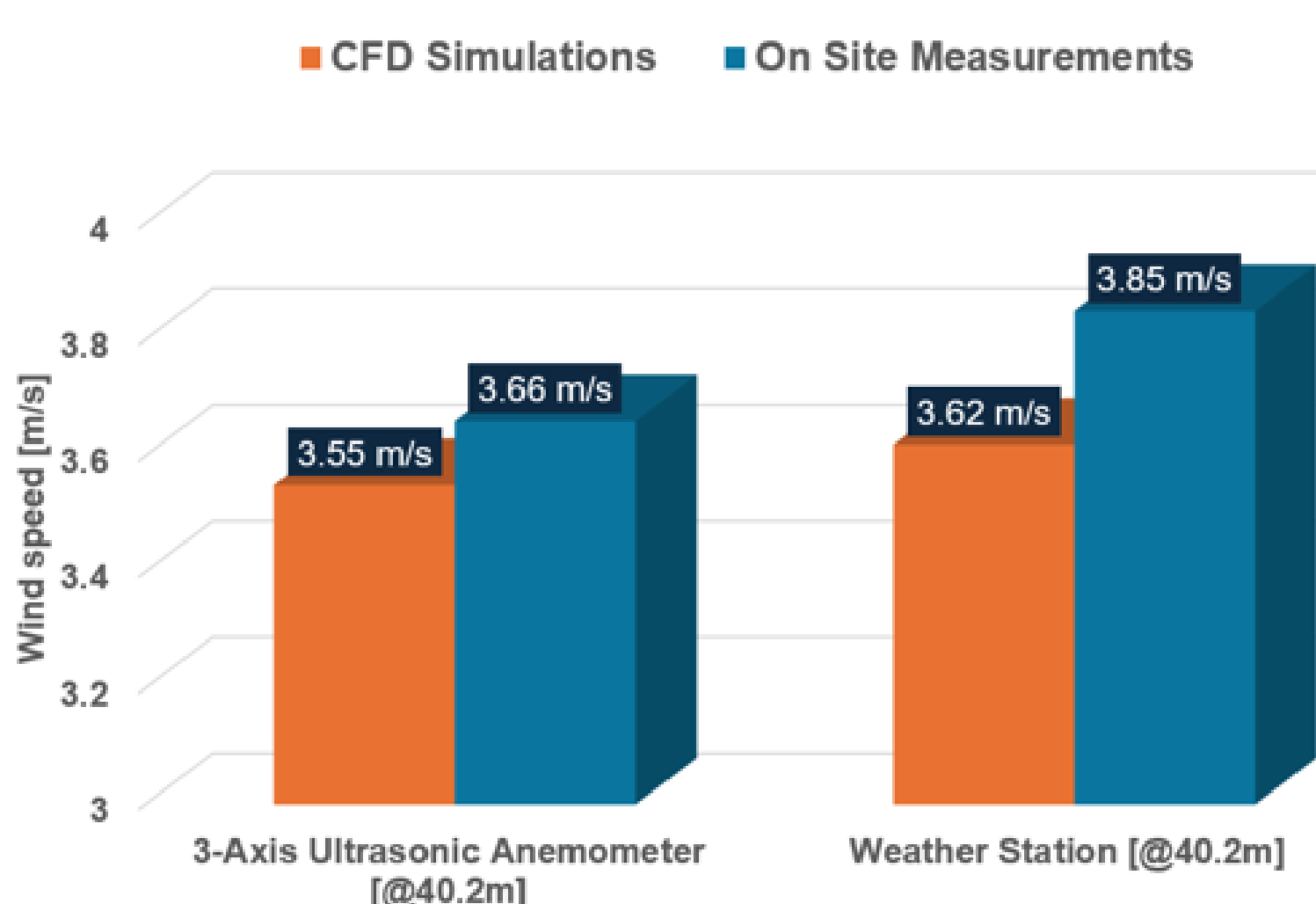


圖4.超音波風速計、微氣象站量測與CFD比較

$$Error = \frac{|Measured - Simulations|}{Measured} \times 100 \quad (2)$$

LiDAR與CFD模擬風速比較

表1. LiDAR量測與CFD各層風速誤差比較

Height (m)	LiDAR (m/s)	CFD Simulations (m/s)	Percentage Error
300	7.8	7.8	0.3%
250	7.4	7.4	0.6%
200	6.8	7.0	2.5%
160	6.2	6.5	5.0%
120	5.6	5.9	6.9%
90	4.9	5.9	7.4%
75	4.6	4.8	4.4%
60	4.3	4.2	2.3%
48	4.1	3.7	10.0%
41	4.0	3.3	16.3%
20	1.9	1.4	26.0%

圖4為本研究比較超音波風速計與氣象站之實測數據與CFD 模擬結果，量測期間為 2025年2月1日至2月28日，並以2月平均風速作為分析依據。結果顯示，2月份超音波風速計量測之平均風速為3.6 m/s，氣象站為3.8 m/s；相較之下，CFD 模擬風速則分別為3.5 m/s 與3.6 m/s。整體而言，CFD 模擬值略低於實測結果。其百分比誤差依公式(2)計算，超音波風速計與微氣象站，兩種儀器量測誤差分別為3 %與6 %。此誤差範圍較小，顯示CFD模擬在風速預測上具有良好準確性，且有效反映實際風況。

表1為3樓使用LiDAR量測之風速，量測時間為2025年2月1日至28日之各高度平均風速，表格第一欄為LiDAR量測高度，第二欄為LiDAR量測之數值，第三欄為CFD模擬結果，第四欄為兩者誤差，其誤差由公式(1)計算。風越往高處，誤差就越小，風場比較穩定，最低誤差僅0.3 %。說明使用對數風速剖面(log law)當作入口條件時，對高空風速模擬比較準確。但是，靠近地面風速誤差較大，在20 m高之位置誤差最高有26 %，其造成之原因為附近高架橋和樹木干擾，造成誤差較大。

超音波風速計與CFD模擬紊流強度比較

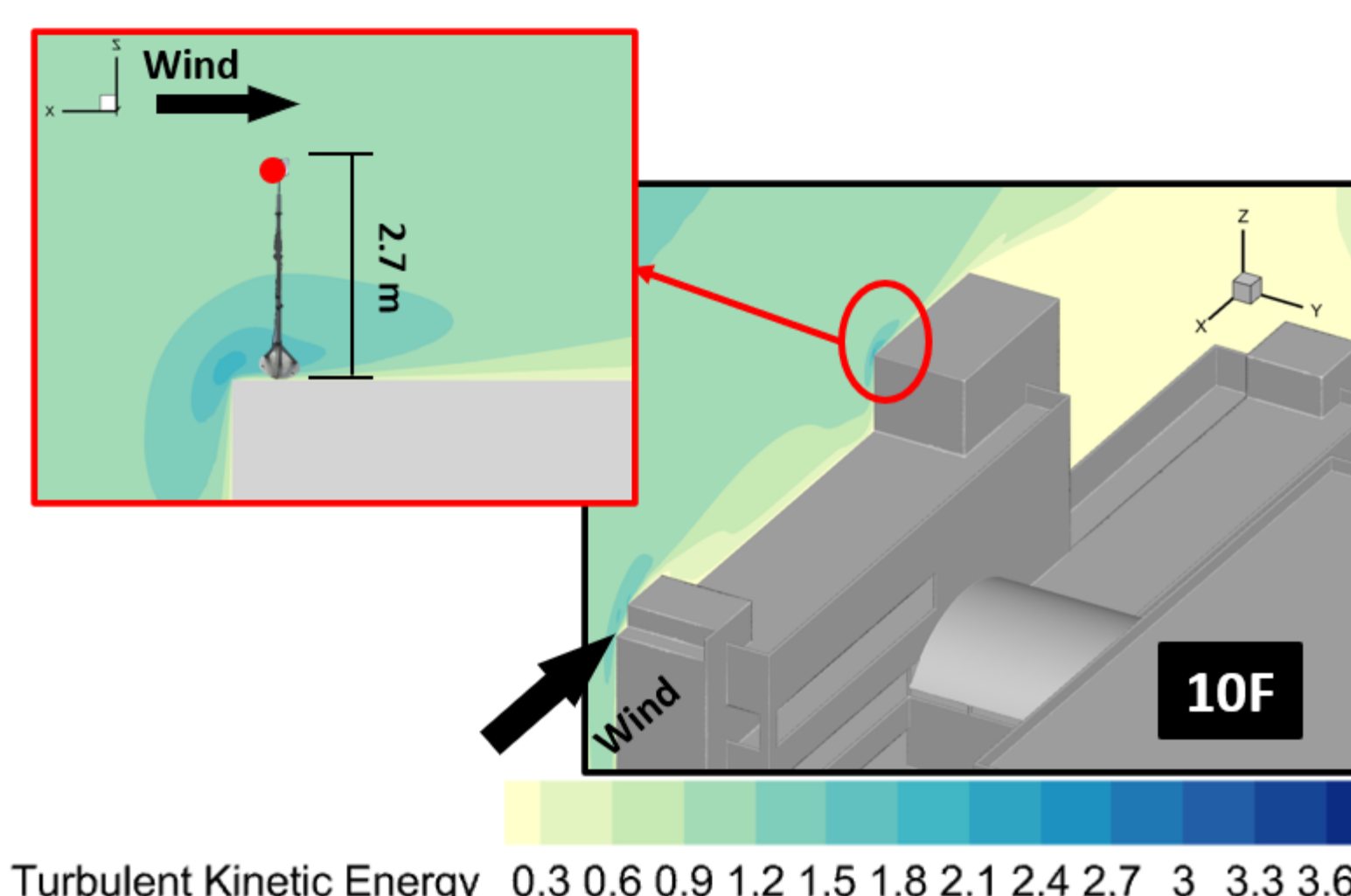


圖5.屋頂前緣Y=0.62 m紊流強度

圖5可觀察到屋頂前緣有明顯紊流，影響屋頂上方風場。為計算紊流強度，利用放置於10樓超音波風速計，量測之uvw三維方向之風速，由公式(3)計算紊流動能k，再代入公式(4)計算紊流強度(Turbulence Intensity, TI)：

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3)$$

$$TI = \frac{\mu'}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U} \quad (4)$$

其中，U為平均風速。CFD分析之TI值為23.8 %，較超音波風速計量測計算TI值27.6 %略低，兩者誤差為13.8 %，表示模擬結果合理，但對湍流之估計稍微偏低。

風力發電機最佳安裝位置

為找出風力發電機於屋頂上方最佳安裝位置，需評估最大風能密度及最低紊流強度，根據IEC 61400-2[2]，風機不應暴露於TI > 0.25之風場。為找出最佳安裝位置並避開高紊流區，十樓迎風向屋頂前方每1 m取樣分析，如圖6所示。圖7 (a)為屋頂前緣1 m到5 m風能密度，(b)為屋頂前緣1 m到5 m紊流強度。屋頂前緣1 m處(F1)，雖然風速相對較高，但紊流強度在屋頂高度1 m處達0.27較高，對風機運行穩定性較不利。相較之下，於屋頂前緣1 m處(F1)距屋頂高度2 m，紊流強度下降至0.24，風速達3.5 m/s，其中，風能功率密度(Wind Power Density, WPD)可由公式(5)計算。 ρ 為空氣密度(本研究取 $\rho=1.225$ kg/m³)，V為平均風速，WPD可達27 W/m²，且TI低於0.25。綜合比較後，屋頂高度2 m風能資源條件與紊流特性均優於1 m，更適合作為風機安裝位置。

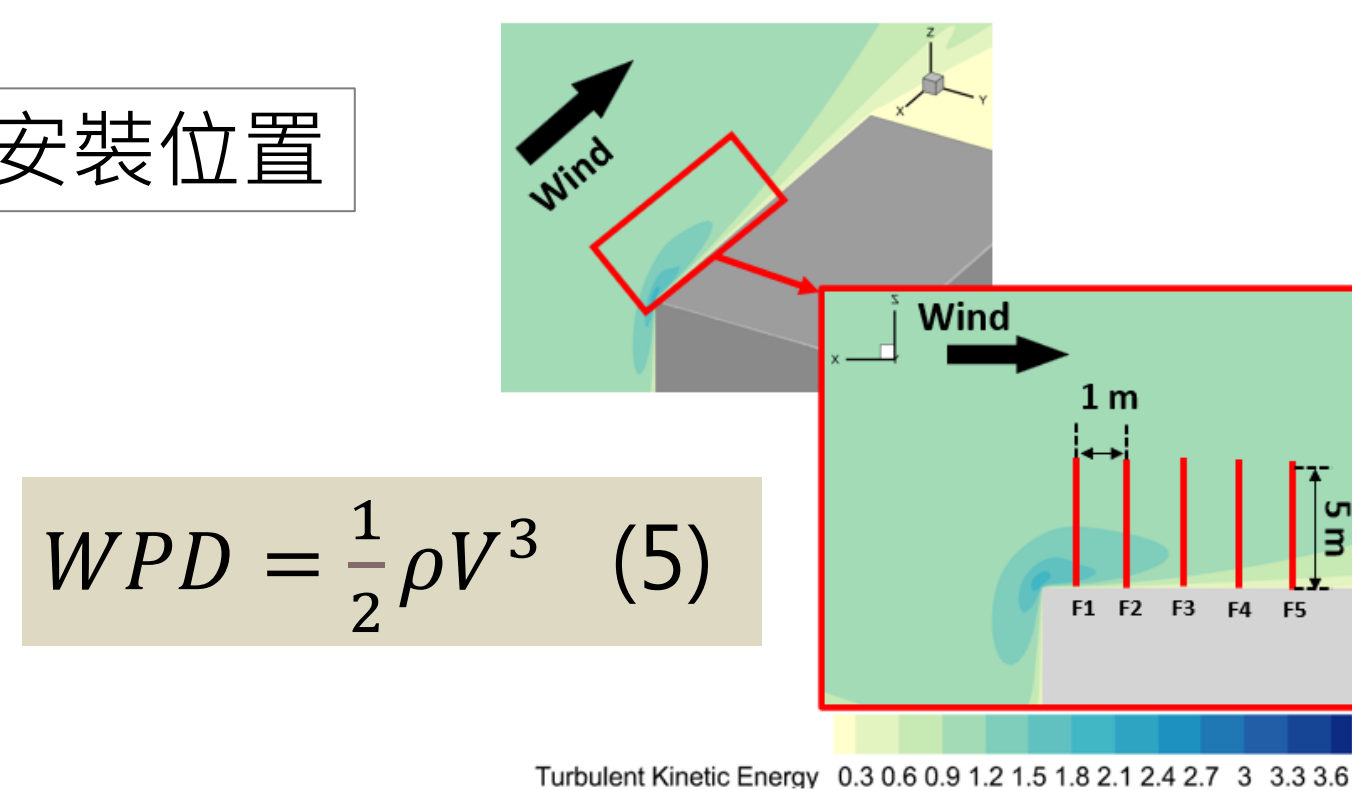


圖6.十樓迎風向前方每1 m取樣分析

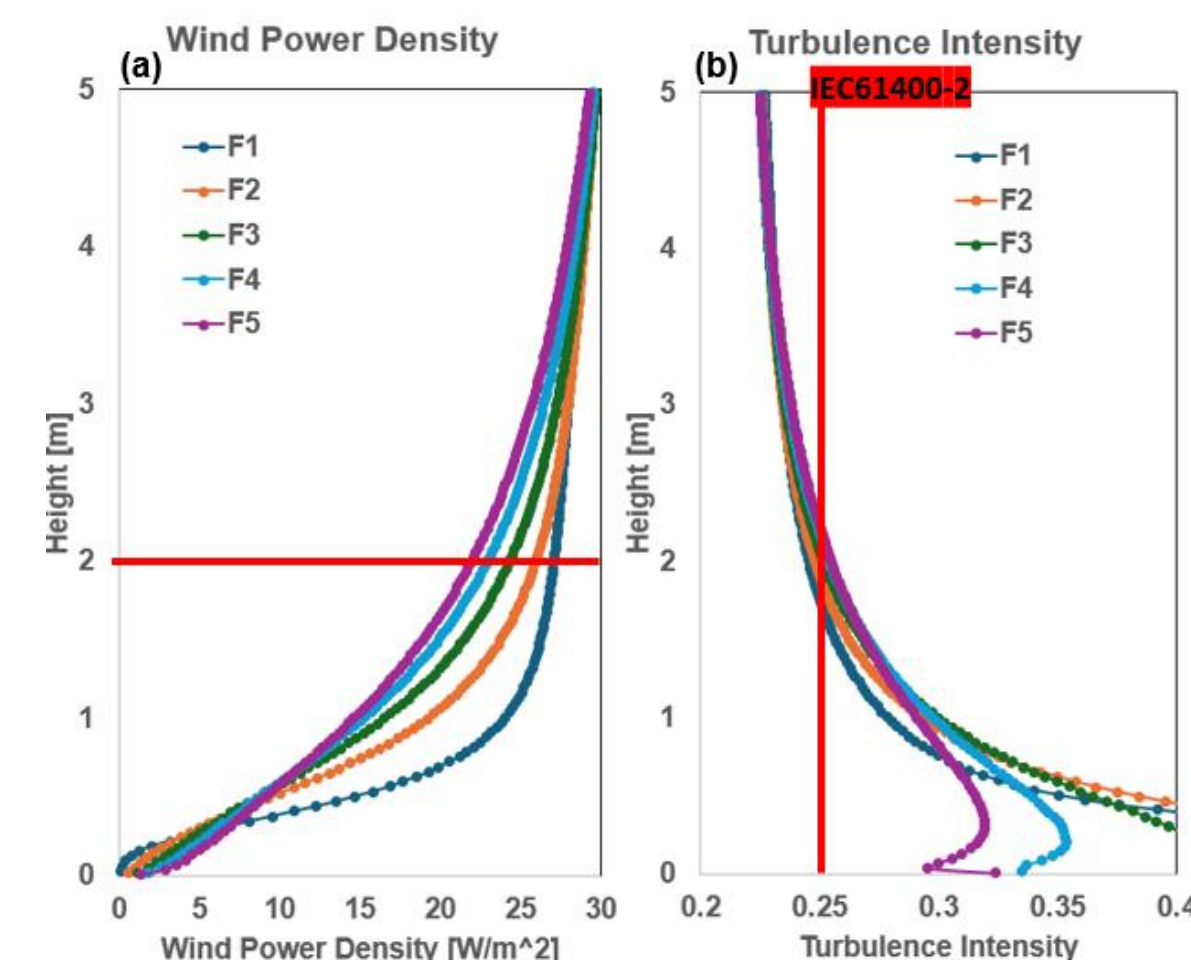


圖7.(a) 十樓迎風向屋頂前方風能密度 (b) 十樓迎風向屋頂前方紊流強度

致謝

本研究成果承蒙國科會計畫 NSTC 113-2628-E-027-001和NSTC 114-2628-E-027-001 及教育部補助大專校院STEM領域及女性研發人才培育計畫「邁向淨零城市-推動性別共融之跨境永續綠領人才培育計畫」之補助與支持，得以順利完成。在此謹向國科會與教育部表達誠摯感謝。

參考文獻

- Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. Atmospheric Environment 2007;41:238–52. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.
- Commission IE. IEC 61400-2, Wind turbines, Part 2: Design requirements for small wind turbines. Charlottellund, Denmark: IEC 2006.

四. 結論

- 驗證結果顯示，超音波風速計與氣象站數據與CFD 模擬高度一致，誤差僅3 %及6 %。
- 與LiDAR比對顯示，CFD較好反映垂直風場趨勢，量測高度48~300 m誤差多在10 %內，而300 m僅0.3 %。
- CFD計算之紊流強度23.8 %略低於三軸超音波風速計量測值27.6 %，顯示有些低估。
- 風機安裝在距離屋頂前緣1 m處，高度2 m以上較高位置，確保風況更穩定並提升能量轉換效率。