

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in **Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

**Affinamento di un modello CFD per
rilasci incidentali di gas e relativa
validazione sperimentale in galleria
del vento**



Relatori

Prof. Andrea Carpignano
Prof.ssa Raffaella Gerboni

Candidato

Arianna Piselli

Dicembre 2020

ABSTRACT

The importance of industrial safety arouses considerable interest in public opinion, whose perception of risk has been exacerbated by the indelible trace of the past devastating accidents. The sensitivity to safety and prevention issues is all the more pronounced in the hydrocarbon sector which, despite the pressing energy transition, continues to play a fundamental role in meeting the world's energy needs, also in view of new solutions aimed at reducing emissions from the exploration and production of these sources. On the other hand, technological development today provides tools to address important safety challenges, with particular attention to accident prevention and mitigation.

This thesis work fits into this framework, focusing on the risk analysis of off-shore Oil&Gas platforms. The project, funded by the “Ministero dello Sviluppo Economico” (MISE), has already involved several research activities carried out at the SEADOG laboratory of the “Politecnico di Torino”. More in detail, the focal point of the study is the simulation of an accidental release of natural gas caused by a rupture of a pipeline on the deck of a platform, modelled on the structures normally found in the Adriatic Sea.

The tool used to simulate the different accidental events is the CFD analysis through an innovative model, called SBAM (“Source Box Accidental Model”), in which the phenomenon is separated in the different phases of release and dispersion and modeled using different methods, according to the characteristics of the development of each phase.

One of the objectives of this work consists in the estimation of the best turbulence model to be used in the simulation of gas dispersion into the platform. A comparison of the results obtained with the various models ($k-\omega$ e $k-\varepsilon$, in their variants) has been conducted, for just one position of the release. The final choice fell on the $k-\omega$ Standard model.

In addition, since the cloud dispersion is significantly affected by motion conditions, an accurate description of the phenomenon cannot leave out of consideration a study of the velocity field. It was therefore necessary to understand at what distance from the area of interest it is correct to impose the boundary condition corresponding to the uniform wind profile, in order not to affect the final solution: a 15 *m* distance appears conservative enough.

After completing these preliminary modelling activities, the work focused on the main objective: the search for a match between the results obtained from the fluid dynamics simulation of the most representative cases and the experimental data obtained from the release tests carried out in the SEASTAR-WT wind tunnel, realized at the Environment Park in Turin and completed at the beginning of October. The final aim is to initiate a validation process of the SBAM model using a scale model of the platform (“Mock-Up”), which allows to reproduce, through an accurate scaling procedure, conditions of dynamic similarity with the real case. The work carried out in this thesis project has allowed to test the proper functioning of the wind tunnel and the detection systems and, at the same time, to show for most of the case studies analyzed a good consistency in the trends of concentrations obtained from experimental measurements and CFD simulations.

L'importanza della sicurezza industriale è un tema che suscita notevole interesse nell'opinione pubblica, la cui percezione del rischio è stata inasprita dall'indelebile traccia di devastanti incidenti avvenuti in passato. La sensibilità per i temi di sicurezza e prevenzione è tanto più accentuata nel settore degli idrocarburi che, nonostante l'incalzare della transizione energetica, continua a ricoprire un ruolo fondamentale nel soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale, anche in vista dell'implementazione di soluzioni volte a ridurre o azzerare le emissioni derivanti dall'esplorazione e produzione di tali fonti. D'altra parte, lo sviluppo tecnologico mette oggi a disposizione strumenti che consentono di affrontare importanti sfide in tema di sicurezza, con un'attenzione particolare alla prevenzione e mitigazione degli incidenti.

Il presente lavoro di tesi si inserisce in tale ambito, focalizzando l'attenzione sull'analisi di rischio delle piattaforme off-shore per l'estrazione di Oil&Gas. Il progetto, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), ha già coinvolto numerose attività di ricerca realizzate presso il laboratorio SEADOG del Politecnico di Torino. Più nel dettaglio, lo studio è incentrato sulla simulazione di un rilascio incidentale di gas naturale causato da una rottura di una tubazione su un "deck" di una piattaforma, sul modello delle strutture normalmente rinvenibili nel mar Adriatico.

Lo strumento utilizzato per simulare i diversi eventi incidentali è l'analisi CFD mediante un approccio innovativo, denominato SBAM ("Source Box Accidental Model"), in cui il fenomeno viene separato nelle distinte fasi di rilascio e dispersione e modellato utilizzando metodi differenti, in base alle caratteristiche dello sviluppo di ciascuna fase.

Un primo obiettivo che questo lavoro si è posto è stato quello di comprendere quale sia il modello di turbolenza più adatto per simulare la dispersione della nube di gas in piattaforma. Si è quindi condotto uno studio volto al confronto dei risultati ottenuti con i diversi modelli ($k-\omega$ e $k-\epsilon$, nelle loro varianti), per un'unica posizione di rilascio. La scelta finale è ricaduta sul modello $k-\omega$ Standard.

Inoltre, poiché la dispersione della nube risente notevolmente delle condizioni di moto, una descrizione accurata del fenomeno non può prescindere da uno studio del campo di velocità. È stato quindi necessario comprendere a quale distanza dalla zona d'interesse imporre la condizione al contorno di vento uniforme, in modo che questa non influenzi la soluzione finale: una distanza di 15 m è apparsa sufficientemente conservativa.

Completate queste attività modellistiche preliminari, il lavoro si è poi concentrato sull'obiettivo principale, ossia la ricerca di un riscontro tra i risultati ottenuti dalla simulazione fluidodinamica dei casi più rappresentativi e i dati sperimentali ottenuti dalle prove di rilascio svolte nella galleria del vento SEASTAR-WT, realizzata presso l'Environment Park di Torino e ultimata ad inizio ottobre. Il fine ultimo è proprio quello di avviare un processo di validazione del metodo SBAM utilizzando un modello in scala della piattaforma ("Mock-Up"), con il quale riprodurre, attraverso l'ausilio di un'accurata procedura di scaling, condizioni di similitudine fluidodinamica con il caso reale. Il lavoro svolto nel presente progetto di tesi ha permesso di verificare il corretto funzionamento della galleria e dei sistemi di rilevazione e, nel contempo, di evidenziare per gran parte dei casi studio analizzati una buona coerenza negli andamenti delle concentrazioni ricavate dalle rilevazioni sperimentali e dalle simulazioni CFD.

RINGRAZIAMENTI

Prima di lasciar spazio alla trattazione, vorrei dedicare un pensiero a tutte le persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla realizzazione di questo lavoro e a tutti coloro che mi sono stati vicini durante questo percorso.

Vorrei ringraziare innanzitutto il prof. A. Carpignano e la prof.ssa R. Gerboni, per gli indispensabili consigli e l'immensa disponibilità con cui mi hanno guidato in questi mesi di lavoro.

Un ringraziamento speciale va a tutta la squadra con cui ho avuto l'opportunità di lavorare e, in particolare, ad A. Moscatello e G. Ledda che, con pazienza e immancabile gentilezza, mi hanno sostenuto e incoraggiato in questi mesi di insolita collaborazione, alleggerendo non poco le difficoltà della distanza.

Il ringraziamento più grande va ai miei genitori, perché avrei voluto ringraziarli ogni giorno per i valori che mi hanno trasmesso, per tutte le opportunità che mi hanno permesso di cogliere e per l'amorevole fiducia in me che vorrei poter essere in grado di ripagare.

Un grande pensiero va a mia sorella, Marika, con cui ho un legame dall'indicibile valore e che non potrebbe mai avere eguali.

A Giulio, che sa già tutto quello che vorrei dirgli, anche se credo che non sia mai abbastanza.

A mia nonna Angela, che a 94 anni trova sempre il modo di preoccuparsi ancora per me, e a mia nonna Teresa, che vorrei fosse ancora qui.

Ai miei zii, che da menzionare uno ad uno sarebbero troppi, perché è anche grazie a loro che riusciamo ad essere una grande e scoppiettante famiglia.

Vorrei ringraziare infine tutti gli amici che mi hanno regalato momenti di allegra spensieratezza, offrendomi al tempo stesso preziose opportunità di crescita. Ringrazio in particolar modo Federica, perché i chilometri di distanza non hanno mai posto ostacoli all'amicizia che ci lega. Un pensiero va a Giacomo, a cui sarò sempre grata per essermi rimasto accanto quando più ne avevo bisogno. Grazie agli amici di vecchia data e ai compagni di Università e del Collegio, che porterò sempre nel cuore per aver dato sostanza a questo inciso di vita universitaria a Torino.

INDICE

ABSTRACT.....	I
RINGRAZIAMENTI	III
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1. CONTESTO OIL & GAS.....	1
1.1.1. SICUREZZA NEGLI IMPIANTI IN MARE.....	2
1.2. ANALISI DI RISCHIO	4
1.3. IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE FLUIDODINAMICA.....	6
2. METODOLOGIA E OBIETTIVI	8
2.1. STUDIO DEL RILASCIO.....	8
2.2. STUDIO DEGLI SCENARI INCIDENTALI	11
2.2.1. SELEZIONE DEGLI SCENARI	11
2.2.2. SIMULAZIONE NUMERICA DEGLI SCENARI	13
2.3. RICHIAMO AI LAVORI PRECEDENTI.....	17
2.4. OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO	18
2.5. PROCEDURE DI SCALATURA.....	19
3. CASI STUDIO ANALIZZATI.....	23
3.1. CARATTERISTICHE DELLA SOURCE BOX	23
3.2. POSIZIONI DI RILASCIO.....	24
3.3. STUDIO PRELIMINARE DEI MODELLI DI TURBOLENZA	28
3.3.1. CONFRONTO QUALITATIVO.....	28
3.3.2. CONFRONTO QUANTITATIVO.....	31
4. STUDIO DEL CAMPO DI MOTO DEL VENTO	34
4.1. CAMPO DI MOTO DEL VENTO A 45°.....	34
4.2. CAMPO DI MOTO DEL VENTO A 0°.....	44
4.3. STUDIO DEL RILASCIO CON DOMINI DIVERSI.....	47
5. APPARATO SPERIMENTALE E SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....	52
5.1. LABORATORIO SEASTAR WT.....	52
5.1.1. GALLERIA DEL VENTO	53
5.2. DESCRIZIONE DEL SET-UP SPERIMENTALE.....	56
5.3. RIEPILOGO DELLE PROVE SVOLTE	60
6. ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI.....	62
6.1. RISULTATI DEL PRIMO SET DI PROVE.....	63
6.1.1. POSIZIONE 1, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.	63

6.1.2.	POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.	66
6.1.3.	POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.	68
6.1.4.	POSIZIONE 3, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.	70
6.2.	STUDIO SULL'OFFSET DEI SENSORI	73
6.3.	RISULTATI DEL SECONDO SET DI PROVE	75
6.3.1.	POSIZIONE 1, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.	76
6.3.2.	POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.	82
6.3.3.	POSIZIONE 3, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.	89
6.3.4.	POSIZIONE 5, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.	96
7.	CONCLUSIONI.....	101
	BIBLIOGRAFIA	103

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un ampio progetto sviluppato dal Centro di competenza SEASTAR (Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research), nato nel giugno 2018 da una collaborazione tra il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) e il Politecnico di Torino, con lo scopo di studiare alcuni possibili scenari di rilascio incidentale di gas in pressione in impianti off-shore Oil&Gas. Tale centro trova collocazione presso il Parco Scientifico Tecnologico per l'Ambiente "Environment Park". Il progetto si avvale dell'appoggio del laboratorio SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas), in cui sono coinvolti i dipartimenti di ricerca DENERG, DIATI e DISAT del Politecnico di Torino.

Il capitolo corrente offre un quadro generale del contesto in cui tale studio si inserisce e del ruolo della CFD nell'ambito dell'analisi di rischio, nonché degli strumenti commerciali a disposizione, evidenziando infine l'importanza di una validazione sperimentale del modello.

1.1. CONTESTO OIL & GAS

Nonostante la transizione energetica abbia come effetto principale l'impiego sempre maggiore delle fonti rinnovabili, la ricerca e lo sviluppo del settore degli idrocarburi occupa ancora oggi un ruolo importante. Di fatto questi rappresentano per il futuro prossimo una fonte imprescindibile per il soddisfacimento del fabbisogno mondiale per diversi motivi, legati tanto alla disponibilità delle fonti quanto ai loro vantaggi, tra cui il costo relativamente basso, l'alta densità energetica e la facilità di stoccaggio e trasporto.

La maggior parte degli analisti concorda sul fatto che la domanda di idrocarburi continuerà a crescere nel prossimo decennio o due, e questo è tanto più vero per il gas naturale. Come riportato nel World Energy Outlook del 2019 [1], il consumo di gas naturale nel 2018 è aumentato del 4,6%, un aumento che rappresenta quasi la metà dell'aumento della domanda globale di energia. Dal 2010, l'80% della crescita è stata concentrata in tre regioni chiave: gli Stati Uniti, dove la rivoluzione dello "shale gas" è in pieno svolgimento; la Cina, dove le questioni relative all'espansione economica e alla qualità dell'aria hanno sostenuto una rapida crescita; e il Medio Oriente, dove il gas rappresenta la via per la diversificazione economica dal petrolio. Il 2019 è stato un anno record per gli investimenti nella nuova fornitura di GNL (gas naturale liquefatto), che rappresenta la chiave per una più ampia crescita in futuro. Il gas naturale continua di fatto a superare il carbone e il petrolio sia nello scenario delle politiche dichiarate, dove la domanda di gas cresce di oltre un terzo, sia nello scenario di sviluppo sostenibile, dove la domanda di gas cresce modestamente fino al 2030 prima di ritornare ai livelli attuali entro il 2040. [2]

Tuttavia, nelle considerazioni precedenti non si è potuto tenere conto degli effetti causati dalla pandemia da Covid 19. Le politiche di lockdown hanno necessariamente prodotto una netta flessione della domanda di combustibili fossili deputati al trasporto che, alla fine di marzo 2020, si stima attorno al 50% della domanda riferita al medesimo periodo del 2019. [3] Sul recupero della domanda di combustibili fossili gravano diversi fattori. Primo fra tutti l'estensione, in intensità e durata temporale, della seconda ondata che il mondo sta affrontando e che ha reso necessario il ricorso a nuove misure di lockdown in molti Paesi. In secondo luogo, occorrerà valutare se e come la crisi economica che il Covid ha generato si acuirà, dal momento che vi è una chiara e ovvia correlazione tra crisi economica e domanda di combustibili fossili. [4] Un ulteriore fattore è quello ambientale: la pandemia potrebbe essere un'occasione per accelerare il *Green New Deal*.

Di fatto, l'impatto ambientale dovuto all'elevato potere inquinante e all'azione climalterante degli idrocarburi, unitamente ad un processo di formazione di gran lunga più lento del rateo di consumo umano, sono fattori che contribuiscono a disincentivare l'utilizzo delle fonti fossili. Si profilano sfide ambientali e commerciali che spingono all'implementazione di nuove tecnologie e soluzioni volte ad aumentare l'efficienza e a ridurre (o addirittura eliminare) le emissioni derivanti dall'esplorazione e dalla produzione di idrocarburi.

1.1.1. SICUREZZA NEGLI IMPIANTI IN MARE

Oggi, la produzione off-shore è parte integrante della fornitura mondiale di petrolio e gas, rappresentando oltre un quarto della produzione mondiale di petrolio e gas nel 2016. Mentre la produzione di petrolio offshore è rimasta costante a circa 26-27 milioni di barili al giorno negli ultimi dieci anni, la produzione di gas off-shore è cresciuta di quasi il 30%, fino a più di 1000 *bcm* (*miliardi di metri cubi*) all'anno nello stesso periodo (Figura 1.1) [5].

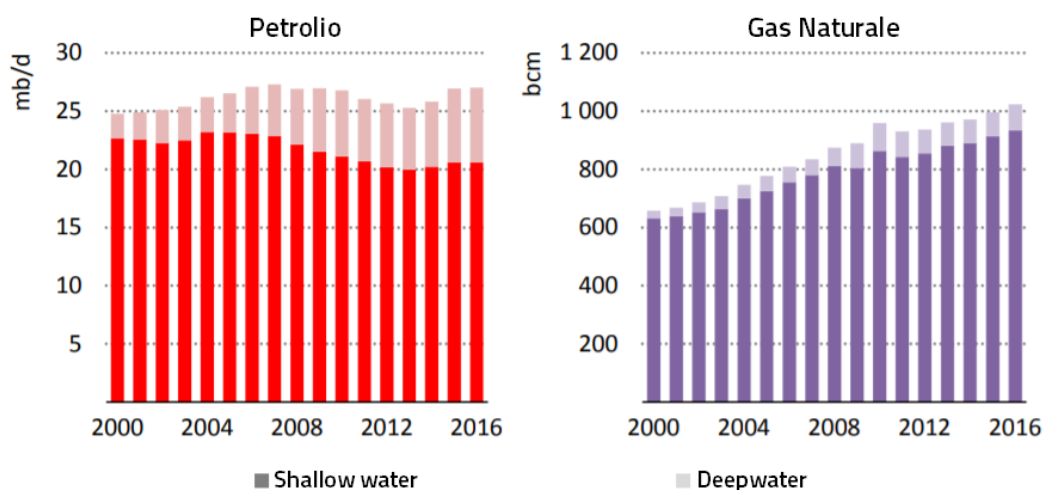


Figura 1.1 – Andamento della produzione di idrocarburi off-shore dal 2000, [5]

La produzione off-shore di petrolio e gas è localizzata in molte parti del mondo, con le principali aree di produzione in Medio Oriente, Mare del Nord, Brasile, Golfo del Messico e Mar Caspio. Oltre allo sviluppo delle risorse, alcuni elementi della catena di

approvvigionamento che erano esclusivamente a terra – in particolare la liquefazione, lo stoccaggio e la rigassificazione del gas naturale liquefatto (GNL) – si stanno ora spostando su navi off-shore appositamente progettate. L'off-shore è anche al centro dell'attività di esplorazione: i maggiori ritrovamenti recenti di petrolio e gas sono stati tutti in acque ad una profondità superiore a 400 m, rappresentando in media circa il 50% dei volumi di petrolio e gas convenzionali scoperti negli ultimi dieci anni. [5]

Stando ai dati forniti dal MISE, attualmente nei mari italiani sono presenti 138 impianti off-shore, tra piattaforme e teste pozzo sottomarine, la maggior parte di tipo fisso e con struttura emersa. La zona dell'Alto Adriatico è quella maggiormente interessata dalla presenza di tali strutture. [6]

Si riporta Figura 1.2 una fotografia della più grande piattaforma off-shore Italiana, Vega, situata a 12 miglia dalla costa di Pollazzo in Sicilia, caratterizzata da una struttura emersa a 3 piani ("decks") rappresentativa della stragrande maggioranza delle piattaforme esistenti in Italia.



Figura 1.2 – Immagine della piattaforma Vega, [7]

Dato l'imponente ruolo ricoperto dalle piattaforme nell'approvvigionamento energetico e visti i rischi connessi alla prospezione e allo sfruttamento delle risorse di idrocarburi, si comprende come un aspetto fondamentale da tenere in considerazione in questo campo sia quello della sicurezza. L'entità delle possibili conseguenze di un incidente, come mostrato da vari disastri petroliferi (ne è un esempio quello della piattaforma *Deep Water Horizon* nel 2010), hanno posto l'attenzione sull'intrinseca pericolosità delle piattaforme off-shore, legata alla presenza di sostanze infiammabili e tossiche, quali Metano (CH_4), Solfuro di Idrogeno (H_2S), ma anche in misura minore Monossido di Carbonio (CO) e Biossido di Carbonio (CO_2).

Appare evidente che la questione della sicurezza industriale, da assicurarsi attraverso azioni di prevenzione e mitigazione, si è in tal modo imposta come uno dei temi cruciali del dibattito sociale moderno. Si rende quindi indispensabile uno studio finalizzato tanto all'identificazione dei pericoli quanto allo sviluppo di strategie di prevenzione e mitigazione efficienti, anche alla luce degli atti normativi emanati in ambito europeo e nazionale.

Nell'ottica di garantire condizioni di sicurezza nel settore degli idrocarburi e minimizzare i rischi di inquinamento dell'ambiente marino, la Commissione Europea ha fissato gli standard minimi di sicurezza per la ricerca e la produzione di idrocarburi in mare attraverso la *Direttiva 2013/30/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio* del 12 giugno 2013 sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la *direttiva 2004/35/CE* [8]. Il recepimento di tale direttiva è avvenuto in Italia attraverso il *D.Lgs. 145/2015*, il quale dispone i requisiti minimi per prevenire e mitigare gli incidenti gravi nelle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi [9].

Il progetto presentato in questa tesi, riguardante il rilascio di una sostanza infiammabile, rientra proprio nell'ambito di tale normativa, potendosi potenzialmente considerare un "incidente grave" sulla base della definizione fornita nel decreto stesso.

Va inoltre evidenziato che in Italia il compito di garantire il rispetto delle norme introdotte dal decreto legislativo del 18 agosto 2015, n.145 spetta al Comitato per la sicurezza delle operazioni in mare (Comitato Offshore), il quale ha suggerito l'adozione di linee guida a supporto degli operatori per la redazione della relazione grandi rischi. Tra gli elementi chiave delle linee guida vi sono la definizione di procedure da seguire per l'analisi del rischio nelle attività di estrazione e produzione nei mari italiani, procedure che tengono conto dell'evoluzione della conoscenza tecnica in materia di prevenzione e protezione. [10]

Di fatto la ricerca volta ad una sempre maggiore salvaguardia della popolazione e dell'ambiente non può prescindere dallo sviluppo tecnologico, fondamentale strumento da utilizzarsi per un miglioramento continuo dell'affidabilità degli impianti e al soddisfacimento di stringenti requisiti di sicurezza. Sono mosse da tali propositi le attività di ricerca avviate a seguito del D.Lgs 145/2015 dal Ministero dello Sviluppo Economico, tra cui quelle di competenza del Centro SEASTAR, che hanno dato spazio al presente lavoro di tesi.

1.2. ANALISI DI RISCHIO

Fondamentale per la progettazione delle misure di sicurezza è lo strumento di "Risk Assessment" (Valutazione del Rischio), finalizzato tanto alla stima dei danni causati da possibili incidenti e della relativa probabilità di accadimento, quanto all'identificazione degli aspetti critici del sistema, con l'obiettivo ultimo di suggerire azioni di prevenzione e mitigazione capaci di rendere socialmente accettabile e tollerabile tale rischio [11].

L'analisi di rischio si articola nei seguenti punti:

- Previsione dei possibili malfunzionamenti del sistema;
- Identificazione delle conseguenze;
- Valutazione del loro impatto sull'area in cui il sistema è localizzato;
- Valutazione del danno umano, ambientale, economico e reputazionale;
- Stima del rischio e sua classificazione come "tollerabile" o "inaccettabile";
- Implementazione di azioni preventive o di mitigazione per ridurre il rischio effettivo.



Figura 1.3 – Schema riassuntivo della procedura di valutazione dei rischi

Nella procedura di analisi si possono identificare due fasi:

- Valutazione qualitativa: attraverso un approccio di tipo sistematico si identificano tutte le possibili sorgenti di pericolo;
- Valutazione quantitativa QRA (Quantitative Risk Assessment): si procede con una stima numerica del rischio, che consente di determinarne l'accettabilità tramite un confronto con i valori di riferimento; questo approccio è da applicarsi alle situazioni più critiche.

È proprio durante questa seconda fase che risulta fondamentale effettuare una simulazione accurata dell'incidente.

Si osserva che l'inizio della sequenza incidentale può, come nel caso oggetto di studio, identificarsi con un rilascio indesiderato e incontrollato di sostanze pericolose, come gas, liquidi o fluidi bifase. Il tipo di sostanza e le sue condizioni di trasporto/stoccaggio, il tipo di rottura e la presenza di sistemi di protezione sono parametri determinanti nella simulazione del rilascio. I risultati attesi sono principalmente una stima delle quantità rilasciate, la portata di rilascio e la durata totale. La sostanza, rilasciata generalmente ad una concentrazione del 100 %, tende a diluirsi in atmosfera, quindi lo studio della sua dispersione consente di esaminare l'evoluzione della nube e di identificare aree / volumi con concentrazioni comprese all'interno di un certo intervallo di valori, che per le sostanze infiammabili è ad esempio il campo di infiammabilità, mentre per le sostanze tossiche è identificato dalle soglie di riferimento LC50 e IDLH. Questa simulazione presenta complessità relative alla necessità di molte informazioni relative alla geometria del contesto, alle condizioni di meteo del sito e al tipo di sostanza coinvolta nel rilascio. [11]

1.3. IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE FLUIDODINAMICA

La simulazione dell'incidente risulta uno step fondamentale nella procedura di *Risk Assessment*, poiché consente di valutare le conseguenze fisiche di uno scenario incidentale.

I modelli semi-empirici o monodimensionali (di cui si possono trarre informazioni in [12]) sono ampiamente utilizzati per la progettazione in ambito industriale, grazie alla loro semplicità e rapidità di implementazione. Di fatto non richiedono una conoscenza specifica elevata per il loro utilizzo e consentono di effettuare un grande numero di simulazioni di scenari incidentali in “tempi rapidi”, cioè compatibili con la fase di design di un impianto. Tuttavia, la loro inaccuratezza conduce spesso ad una sovrastima dei rischi e ad un sovradimensionamento delle strutture di contenimento del rilascio e, quindi, ad un conseguente spreco economico. Essendo inoltre ricavati attraverso un processo sperimentale, la loro applicazione risulta limitata ai casi studio considerati.

Tuttavia, i metodi empirici, come ad esempio il *Turbulent Free Jet model* applicabile ai getti liberi, non risultano realistici nel caso di piattaforme off-shore, dove gli spazi limitati e congestionati non consentono di garantire il mantenimento di distanze tipiche degli ambienti convenzionali. Una simulazione accurata delle geometrie, unitamente a un'analisi delle conseguenze, è fondamentale per la definizione delle barriere di sicurezza: di fronte a tale necessità, i limiti dei metodi empirici appaiono evidenti.

Uno strumento che consente di ottenere risultati dettagliati senza le limitazioni legate alla complessità della geometria è quello della fluidodinamica computazionale. Affermatasi a partire dagli anni '70, è diventata più flessibile ed efficiente grazie anche ad un notevole aumento della capacità computazionale a disposizione, che ha reso possibile la modellazione di ambienti sempre più complessi. Tale tecnica consiste nella risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes su tutto il dominio di interesse. Risulta evidente che l'utilizzo di tale metodo richiede la conoscenza dei fenomeni fisici coinvolti e delle equazioni caratteristiche che li descrivono. L'utilizzo di questi modelli matematici non può comunque prescindere da una validazione sperimentale.

Nella Tabella 1.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche delle due metodologie descritte.

Metodi semi-empirici	CFD
■ Semplice implementazione ■ Basso costo computazionale ■ Rapida implementazione ■ Elevata conservatività (sovrastima del rischio) ■ Applicabilità limitata a situazioni predefinite	■ Maggiore accuratezza ■ Maggiore flessibilità (geometrie complesse ecc.) ■ Elevato costo computazionale ■ Conoscenza avanzata ■ Necessità di validazione

Tabella 1.1 – Principali caratteristiche dei metodi empirici e CFD a confronto

Si riportano di seguito i principali software utilizzati per la simulazione degli incidenti.

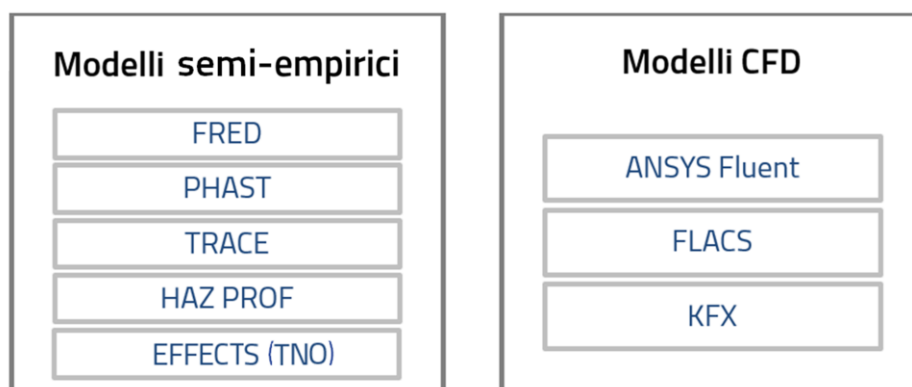


Tabella 1.2 – Principali strumenti per la simulazione di incidenti

In questo lavoro si utilizza l'approccio della fluidodinamica computazionale, pertanto si riportano le principali caratteristiche dei tool FLACS e KFX, che rappresentano lo standard industriale per l'analisi degli scenari incidentali. Riguardo ad ANSYS Fluent, strumento utilizzato nel presente lavoro, verranno forniti maggiori dettagli in seguito, nel paragrafo 2.2.2.

FLACS è un codice sviluppato da Gexcon US e rappresenta lo standard industriale per la modellazione CFD di esplosioni, validato per la modellazione di rilasci di sostanze tossiche e infiammabili. [13] Il suo utilizzo è esteso anche nel campo Oil&Gas e in crescita nell'industria nucleare, nonché in altri campi che coinvolgono la dispersione di polveri. [14] KFX è il principale strumento di simulazione di DNV GL, utilizzato per simulare incidenti che interessano la dispersione di materiali pericolosi, incendi ed esplosioni.

Entrambi questi strumenti si basano sull'utilizzo di un modello semi-empirico, il modello di Birch [15], ottenuto dall'analisi dei getti comprimibili attraverso la tecnica della gascromotografia. La definizione della geometria per la fase di dispersione è basata su un approccio di tipo PDR ("Porosity Distributed Resistance"), caratterizzato da un campo di porosità che varia in funzione della presenza di ostacoli, permettendo di modellare geometrie complesse come quelle in installazioni Oil&Gas o in siti industriali.

L'intero processo di implementazione di questi modelli è schematizzato in Figura 1.4.



Figura 1.4– Schema dell'approccio utilizzato da FLACS e KFX

2. METODOLOGIA E OBIETTIVI

Il capitolo offre una descrizione del fenomeno di rilascio incidentale di gas naturale e del metodo utilizzato per la sua modellazione, nonché un richiamo ai lavori precedentemente svolti nell'ambito del progetto. Vengono poi descritti gli obiettivi del presente studio, incentrato su un lavoro di affinamento del modello utilizzato per la simulazione dell'evento incidentale e sulla successiva ricerca di un riscontro con i dati sperimentali raccolti nelle prove realizzate nella galleria del vento SEASTAR.

2.1. STUDIO DEL RILASCIO

Il fenomeno oggetto di studio consiste in un rilascio accidentale di gas naturale ad alta pressione in una piattaforma off-shore di produzione di gas naturale. Definita sul modello delle strutture normalmente presenti nel Mar Adriatico, la piattaforma qui considerata è caratterizzata da una struttura emersa di tre piani: il piano intermedio è quello di produzione, su cui è incentrato lo studio del presente lavoro e di cui si offre una rappresentazione CAD semplificata in Figura 2.1.

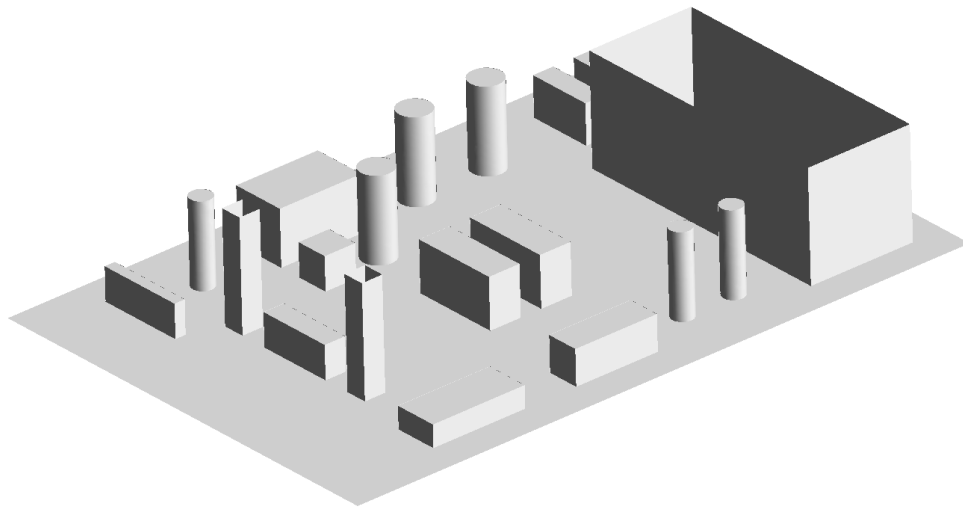


Figura 2.1 – Rappresentazione CAD del deck di produzione

Una importante caratteristica, che influenza molto il fenomeno di dispersione, è il tipo di pavimentazione, scelto sulla base delle più comuni e diffuse negli impianti di estrazione di Gas Naturale: le pareti inferiore e superiore sono modellizzate come muri impenetrabili dal gas. Tale tipo di pavimentazione, detto “*plated*”, è il più conveniente dal punto di vista della sicurezza, poiché la separazione dei vari piani consente di evitare la dispersione del gas negli altri piani in caso di rilascio incidentale.

Alla base di tali rilasci di gas possono esservi guasti, eventi esterni, oppure errori commessi nella progettazione dell'impianto o durante le operazioni di manutenzione.

I principali parametri che definiscono la tipologia di rilascio sono la pressione di rilascio, le dimensioni del punto di rottura, la presenza di ostacoli. Una classificazione delle possibili tipologie di rilascio è stata proposta da D. P. Nolan [16]:

- *Guasto catastrofico*, caratterizzato da un rilascio immediato da un serbatoio;
- *Rottura lunga*, causata dalla rimozione di una sezione di tubo, che porta alla formazione di due sorgenti di rilascio, ognuna delle quali con area pari alla sezione trasversale della tubazione;
- *Tubatura aperta*, caratterizzata dall'apertura totale della parte finale del tubo;
- *Rottura breve*, generalmente costituita da una apertura sul lato della tubatura;
- *Perdita*, generalmente localizzata in corrispondenza delle guarnizioni di valvole o pompe a causa dei danni indotti dai fenomeni di corrosione o da effetti di erosione;
- *Sfiati o scarichi* provenienti da tubi di piccolo diametro o valvole;
- *Rilasci operativi normali*, come quelli provenienti da valvole di sicurezza e tenute di serbatoi, o in genere causati da operazioni programmate e necessarie in fase di produzione.

La tipologia di rilascio a "rottura breve" è quella che meglio identifica il caso considerato.

Il getto turbolento uscente dalla rottura si caratterizza per la presenza di più regioni [17]:

- *Nearfield zone*, regione nelle immediate vicinanze del piano di uscita del getto, caratterizzato da forti effetti di comprimibilità; è costituito da due regioni, *core* e *mixing layer*. Il core è occupato dalla sostanza di rilascio, che può considerarsi isolata dal mezzo che costituisce l'ambiente esterno. Nel *mixing layer* invece avviene il contatto tra il gas e l'ambiente esterno e i fenomeni di turbolenza sono molto evidenti.
- *Transition zone*, caratterizzata da un miglior mescolamento tra i fluidi e da minime variazioni di pressione;
- *Farfield zone*, dove il getto è completamente espanso.

La comprimibilità del getto è stabilita sulla base del numero di Mach, definito come il rapporto tra la velocità di efflusso del gas e la velocità del suono. Di fatto, per valori del numero di Mach maggiori di 0,3 gli effetti di comprimibilità non possono essere trascurati. Questo avviene in prossimità del punto di rilascio; con il rallentamento del gas tali effetti diminuiscono, pertanto nella fase di dispersione del gas il fenomeno può essere considerato incomprimibile.

Per la modellizzazione dell'efflusso dal foro si utilizza il modello dell'ugello convergente, di cui si offre una rappresentazione schematica nella figura seguente.

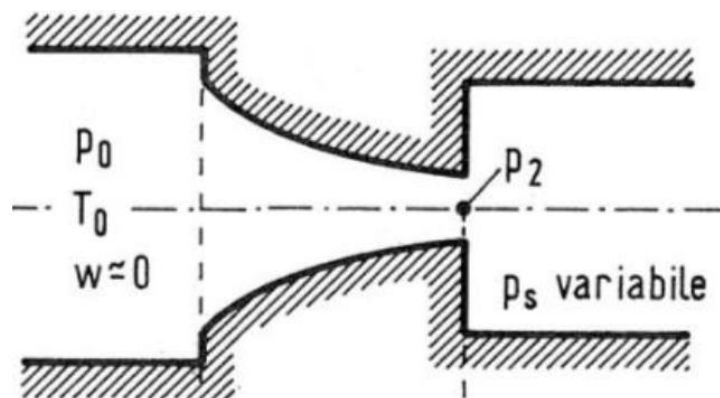


Figura 2.2 – Ugello convergente utilizzato per modellizzare l'efflusso

Nella Figura 2.2 p_0 indica la pressione di rilascio, p_s la pressione ambiente, mentre p_2 è la pressione di scarico, che si verifica in corrispondenza della sezione del foro.

Il tipo di efflusso può essere stabilito sulla base del rapporto tra la pressione ambiente e quella di rilascio, da confrontarsi con il “rapporto critico”, così definito:

$$R = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Per il gas metano il coefficiente di dilatazione adiabatica dei gas k è pari a circa 1,4. Pertanto, in questo caso il rapporto critico è all'incirca di 0,5.

Si parla di efflusso sonico se il rapporto tra la pressione ambiente e quella di rilascio risulta inferiore a R . Prendendo come riferimento una pressione di rilascio di 10 *bar*, si può concludere che l'efflusso è di tipo sonico.

Altra grandezza importante è la pressione di scarico: quando questa pressione è superiore alla pressione ambiente, il getto è di tipo sottoespanso. Ciò vuol dire che, una volta scaricato in ambiente, il getto sarà sottoposto ad ulteriore espansione. La struttura del getto sottoespanso nella “nearfield zone” dipende dal valore del “grado di sottoespansione” η_0 , definito come il rapporto tra la pressione di rilascio e la pressione ambiente. Per valori del grado di sottoespansione compresi tra 2 e 4, il getto è caratterizzato dalla classica struttura “a diamante”. Nel caso di getto altamente sottoespanso, cioè per $4.5 \leq \eta_0 \leq 7$, la struttura è di tipo a “botte” o “bottiglia”. Un getto estremamente sottoespanso, per $\eta_0 \geq 7$, è invece caratterizzato dalla presenza di un'unica cella di shock.

2.2. STUDIO DEGLI SCENARI INCIDENTALI

In questa sezione vengono espone le linee guida alla base della selezione degli scenari incidentali e, a seguire, l'approccio CFD utilizzato per la loro simulazione numerica.

Date le possibili configurazioni dei diversi scenari incidentali, risulta infatti necessario individuare un metodo per identificare un numero sufficiente di scenari di rilascio rappresentativi. Solitamente gli scenari di rilascio vengono studiati mediante simulazione fluidodinamica, i cui risultati vengono utilizzati per evidenziare i punti critici sulla piattaforma, quelli in cui la concentrazione di gas supera i limiti di infiammabilità inferiore.

Tuttavia, la complessità dell'apparato e la presenza di elevati gradienti di velocità e pressione propongono sfide modellistiche complesse, che potrebbero comportare problemi di convergenza o tempi di implementazione e calcolo lunghi. In questi casi, la pratica attuale è quella di limitare il numero di simulazioni a una serie molto piccola di scenari, con l'inconveniente di non rappresentare la reale varietà di condizioni accidentali. Il modello utilizzato per ovviare a tale problematica viene descritto nella sezione 2.2.2.

2.2.1. SELEZIONE DEGLI SCENARI

La costruzione degli scenari ha l'obiettivo di creare un insieme di eventi plausibili che sia il più esaustivo possibile. Il primo passo consiste nell'identificazione degli eventi iniziatori, tramite l'integrazione di studi pubblicati in letteratura e di rapporti di indagine sugli incidenti, nonché di informazioni statistiche. Una suddivisione degli eventi iniziatori è stata proposta da Sklet [18], che definisce sette categorie principali, inclusi eventi relativi a fattori umani ed eventi esterni. Nel lavoro di Vivalda & al. [19], finalizzato alla ricerca della disposizione ottimale di sensori da posizionare in piattaforma, si tengono in considerazione solo gli eventi relativi all'impianto e alla manutenzione, poiché abbastanza generici da rappresentare una grande varietà di installazioni e ubicazioni geografiche e al tempo stesso indipendenti dalle prestazioni del personale operativo. Si può quindi assumere che i seguenti eventi iniziatori possano produrre un set completo di scenari di rilascio: guasto latente introdotto durante la manutenzione, operazione di manutenzione del sistema di idrocarburi che richiede lo smontaggio, guasti tecnici / fisici ed errori di processo.

A partire dagli eventi iniziatori selezionati, vanno definiti i potenziali eventi di rilascio, tra i quali si identificano: malfunzionamento delle valvole durante il funzionamento manuale, malfunzionamento dei tubi temporanei, montaggio errato di flange o bulloni durante la manutenzione, valvole in posizione errata dopo la manutenzione, installazione errata del dispositivo di tenuta, guasto del sistema di isolamento durante la manutenzione, degrado della tenuta della valvola, deterioramento della guarnizione della flangia, perdita del tensionamento del bullone, danneggiamento del tubo saldato, corrosione interna, corrosione esterna, erosione e sovrappressione. [19]

A ciascun evento si associa un range di frequenza di accadimento sui deck della piattaforma, da studiarsi sulla base di informazioni statistiche e provenienti dalla letteratura e del confronto con gli esperti.

Nella ricerca degli scenari più rappresentativi, in [19] vengono posti criteri generali per la costruzione dello spazio degli scenari:

- dovrebbe essere selezionato almeno uno scenario per ogni evento rilevante di rilascio potenziale;
- quegli eventi di rilascio che hanno una frequenza di occorrenza più elevata dovrebbero essere coperti da un numero maggiore di scenari;
- quegli eventi di rilascio situati in aree in cui l'influenza di fattori esterni come la direzione del vento e la velocità e / o la temperatura sono elevate, dovrebbero essere coperti da un numero maggiore di scenari.

Il numero di scenari da analizzare dipende anche dal tipo e dalla geometria della piattaforma in esame. Si comprende come lo sviluppo degli scenari sia quindi influenzato da una serie di fattori, tra i quali le condizioni meteorologiche, in particolar modo la temperatura atmosferica, la direzione e l'intensità del vento. È noto che questi fattori possono variare durante il giorno e le stagioni in intervalli abbastanza ampi, pertanto la costruzione di una serie rappresentativa di scenari dovrebbe tener conto di questi cambiamenti. Anche la portata di gas e la direzione del rilascio sono fattori determinanti.

Va sottolineato che i criteri qui riportati, pur essendo validi in quanto di carattere generale, sono in realtà tratti da uno studio avente l'obiettivo di identificare la configurazione ottimale dei sensori in termini di sicurezza e costi. Si tratta di finalità differenti da quelle perseguite nel presente lavoro di tesi: ponendosi l'obiettivo di validare il modello utilizzato, questo lavoro si limita all'analisi di casi specifici, considerati i più rappresentativi e i più indicati nella riproduzione sperimentale sul modello in scala.

Viene quindi offerta una panoramica delle condizioni selezionate per lo studio dei rilasci incidentali, di cui sarà fornita una descrizione più dettagliata nelle sezioni 3.1 e 3.2:

- l'intensità del vento che investe la piattaforma è stata scelta pari a 6 m/s , sulla base delle condizioni più frequenti nelle stazioni meteorologiche prossime alla località di riferimento; inoltre, con lo scopo di comprendere l'incidenza dell'intensità del vento sulla dispersione della nube è stato preso in analisi un solo caso studio ad una velocità raddoppiata;
- due diverse direzioni del vento (una frontale ad un lato della piattaforma, l'altra con un'angolazione di 45° rispetto alla stessa) sono state scelte con il fine di porsi nella situazione più conservativa possibile, in modo cioè che la distribuzione della nube di gas fosse rilevabile su tutta la piattaforma.
- il foro da cui ha origine il rilascio ha diametro pari a 3 cm ;
- ad una distanza di 30 cm dal foro di rilascio è presente un ostacolo cilindrico con diametro pari a 20 cm ;
- sono analizzati rilasci a tre diverse pressioni: 30 bar , 40 bar , 50 bar ;
- sono state selezionate cinque diverse posizioni del rilascio (descritte nel capitolo 3.2), considerate le più rappresentative per via della maggiore esposizione al vento che rende lo sviluppo della nube rilevabile in tutta la piattaforma.

Sulla base di tali parametri, sono stati definiti 17 diversi casi studio, descritti nel dettaglio nella sezione 3.2.

2.2.2. SIMULAZIONE NUMERICA DEGLI SCENARI

Per poter ovviare alle possibili limitazioni della CFD, quali i già citati problemi di convergenza o tempi di implementazione e calcolo lunghi, nella simulazione del fenomeno incidentale si è utilizzato un approccio innovativo chiamato "SBAM" (acronimo di "Source Box Accident Model"): il fenomeno viene separato in due fasi distinte e modellato utilizzando due metodi diversi, sulla base delle differenze fisiche che si verificano nello sviluppo del fenomeno. Infatti, la fase di rilascio si caratterizza per la presenza di forti fenomeni di compressibilità che comportano l'adozione di ipotesi fisiche e numeriche non necessarie per la seconda fase, in cui il fluido può considerarsi incomprimibile. [20] Le principali differenze delle due fasi trattate sono messe in evidenza nella tabella seguente.

	RILASCIO	DISPERSIONE
Velocità	100 ÷ 1000 [m/s]	1 ÷ 10 [m/s]
Forze predominanti	Inerziali	Vento e galleggiamento
Tipologia di moto	Comprimibile	Incomprimibile

Tabella 2.1 – Principali caratteristiche delle fasi di rilascio e dispersione

La fase di rilascio include l'interazione tra il gas e l'ostacolo presente nelle vicinanze, costituito ad esempio da una tubazione adiacente a quella in cui avviene il rilascio. La figura che segue rappresenta il fenomeno in oggetto:

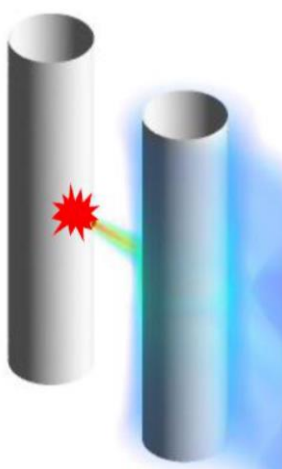


Figura 2.3 – Interazione getto – ostacolo, [21]

La fase di rilascio è modellata in un dominio di forma cubica chiamato "Source Box", che consente di eseguire valutazioni CFD in modo più sostenibile dal punto di vista computazionale, poiché viene simulato un solo macro-fenomeno. La simulazione CFD del rilascio terrà debitamente conto delle interazioni del getto con le superfici di ostacoli presenti nelle vicinanze del rilascio.

La lunghezza caratteristica del dominio L_{SB} è pari alla distanza necessaria affinché gli effetti di comprimibilità si possano considerare trascurabili. Secondo alcuni autori, tra cui [22], la distanza risulta pari a dieci volte quella in cui si sviluppa il primo disco di Mach:

$$L_{SB} = 10 \cdot 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{p_{rilascio}}$$

La Figura 2.4 mostra il punto di rilascio sulla pipeline in questione, con la Source Box in trasparenza.

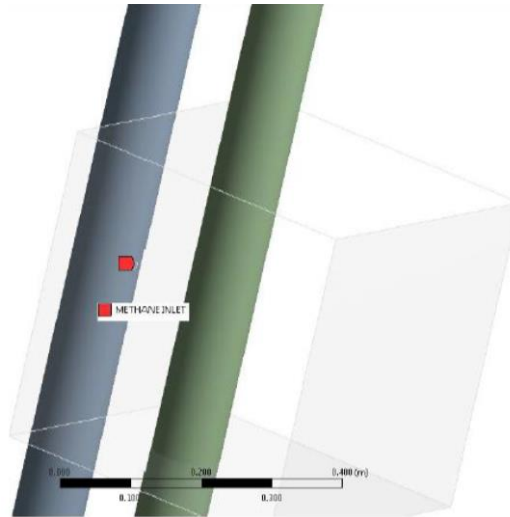


Figura 2.4 – Punto di rilascio e Source Box, [21]

Come già anticipato nella sezione precedente, il getto di gas può essere simulato attraverso l'introduzione di un ugello convergente. Si tratta di un componente fittizio che consente di riprodurre in modo più accurato l'effetto della rottura. Pertanto, anche l'ugello rientra nella modellizzazione della Source Box.

Data la simmetria della geometria, lo studio effettivo del rilascio avviene su un quarto del dominio totale, così come mostrato in Figura 2.5.

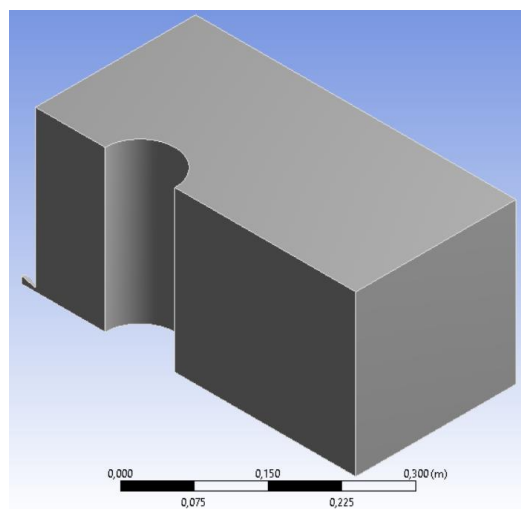


Figura 2.5 – Dominio della fase di rilascio, corrispondente ad un quarto di Source Box

I risultati della simulazione, nello specifico il profilo molare del gas e il campo di flusso calcolati sulla superficie della Source Box, fungono da input per lo studio della fase di “dispersione”, dove viene modellata la propagazione della nube all’interno della struttura della piattaforma. La Figura 2.6 riassume in uno schema il metodo alla base dell’approccio SBAM. Per essere conservativi, si presume che la fase di rilascio e la seguente dispersione siano continuamente alimentate dalla perdita di gas attraverso la rottura in una condizione di flusso in stato stazionario. Dopo l’iniziale accelerazione del gas fino alla condizione sonica e poi supersonica, il rilascio viene rallentato nello spazio fino a una velocità paragonabile alla velocità del vento, quando inizia la fase di dispersione.

Le differenze fisiche delle due fasi si riflettono in una diversa impostazione dei parametri tecnici della simulazione.

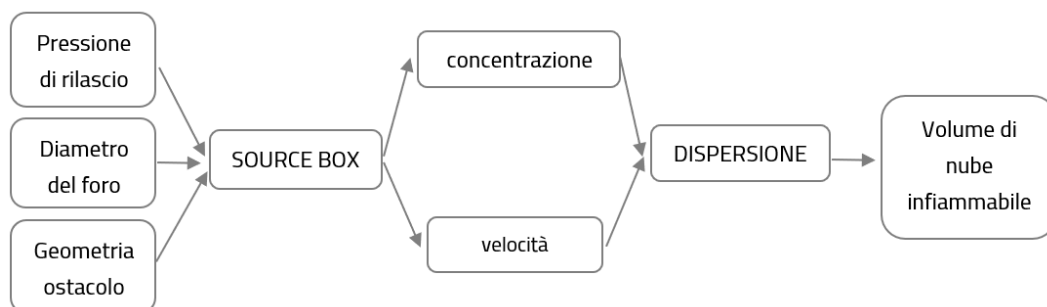


Figura 2.6 – Schema dell’approccio SBAM

Tale modello consente di mantenere un’accuratezza accettabile riducendo notevolmente l’onere computazionale della modellazione classica. Il vantaggio principale apportato da questo approccio consiste nella possibilità di creare una libreria di Source-Box rappresentative degli scenari di rilascio più credibili, mentre le simulazioni CFD degli scenari trarrebbero beneficio dall’importazione di dati di input da questa libreria per affrontare solo la fase di dispersione. Questo approccio conduce ad un notevole risparmio del tempo di calcolo, consentendo all’analista di affrontare un numero maggiore di simulazioni di rilascio / dispersione sul layout specificato.

È importante sottolineare che tutte le simulazioni sono state effettuate trattando il problema della dispersione in regime stazionario, per ragioni legate sia al tipo di fenomeno in analisi, sia agli obiettivi che questo studio si pone. Infatti, risulta piuttosto probabile che il flusso uscente da una rottura in una pipeline ad alta pressione sia continuo e tale quindi da comportare il raggiungimento di una conformazione stabile della nube. D’altra parte, ai fini della valutazione del rischio interessa non tanto l’evoluzione della nube durante il transitorio, quanto la definizione dei volumi di infiammabilità coinvolti. Come ultima considerazione, occorre evidenziare che, viste le dimensioni del dominio, il costo computazionale della simulazione in transitorio sarebbe stato insostenibile.

Il software utilizzato per effettuare le varie simulazioni è ANSYS Fluent, strumento molto diffuso tanto in ambito industriale quanto in quello accademico. Esso risulta appropriato per lo studio del caso in analisi, per via della possibilità di implementare diversi modelli fisici di turbolenza per flussi stazionari o transitori, comprimibili o incompressibili,

contemplando inoltre la possibilità di svolgere calcoli in parallelo. Gli strumenti di CAD (“Design Modeler”) e meshatura (“ANSYS Meshing”) utilizzati sono quelli integrati nell’ambiente di ANSYS Workbench. Lo strumento di post-processing integrato consente inoltre di analizzare velocemente i risultati e di creare grafici 2D e 3D con le grandezze di interesse.

Attingendo alle conclusioni del lavoro di tesi di F. Pappalardo [23], è interessante citare alcune delle differenze principali tra il modello SBAM, che utilizza il software ANSYS Fluent, e dei due codici CFD industriali FLACS e KFX. Una sintesi è offerta nella Figura 2.7.

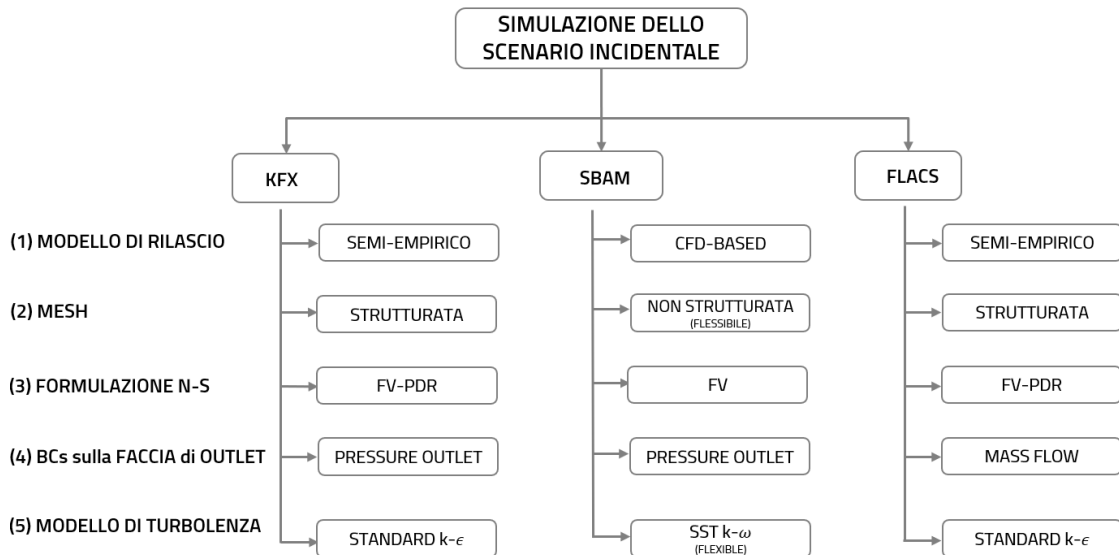


Figura 2.7 – Schema dei tre approcci CFD a confronto

Si osserva che se in FLACS e KFX è possibile creare solo mesh di tipo strutturato, in ANSYS Fluent (modello SBAM) è stata definita una griglia tetraedrica per entrambe le simulazioni di rilascio e dispersione: ne risulta una simulazione meno dispendiosa grazie alla possibilità di ottenere una distribuzione più efficiente delle celle e una qualità migliore in termini di “skewness”.

I risultati ottenuti nel lavoro di F. Pappalardo hanno mostrato che la rappresentazione dell’interazione tra il flusso e l’ostacolo dell’approccio PDR è poco accurata, per via dell’assenza dello strato limite, questione che può ripercuotersi sulla modellazione della separazione del flusso che impatta contro l’oggetto. In sintesi, l’approccio PDR, pur essendo caratterizzato da un costo computazionale più basso e da una maggiore compattezza dei dati (legata alla presenza di una *mesh* strutturata), non permette una semplice rappresentazione delle geometrie curve nella simulazione, né consente di descrivere gli effetti di comprimibilità: la rigidità dell’implementazione si riflette di fatto in una scarsa accuratezza nelle simulazioni degli spazi stretti. Al contrario, il modello SBAM consente di ottenere risultati più realistici nel caso di spazi congestionati e di descrivere accuratamente gli effetti di comprimibilità, grazie anche alla sua maggiore flessibilità di implementazione. Tuttavia, la maggiore accuratezza conseguibile comporta anche un costo computazionale più elevato. Per ulteriori dettagli sulla scelta del caso studio e dei parametri rappresentativi, nonché dei risultati conseguiti, si rimanda a [23].

2.3. RICHIAMO AI LAVORI PRECEDENTI

All'interno del lavoro di ricerca del SEADOG, nel 2015 Pederiva e Guasco [24]-[25] hanno studiato la dispersione dell'impatto di un getto turbolento rispettivamente su un cilindro e una lastra. Hanno sottolineato i vantaggi e gli svantaggi dei modelli di dispersione attualmente utilizzati, che non riescono a rappresentare la complessità della geometria di una piattaforma offshore. Studiando la possibilità di risolvere questo problema con metodi CFD, hanno affrontato il problema dell'alto costo computazionale richiesto dalla simulazione fluidodinamica del problema, introducendo per primi la proposta di sdoppiare il fenomeno e la definizione di una Source Box.

Successivamente, la tesi di T. Corti [26] si è focalizzata sulla definizione del dominio della Source Box, con la scelta di spostare il foro del rilascio all'estremità della Source Box, in modo da ottenere una riduzione del dominio e del tempo computazionale; il lavoro si è incentrato anche sulla ricerca del modello che meglio rappresenta il fenomeno di rilascio. La scelta è ricaduta sullo stesso modello ibrido già annoverato come ottimale da Guasco e Pederiva, il $k-\omega$ SST, che consente di sfruttare i vantaggi del modello $k-\epsilon$ in zone lontane dall'ostacolo e il $k-\omega$ in vicinanza dello stesso. In tale lavoro si è inoltre condotto uno studio sulle variabili che hanno influenza sul getto, restringendo il campo su quattro parametri fondamentali: la pressione di rilascio, la direzione del getto, il diametro di rottura e il rapporto tra le dimensioni dell'ostacolo e la distanza dalla sorgente.

A seguire, il lavoro di C. Rupolo [21] ha permesso di ottenere un miglioramento significativo nella riproduzione della caratteristica struttura del getto sottoespanso, attraverso l'introduzione di un ugello convergente in grado di modellizzare in modo ottimale il rilascio dal foro, aspetto fino ad allora trascurato.

A proseguimento dello studio di T. Corti, G. Ledda [27] ha focalizzato il suo lavoro di tesi su un'analisi dei parametri di influenza sulla velocità e sulla frazione massica di CH_4 estrapolati sulle facce della Source Box, riducendo al minimo il numero di casi studio, con l'obiettivo di ottenere un modello il più possibile adatto a diverse situazioni. Tale studio ha evidenziato la presenza di una correlazione tra la dimensione dell'ostacolo e le grandezze in uscita dalla Source Box e ha dimostrato la quasi totale ininfluenza della distanza tra foro e ostacolo sui risultati dell'analisi della Source Box. L'importanza di quest'ultimo risultato sta nella possibilità di evitare lo studio di più simulazioni con l'ostacolo posto a distanze diverse.

La ricerca di un metodo per accoppiare le due fasi dell'approccio "SBAM" è stata invece al centro del lavoro di A. Moscatello [28], che ha definito come utilizzare i risultati estrapolati dalle facce della Source Box come input per la seconda fase. Provando ad implementare una simulazione comprensiva dell'intero evento ("one-step"), Moscatello ha anche dimostrato come un approccio CFD classico sia difficilmente applicabile a un caso studio come questo, ponendone in evidenza le criticità legate principalmente al costo computazionale.

Inoltre, come già commentato precedentemente, il lavoro di F. Pappalardo [23] ha consentito di ottenere un confronto tra il modello SBAM e i due software specifici

attualmente presenti sul mercato, fornendo una più approfondita descrizione dei punti di forza e degli inconvenienti di ognuno.

2.4. OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO

A continuazione dei precedenti lavori, il presente studio si pone l'obiettivo di migliorare alcuni aspetti del modello SBAM descritto nella sezione 2.2.2, con il fine ultimo di validarlo e dimostrarne l'effettiva capacità di descrivere il fenomeno incidentale del rilascio supersonico di gas. Questo lo renderebbe di fatto un ottimo strumento a disposizione dell'analisi di rischio, in grado di contribuire a dare una risposta alla normativa vigente in termini di prevenzione e sicurezza.

Il primo aspetto da curare è senza dubbio la scelta del modello di turbolenza per la simulazione della fase di dispersione della nube in piattaforma. I modelli di turbolenza, da cui dipendono la correttezza e l'accuratezza della soluzione, propongono equazioni per la predizione di velocità media nel tempo, pressione e campi di temperatura, senza calcolare l'andamento completo del flusso turbolento in funzione del tempo. La scelta del modello di turbolenza dipende da considerazioni quali la fisica del flusso studiato, il livello di precisione richiesto, le risorse computazionali disponibili e la quantità di tempo disponibile per la simulazione. L'indagine sarà qui ristretta ai soli modelli RANS a due equazioni.

Il secondo obiettivo perseguito è la ricerca delle condizioni al contorno più adeguate da imporre per studiare accuratamente il campo di moto del vento, che ha una forte influenza sulla dispersione della nube di metano. Imporre ad esempio una velocità più elevata di quella effettivamente presente all'ingresso in piattaforma potrebbe portare ad una sottostima importante della nube d'inflammabilità. Supponendo di considerare una velocità del vento uniforme di intensità pari a quella attesa in mare aperto, non sarebbe corretto imporre come condizione al contorno all'ingresso del deck un tale andamento, poiché la presenza della piattaforma perturba di fatto il campo di moto del vento a monte della stessa, facendo sì che venga meno l'uniformità del vento in quella zona. Sulla base di queste considerazioni, si comprende la necessità di effettuare uno studio rivolto al solo campo di moto del vento.

Queste operazioni preliminari sono di fondamentale importanza per poter ottenere un modello in grado di dare risultati attendibili. Ed è proprio per verificare l'affidabilità del modello che questo lavoro di tesi si pone l'obiettivo ultimo di validarlo attraverso un confronto tra i risultati previsti dalla modellazione CFD e quelli misurati sulla piattaforma in scala. La procedura di validazione, che consente quindi di stimare l'accuratezza della modellazione fisica della simulazione, passa attraverso il confronto tra i dati ottenuti numericamente dall'implementazione del modello e i risultati delle prove sperimentali raccolti dagli esperimenti in galleria del vento. Per la sua realizzazione è stato predisposto un modello in scala della piattaforma in cui ricreare condizioni di similitudine fluidodinamica con il caso reale all'interno della galleria del vento SEASTAR-WT, realizzata presso l'Environment Park di Torino. Una descrizione più dettagliata verrà fornita nel capitolo 5.

Questa procedura è di fondamentale importanza, dal momento che le simulazioni CFD richiedono un'attenta valutazione dell'accuratezza e affidabilità dei risultati ottenuti: le procedure di verifica e validazione (V&V) consentono infatti di aumentare la credibilità delle simulazioni in diversi ambiti ad alto rischio, in cui la qualità della soluzione è essenziale per garantire la sicurezza.

Va comunque puntualizzato che tanto le simulazioni CFD quanto le prove sperimentali possono presentare diverse fonti di errore. Per quanto riguarda la simulazione fluidodinamica, ne sono un esempio l'implementazione numerica delle equazioni di governo nello spazio di discretizzazione, il perfezionamento della griglia, i problemi di convergenza, nonché la mancanza di accuratezza dei modelli fisici implementati nei codici. Ciò è particolarmente vero per i modelli di turbolenza utilizzati nel CFD per la previsione di comportamenti di strati limite instabili (laminari, transitori e turbolenti) e regioni di flusso separate e/o vorticosi. Per quanto riguarda gli esperimenti, gli errori sono classificabili in due categorie: da un lato gli errori risultanti dallo strumento e il metodo di misurazione, dall'altro gli errori sistematici, più difficili da valutare. Gli errori tipici che sono generalmente quantificati riguardano, ad esempio, i fattori geometrici del modello, gli effetti dell'interferenza di parete dovuta alla rugosità superficiale, la definizione adeguata e completa delle condizioni di flusso, la definizione delle condizioni al contorno. Sarebbe comunque buona norma fornire margini di incertezza per consentire di ottenere conclusioni significative sul modello fisico in analisi.

2.5. PROCEDURE DI SCALATURA

Per la validazione sperimentale del modello precedentemente introdotto è stata progettata una piattaforma in scala 1:10 rispetto alle reali dimensioni, alla quale si farà riferimento con il termine "Mock-Up" (visibile in Figura 2.8), posizionata all'interno di una galleria del vento progettata per ricreare condizioni di vento simili a quelle presenti nel Mar Adriatico. Le motivazioni dell'utilizzo di un modello in scala risiedono nel fatto che un esperimento in scala reale risulterebbe impossibile da realizzare a causa delle dimensioni, del costo, ma anche di limiti dettati dalla sicurezza, viste le quantità notevoli di gas coinvolte nel rilascio.



Figura 2.8 – Mock-Up: modello in scala 1:10 della piattaforma reale

La procedura di scalatura dei parametri, da quelli geometrici a quelli relativi al flusso e alla pressione di rilascio, è stata ricavata da un lavoro di A. Moscatello & al. [29], di cui vengono di seguito esposti in maniera sintetica i punti utili alla comprensione del presente lavoro.

I sistemi funzionali e le procedure di scala utilizzate sono state sintetizzate nella Tabella 2.2.

Elementi	Sistemi	Procedura di scalatura
Un oggetto per rappresentare il dominio reale (piattaforma offshore)	Mock-Up	Geometria
Un ambiente per riprodurre le condizioni atmosferiche del vento	Galleria del vento	Velocità del vento
Un sistema per realizzare il rilascio del gas	Linea di fornitura del gas	Parametri di rilascio

Tabella 2.2 – Sintesi dei sistemi coinvolti e delle procedure di scala utilizzate

È importante osservare che la scalatura del vento dipende solo dalla scalatura geometrica, mentre la scalatura del rilascio dipende sia da quella geometrica che da quella del vento.

Scalatura geometrica

Per quanto concerne il fattore di scala geometrico, è bene sottolineare che le dimensioni del modello in scala, pari a 1/10 delle dimensioni reali, sono state scelte sulla base della compatibilità con le dimensioni della galleria del vento in cui viene realizzato il test, nel tentativo di evitare ogni tipo di interferenza relativa alla crescita dello strato limite sulle pareti della galleria del vento.

Scalatura del vento

Riguardo alla scalatura del vento, il fattore di scala è così definito:

$$S_c = \frac{l}{L} = \frac{h}{H} = \frac{z_0}{Z_0}$$

dove le minuscole si riferiscono alle grandezze in scala ridotta e le maiuscole a quelle in scala reale. In particolare, l e L sono le lunghezze di scala, h e H le altezze, z_0 e Z_0 i fattori di rugosità.

Il rapporto tra le velocità può essere espresso, sulla base di quanto proposto da Xing & al. [30] come:

$$\frac{u}{U} = S_c^{0.5}$$

Per tenere conto della maggiore velocità che si incontra sullo strato limite reale in [31] è stata proposta la relazione che segue, in cui la velocità sul modello ad una certa distanza è aumentata considerando la velocità sul modello ad una maggiore distanza H :

$$\frac{u_H}{U_H} = S_c^{0.5} \left(1 - \frac{\ln(S_c)}{\ln\left(\frac{H}{Z_0}\right)} \right)$$

Nel caso studio in analisi il rapporto tra le velocità risulta pari a 0,4615. Pertanto, poiché si considera che il vento incida sulla piattaforma alla velocità di 6 m/s (sulla base delle condizioni meteorologiche medie della località di riferimento), la velocità in scala ridotta da riprodurre in galleria del vento risulterebbe pari a 2,77 m/s.

Scalatura del rilascio

Le complessità maggiori sorgono nella definizione della scalatura per il fenomeno di rilascio, i cui parametri caratteristici sono il tipo di gas, il diametro del foro di rilascio d e la pressione di rilascio p_0 . Questi ultimi due parametri sono rappresentati in Figura 2.9 tanto per il caso reale quanto per il modello in scala ridotta.

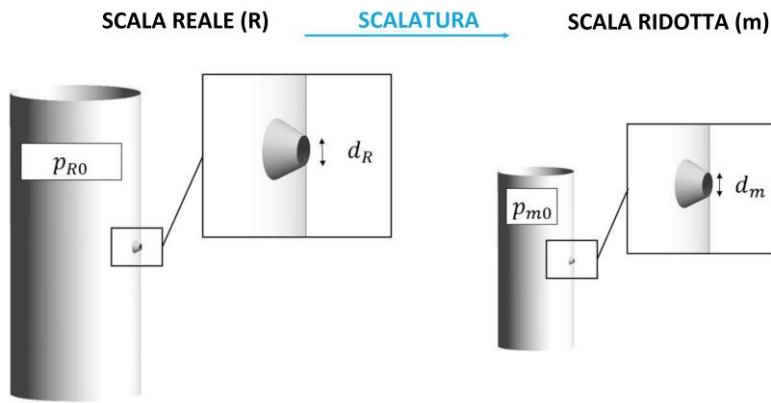


Figura 2.9 – Sezione di uscita del rilascio nel modello reale e nel modello in scala

La scalatura del diametro del foro risponde alle regole della scalatura geometrica. La stessa considerazione è valida per la posizione del punto di rilascio, mentre la direzione del rilascio rimane di fatto invariata. Riguardo al tipo di gas usato, la questione risulta invece più complessa poiché per motivi di sicurezza il gas utilizzato nella riproduzione in scala dell'evento incidentale non è gas naturale, bensì una miscela di aria e CH₄ al 2,2% in volume. Per poter definire la pressione di rilascio nel modello in scala tenendo conto tanto del diverso tipo di gas quanto della scalatura geometrica, in [31] è stata proposta una relazione in grado di legare le grandezze nel caso reale e nel modello in scala. La relazione in oggetto è riportata di seguito, facendo ricorso all'uso del pedice R o della maiuscola per riferirsi al caso reale e del pedice m o della minuscola per il modello in scala ridotta:

$$\frac{M_f}{U_H^2 L^2} = \frac{m_f}{u_H^2 l^2}$$

essendo $M_f = W^2 A \frac{\rho_{g,R}}{\rho_a}$ e $m_f = w^2 a \frac{\rho_{g,m}}{\rho_a}$.

Nelle relazioni precedenti W e w sono le velocità di rilascio, A e a le aree del foro, $\frac{\rho_{g,R}}{\rho_a}$ e $\frac{\rho_{g,m}}{\rho_a}$ le densità relative.

Definendo con T_{R0} la temperatura di rilascio e con $R_{cr,R}$ il rapporto critico per il caso reale, calcolato come $\left(\frac{2}{\gamma_R+1}\right)^{\frac{\gamma_R}{\gamma_R-1}}$, la pressione e la velocità di uscita dal foro possono essere così calcolati:

$$p_{R,exit} = R_{cr,R} \cdot p_{R0}$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_R \cdot R_R \cdot T_{R0}}{\gamma_R + 1}}$$

La densità all'uscita del foro è calcolabile utilizzando la legge dei gas ideali. Si riporta ad esempio quella utilizzata per il caso in scala reale:

$$\rho_{g,R} = \frac{p_{R,exit}}{R_R \cdot T_{R,exit}} = \frac{R_{cr,R} \cdot p_{R0}}{R_R \cdot T_{R,exit}}$$

Si suppone che temperatura di rilascio raggiunta nel caso sperimentale (in scala ridotta) sia la stessa del caso reale: $T_{R0} = T_{m0} = 300$ K. Di conseguenza, essendo $T_{R,exit} \approx T_{R0}$ e $T_{m,exit} \approx T_{m0}$, risulta che $T_{R,exit} \approx T_{m,exit}$.

Esplicitando tutti i fattori sopra esposti la relazione proposta da [31] diventa quindi:

$$\frac{d_m^2 \cdot P_{m0}}{d_R^2 \cdot P_{R0}} = \frac{2 \cdot \gamma_R \cdot (\gamma_m + 1) \cdot R_{cr,R}}{2 \cdot \gamma_m \cdot (\gamma_R + 1) \cdot R_{cr,m}} \cdot \left(\frac{U_H}{u_H}\right)^2 \cdot (S_c)^2$$

È opportuno sottolineare che questa relazione, specifica per fori di rilascio circolari, è valida per i soli getti altamente sottoespansi, per i quali il rapporto tra la pressione di rilascio e quella dell'ambiente di scarico risulta maggiore di 7. L'utilizzo di tale formula è funzionale alla definizione della pressione di rilascio del modello P_{m0} , a partire dalla pressione P_{R0} .

3. CASI STUDIO ANALIZZATI

3.1. CARATTERISTICHE DELLA SOURCE BOX

Come si è già commentato nella sezione 2.2.2, lo studio del rilascio avviene tramite la definizione di un dominio, detto Source Box, in grado di contenere gli effetti di comprimibilità che caratterizzano l'espansione del rilascio supersonico. Data la necessità di riprodurre sul Mock-Up condizioni analoghe a quelle simulate, la scelta delle pressioni di rilascio e dei parametri geometrici, quali le dimensioni del foro e dell'ostacolo, è stata vincolata a questioni di tipo pratico. È stato infatti fondamentale tener conto non solo degli ugelli e degli ostacoli a disposizione per le prove sperimentali, ma anche degli effetti che tali scelte avrebbero sull'efflusso di gas. Ad esempio, la scelta di un ugello troppo piccolo comporterebbe il coinvolgimento di una portata molto bassa, non funzionale a comprendere la diffusione del gas in piattaforma; inoltre, i sensori di concentrazione potrebbero non essere adatti alla rilevazione di concentrazioni di gas troppo basse che deriverebbero da un tale rilascio. Anche la scelta del caso opposto risulta sconsigliata: un ugello di dimensioni troppo grandi comporterebbe la dispersione di notevoli quantità di gas in ciascuna prova, con l'effetto di ridurre notevolmente il numero di prove realizzabili, per via della quantità di gas a disposizione per la sperimentazione. Gli ugelli a disposizione del set-up sperimentale, la cui descrizione è fornita nel capitolo 5.2, hanno diametri di 1 mm, 3 mm e 5 mm. La scelta è quindi ricaduta su un ugello di 3 mm, che corrisponde ad un foro di diametro 3 cm nel caso reale, sulla base delle considerazioni dettate dallo "scaling" geometrico. L'ostacolo scelto è di tipo cilindrico e con diametro di 20 cm, anche questo scelto sulla base della presenza nel set-up sperimentale di un corrispettivo ostacolo del diametro di 2 cm.

La Tabella 3.1 riassume le principali caratteristiche della "Source Box" (caso reale) utilizzata in tutti i casi presi in analisi.

Forma SB	Cubica
Lato SB	138 cm
Diametro foro d_e	3 cm
Forma dell'ostacolo	Cilindrica
Diametro dell'ostacolo D_{cyl}	20 cm
Distanza tra punto di rilascio e centro dell'ostacolo l	30 cm

Tabella 3.1 – Parametri geometrici di definizione della Source Box (SB)

Una rappresentazione della Source Box e delle dimensioni sopra citate è visibile in Figura 3.1.

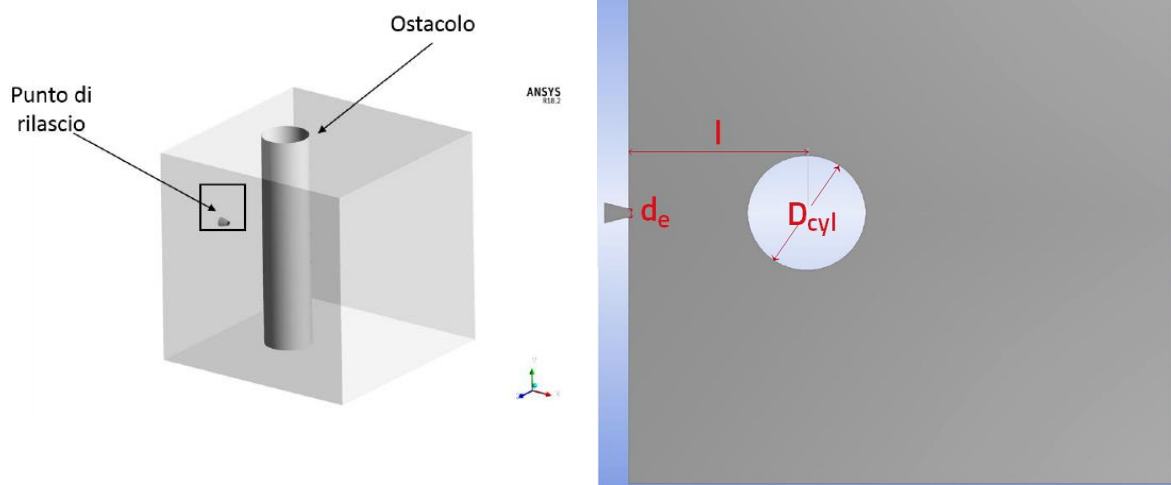


Figura 3.1 – Rappresentazione della Source Box: vista in 3D a sinistra, vista dall'alto a destra

Nelle diverse prove sono state prese in analisi tre diverse pressioni di rilascio: 30 *bar*, 40 *bar* e 50 *bar*. Sebbene in linea teorica le dimensioni della Source Box, per come è stata definita, debbano variare in funzione della pressione di rilascio, per ragioni di tipo pratico si è scelto di fissare le dimensioni della Source Box per le simulazioni CFD di rilascio, anche in virtù del fatto che le tre pressioni scelte non portano a variazioni sostanziali delle dimensioni teoriche. Queste sono infatti pari a 1,06 *m* per il rilascio a 30 *bar*, 1,22 *m* per quello a 40 *bar*, 1,38 *m* per quello a 50 *bar*.

Il lato del cubo costituente la Source Box è stato quindi fissato a 1,38 *m*, pari a 10 volte la distanza dalla formazione del primo disco di Mach per il caso a pressione maggiore (50 *bar*). Questa dimensione assicura per tutti i casi trattati l'esaurimento dei fenomeni di comprimibilità all'interno del dominio.

3.2. POSIZIONI DI RILASCIO

Il presente lavoro di tesi è stato incentrato sull'analisi di rilasci in cinque posizioni specifiche, scelte in base alla maggiore rappresentabilità del fenomeno oggetto di studio. Dal momento che per ciascuna di queste posizioni lo sviluppo della nube dovuto alla maggiore esposizione al vento è rilevabile in tutta la piattaforma, questi casi rappresentano i più conservativi e degni di nota. Per ciascuna di queste posizioni (indicate di seguito con i numeri 1, 2, 3, 4 e 5) si riportano nella Tabella 3.2 le coordinate di posizionamento della Source Box, il tipo di vento analizzato e le pressioni di rilascio studiate in ciascun caso, essendo $P_a = 30 \text{ bar}$, $P_b = 40 \text{ bar}$, $P_c = 50 \text{ bar}$. Il sistema di riferimento scelto per lo studio ha l'origine degli assi al centro della piattaforma, sulla base del deck e l'orientazione è quella mostrata in Figura 3.2. La Tabella 3.3 fornisce una descrizione più accurata delle caratteristiche del vento preso in analisi nei diversi casi studio.

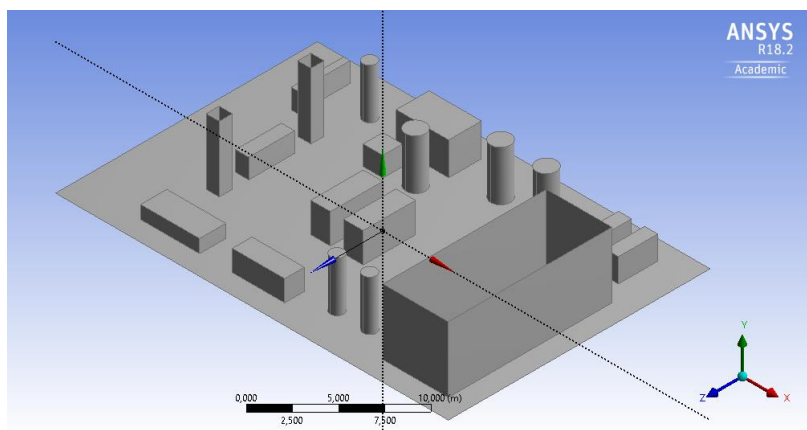


Figura 3.2 – Sistema di riferimento delle simulazioni CFD

Posizione SB	Coordinate punto di rilascio			Vento	Rilascio	
	x [m]	y [m]	z [m]		Direzione	Pressione
1	-12,23	1,5	7	Vento 6 m/s a 45°	$\vec{x}$	P _a
						P _b
						P _c
2	-4,7	2,5	0	Vento 6 m/s a 45°	$\vec{x}$	P _a
				Vento 6 m/s a 45°		P _b
						P _c
				Vento 6 m/s a 0°	$\vec{x}$	P _a
				Vento 6 m/s a 0°		P _c
3	-11,7	2,5	0	Vento 6 m/s a 0°	$\vec{x}$	P _a
						P _b
						P _c
4	-4	2,5	8	Vento 6 m/s a 45°	$-\vec{z}$	P _a
						P _c
5	-4	1,5	8	Vento 6 m/s a 45°	$-\vec{z}$	P _a
				Vento 6 m/s a 45°		P _b
						P _c
				Vento 12 m/s a 45°	$-\vec{z}$	P _a

Tabella 3.2 – Riepilogo dei casi studio analizzati

	Direzione	Intensità [m/s]
Vento 6 m/s a 45°	$\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\vec{x} - \vec{z})$	6
Vento 6 m/s a 0°	$\vec{x}$	6
Vento 12 m/s a 45°	$\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\vec{x} - \vec{z})$	12

Tabella 3.3 – Caratteristiche dei venti studiati

Le posizioni in pianta delle Source Box nei diversi casi studio sono rappresentate nelle figure seguenti, dove sono anche evidenziate le direzioni del vento e del rilascio.

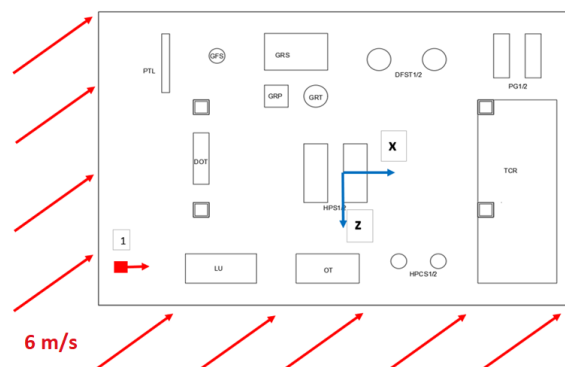


Figura 3.3 – Posizione 1, Vento 6 m/s a 45°

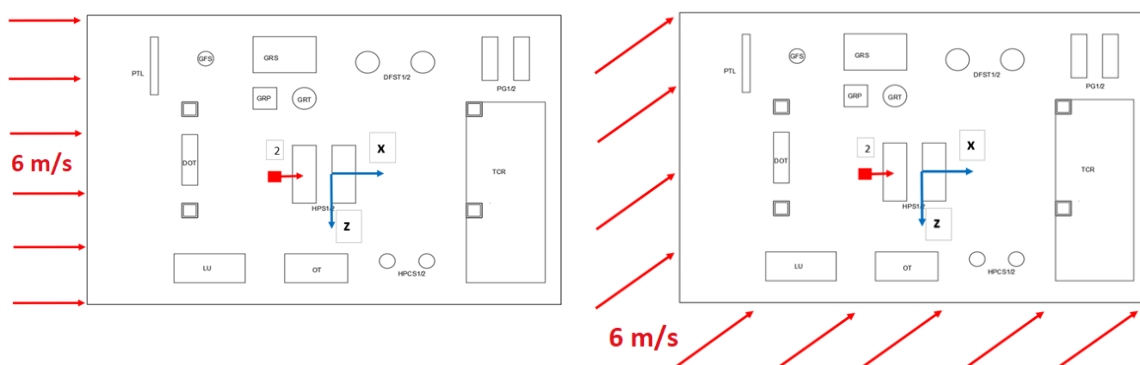


Figura 3.4 – Posizione 2, Vento 6 m/s a 0° (sulla sinistra) / Vento 6 m/s a 45° (sulla destra)

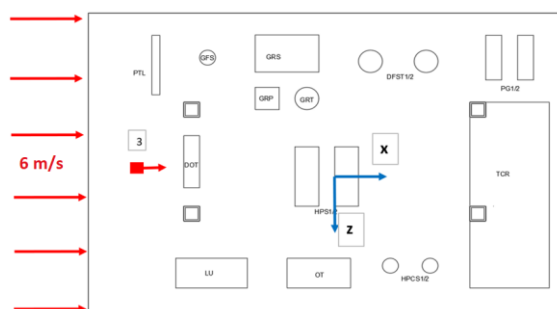


Figura 3.5 – Posizione 3, Vento 6 m/s a 0°

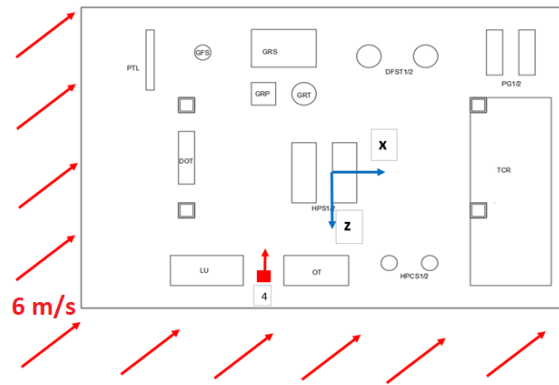


Figura 3.6 – Posizione 4, Vento 6 m/s a 45°

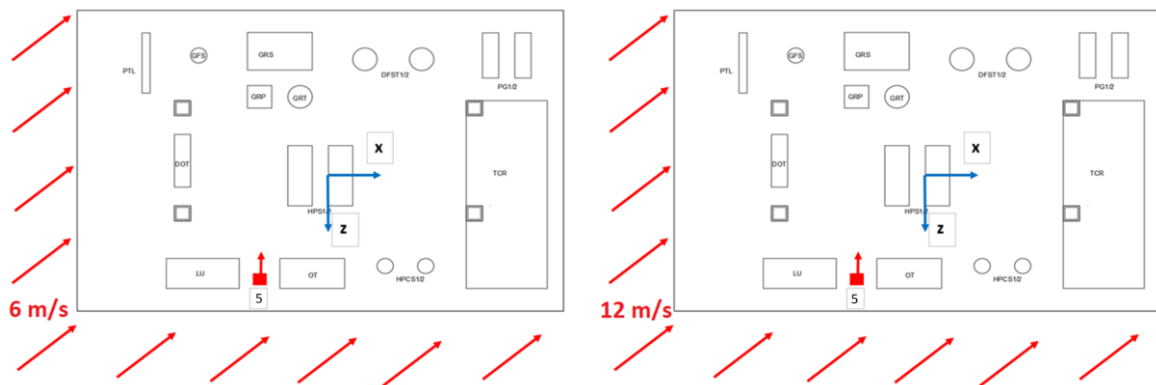


Figura 3.7 – Posizione 5, Vento 6 m/s a 45° (sulla sinistra) / Vento 12 m/s a 45° (sulla destra)

Si osserva che l'intensità del vento di 6 m/s è stata scelta sulla base delle rilevazioni effettuate nella localizzazione geografica della piattaforma di riferimento, a largo delle stazioni meteorologiche poste a Ravenna Punta Marina e Ancona Boa. Un unico caso studio a velocità del vento maggiore è stato considerato al fine di comprendere l'effetto del vento sul rilascio. Inoltre, la posizione del deck ad un'altezza di 15 m sul mare fa sì che il profilo di velocità del vento possa essere ragionevolmente approssimato in tutto lo studio ad un profilo uniforme.

3.3. STUDIO PRELIMINARE DEI MODELLI DI TURBOLENZA

Uno degli aspetti ancora da chiarire è quale sia il modello di turbolenza più adatto per lo studio del fenomeno di dispersione. Col fine di comprendere quali siano le effettive differenze prodotte dall'implementazione dei diversi modelli, è stata condotta un'analisi preliminare su un unico caso studio. I modelli utilizzati seguono l'approccio RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes), di particolare interesse nei casi in cui si voglia effettuare una stima ingegneristica su grandezze medie: questo approccio, che comporta la scomposizione delle quantità turbolente in una componente media su un certo arco di tempo e una fluttuante, consente di ottenere un ragionevole compromesso tra costo computazionale e accuratezza della soluzione cercata. In particolare, si è concentrata l'attenzione sui modelli a due equazioni $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, che si distinguono per i campi di applicazione. I modelli $k-\varepsilon$ non sono infatti in grado di prevedere bene il comportamento del flusso in vicinanza della parete, il cui studio appare invece più indicato con l'utilizzo dei modelli $k-\omega$. In molti casi si utilizza un modello ibrido, il $k-\omega$ SST ("Shear Stress Transport"), che combina gli aspetti vantaggiosi del $k-\varepsilon$ e del $k-\omega$, attraverso una "blending function" in grado di attivare il modello $k-\omega$ vicino alla parete (in zone comprese nel sottostrato viscoso) e il modello $k-\varepsilon$ in regioni lontane dalla parete.

Il caso scelto per effettuare il confronto è quello di un rilascio alla pressione di 50 *bar* con la Source Box nella posizione precedentemente indicata con il numero 3 e vento diretto orizzontalmente (indicato precedentemente con la dicitura di "Vento 6 *m/s* a 0°"). Il confronto dei risultati è stato basato su analisi di tipo sia qualitativo che quantitativo e sulla scelta di parametri rappresentativi, quali le aree e i volumi di infiammabilità generati dalla dispersione del gas rilasciato.

3.3.1. CONFRONTO QUALITATIVO

Col fine di comparare qualitativamente i risultati ottenuti, sono state messe a confronto le immagini delle nubi di infiammabilità e delle aree di infiammabilità definite nel piano *xz* passante per il centro della Source Box. Le immagini sono riportate nelle figure che seguono. L'acquisizione di questi risultati è stata possibile tramite l'utilizzo dello strumento di post-processing integrato nell'ambiente ANSYS Workbench. Per ottenere le aree di infiammabilità è stato infatti definito un Contour sul piano di riferimento, scegliendo come variabile la frazione molare di metano e selezionando come intervallo di valori di interesse quelli compresi all'interno dei limiti di infiammabilità, ovvero i valori di concentrazione entro i quali la miscela di combustibile e aria può bruciare (in presenza di un innesco) e autosostenersi ad una data temperatura e pressione; per il metano i valori di interesse sono:

- Limite di Infiammabilità Inferiore (LFL) 5 % (in vol.);
- Limite di Infiammabilità Superiore (UFL) 15 % (in vol.).

La definizione di un “Isovolume” caratterizzato da valori di frazione molare del metano nel range di infiammabilità ha invece consentito di ottenere una rappresentazione delle nubi di infiammabilità.

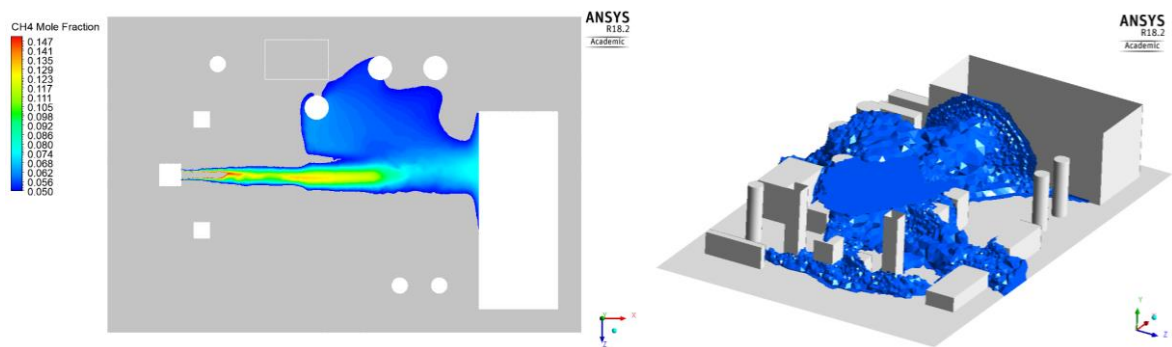


Figura 3.8 – Modello $k-\epsilon$ Standard, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

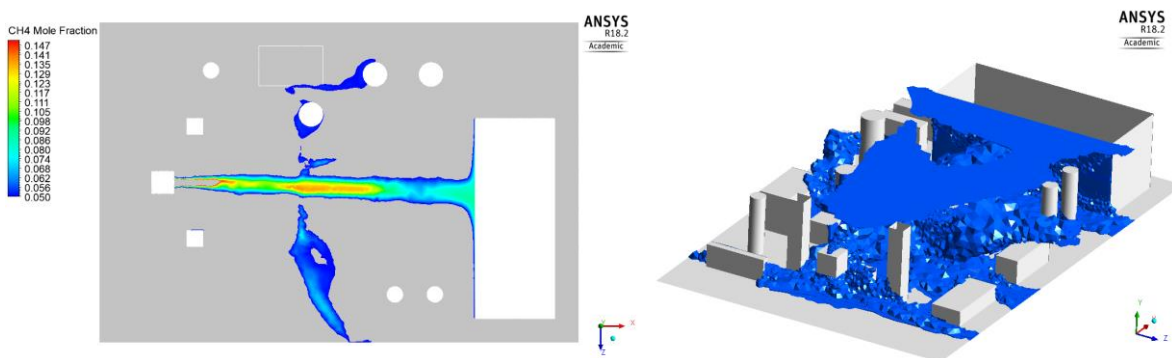


Figura 3.9 – Modello $k-\epsilon$ RNG, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

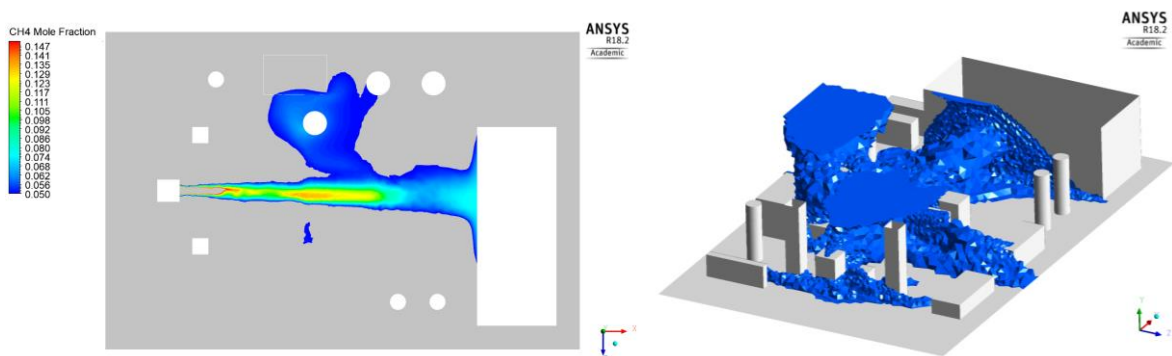


Figura 3.10 – Modello $k-\epsilon$ Realizable, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

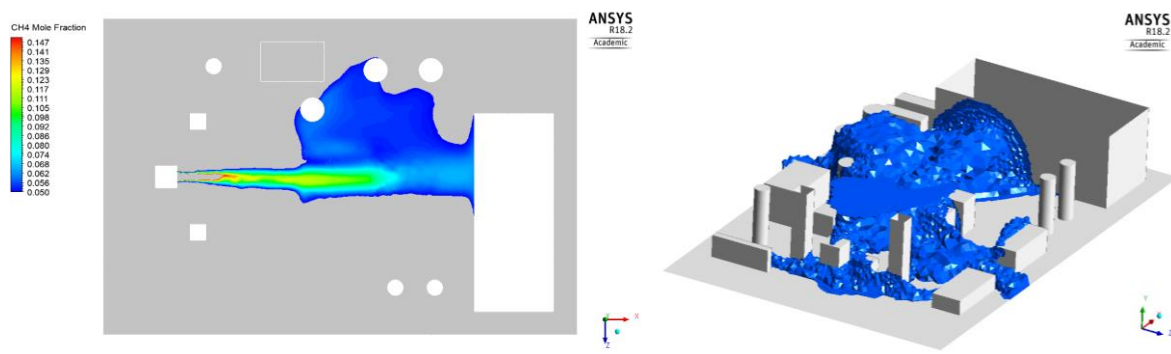


Figura 3.11 – Modello $k-\omega$ SST, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

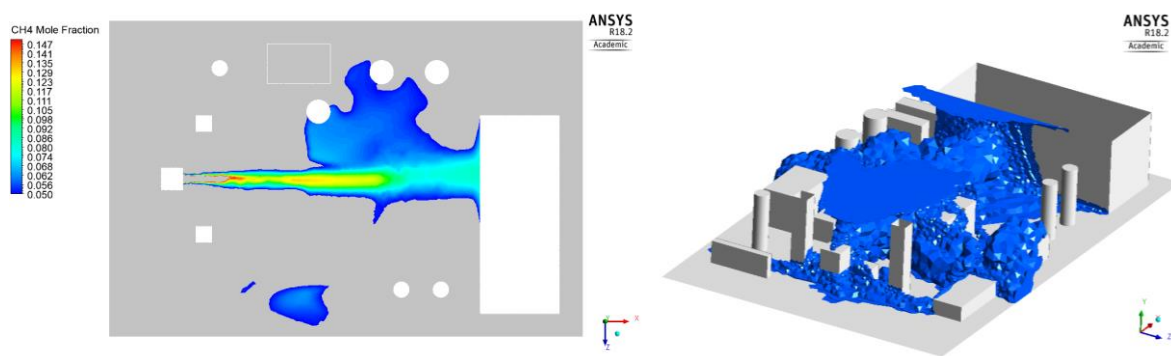


Figura 3.12 – Modello $k-\omega$ Standard, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

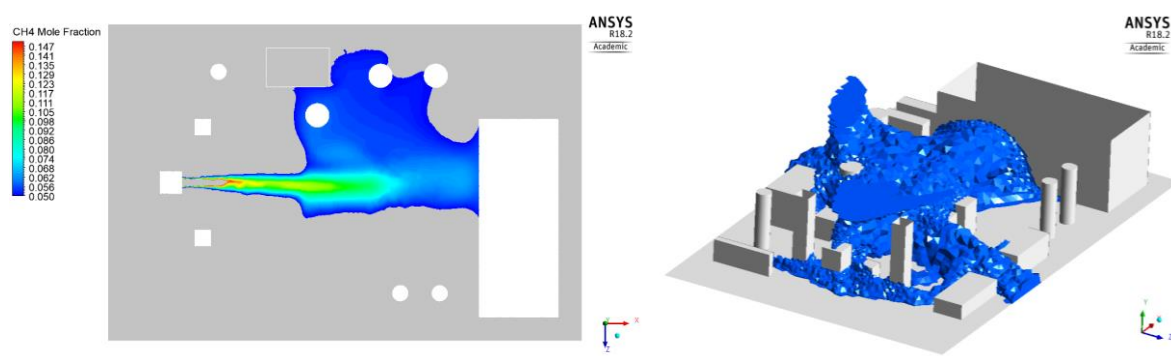


Figura 3.13 – Modello $k-\omega$ BSL, Area di infiammabilità (a sinistra) e Nube di infiammabilità (a destra)

Osservando le forme delle nubi e delle aree di infiammabilità, si nota che i risultati ottenuti con i modelli $k-\omega$ sono tutti molto simili. Anche il modello $k-\epsilon$ Standard conduce a risultati comparabili, mentre le maggiori differenze emergono nel caso del modello $k-\epsilon$ RNG: le immagini mostrano una nube e un'area di infiammabilità notevolmente ridotte in confronto agli altri casi. L'analisi quantitativa dei risultati dà una conferma delle osservazioni fatte, consentendo di ottenere una valutazione più precisa del peso delle differenze.

3.3.2. CONFRONTO QUANTITATIVO

Nello strumento di post-processing di ANSYS, è presente una sezione dedicata al calcolo delle grandezze, che ha permesso la stima tanto del volume quanto della massa della nube infiammabile. In particolare, quest'ultima è stata ricavata integrando su tutto il volume del deck una variabile di integrazione creata ad hoc e definita dall'espressione:

$$\text{if} (\text{Ch4MoleFraction} \geq 0.05 \ \&\& \ \text{Ch4MoleFraction} \leq 0.15, \text{Density}, 0 \text{ [kg m}^{-3}\text{]})$$

La variabile assume quindi il valore della densità del gas se le concentrazioni di metano sono all'interno dei limiti di infiammabilità, in caso contrario viene assegnato il valore 0, in modo che l'integrazione di questa quantità su tutto il volume del deck restituisca la sola massa della nube di infiammabilità.

Per identificare l'Area Infiammabile sul piano xz passante per il centro della Source Box è stato invece necessario creare un Contour sul piano di riferimento, selezionando come variabile la frazione molare di metano e come intervallo di valori quelli compresi all'interno dei limiti di infiammabilità. È stata poi definita una "User Surface" avente come "metodo" il Contour così creato e ne è stata calcolata l'area facendo uso dell'apposita sezione di calcolo. Si riporta un'immagine esemplificativa del procedimento utilizzato (Figura 3.14).

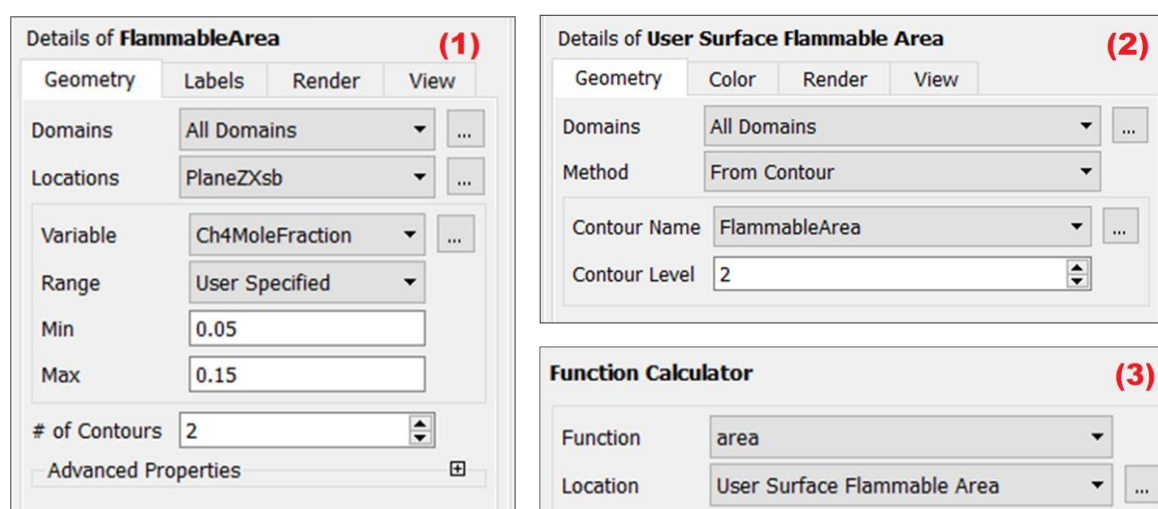


Figura 3.14 – Procedimento per il calcolo dell'area di infiammabilità

I valori ottenuti per ciascun modello sono sintetizzati nella Tabella 3.4 e posti a confronto nel Grafico 3.1.

<i>Modello</i>	<i>Volume Infiammabile [m³]</i>	<i>Massa della Nube [kg]</i>	<i>Area Infiammabile [m²]</i>
k-ε Standard	370	344	73
k-ε Realizable	359	316	61
k-ε RNG	258	180	41
k-ω Standard	392	350	76
k-ω SST	355	326	74
k-ω BSL	421	402	92

Tabella 3.4 – Risultati ottenuti dall'implementazione dei diversi modelli

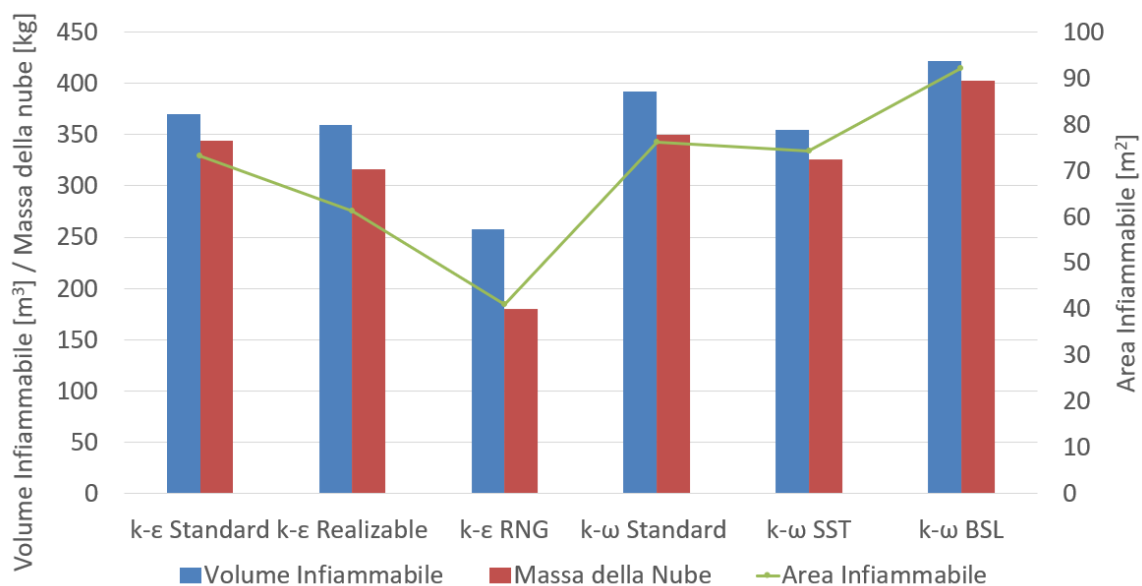


Grafico 3.1 – Comparazione dei risultati ottenuti con i diversi modelli

Si osserva che il modello k-ε RNG presenta di fatto valori notevolmente inferiori rispetto a quelli conseguiti con gli altri modelli, che risultano comparabili tra loro. Riguardo alla convergenza dei risultati, i casi migliori sono ottenuti con i modelli k-ω, in particolare il k-ω Standard, mentre l'implementazione dei modelli k-ε appare più difficoltosa.

Si è poi deciso di confrontare l'andamento della frazione molare di metano lungo una linea passante per il centro della Source Box e nella direzione del rilascio (coincidente in questo caso con quella del vento), come mostrato in Figura 3.15.

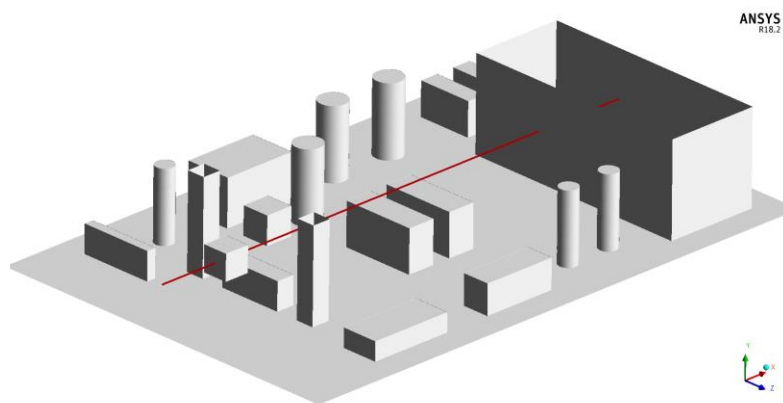


Figura 3.15 – Linea utilizzata per studiare l'andamento della frazione molare di CH_4 , in direzione del rilascio

I valori estrapolati lungo la linea per ciascun modello sono stati quindi rappresentati nel Grafico 3.2, in cui è anche evidenziato l'intervallo di infiammabilità.

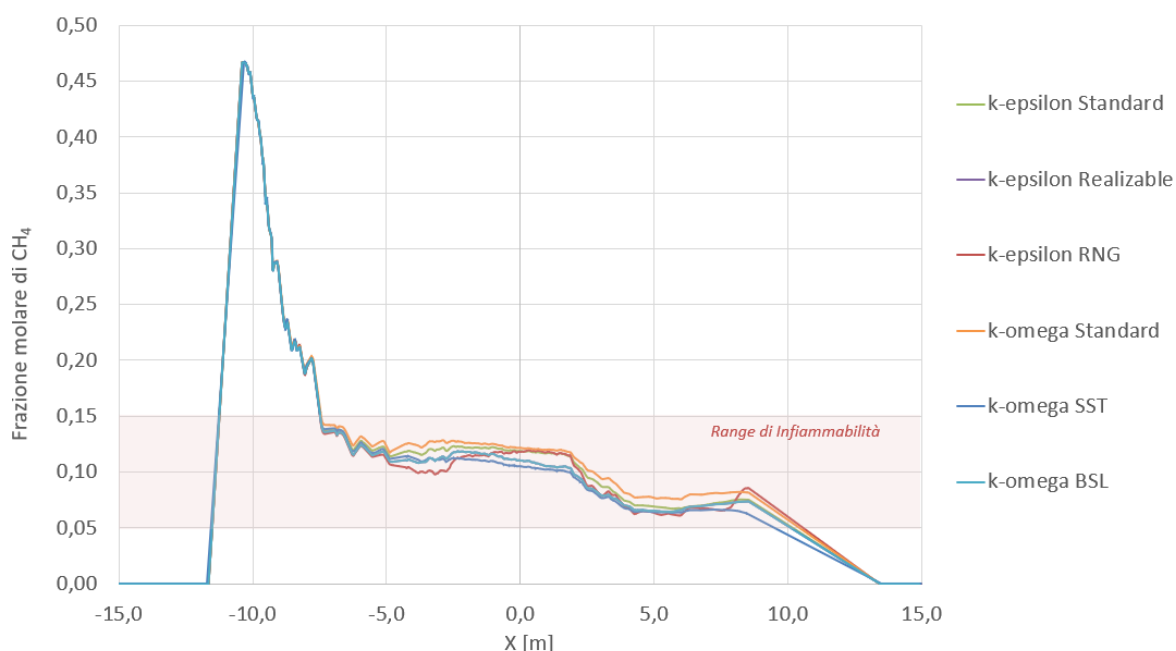


Grafico 3.2 – Confronto tra gli andamenti della frazione molare in direzione del rilascio per i diversi modelli

Si osserva che di fatto lungo la linea quasi tutti i punti appartengono alla zona di infiammabilità. Inoltre, gli andamenti ottenuti con i diversi modelli sono comparabili: in direzione del rilascio tutti i modelli riescono a rappresentare piuttosto bene il fenomeno, laddove le maggiori difficoltà sorgono nello studio della dispersione nel resto del deck.

Visti i risultati qui ottenuti, per tutte le simulazioni della fase di dispersione si è utilizzato il modello $k-\omega$ Standard, caratterizzato dalla migliore convergenza della soluzione. Anche l'implementazione del modello $k-\omega$ SST appare dsadeguata tanto nella descrizione del fenomeno quanto nella velocità di convergenza della soluzione; tuttavia, almeno in questo caso, il $k-\omega$ Standard sembra fornire risultati più conservativi.

4. STUDIO DEL CAMPO DI MOTO DEL VENTO

Nei lavori finora sviluppati nell'ambito del presente progetto, uno degli aspetti ancora non indagati a fondo è senz'altro la condizione al contorno da imporre per poter simulare al meglio il flusso di vento in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma. Supponendo di considerare il vento uniforme, nelle simulazioni finora effettuate la condizione di "velocity inlet" relativa al vento è stata imposta direttamente sulle facce di ingresso in piattaforma, come mostrato nella Figura 4.1 (facce colorate in celeste).

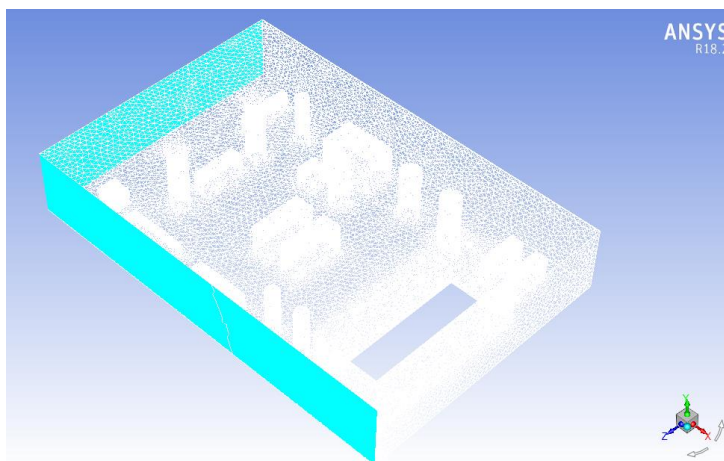


Figura 4.1 – Dominio 0, Condizione al contorno "Velocity Inlet"

Se però si considera che la presenza di ostacoli perturba il campo di moto del vento tanto a valle quanto a monte degli ostacoli stessi, si comprende l'inaccuratezza nella rappresentazione delle reali condizioni di vento originata dall'imposizione di una condizione di velocità uniforme in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma. Si impone quindi la necessità di una rivisitazione delle dimensioni del dominio, in modo che le condizioni al contorno di vento uniforme imposte siano adeguate alla rappresentazione del fenomeno reale. Va comunque specificato che l'analisi precedentemente condotta sul modello di turbolenza più adatto può considerarsi indipendente dalle dimensioni del dominio e rimangono quindi valide le considerazioni fatte nel capitolo precedente.

Dal momento che i casi studio analizzati prendono in considerazione due possibili direzioni del vento, il campo di moto del vento è stato studiato solo per questi due casi specifici.

4.1. CAMPO DI MOTO DEL VENTO A 45°

In particolare, la prima direzione del vento analizzata è quella a 45°, identificata dall'immagine in Figura 4.2.

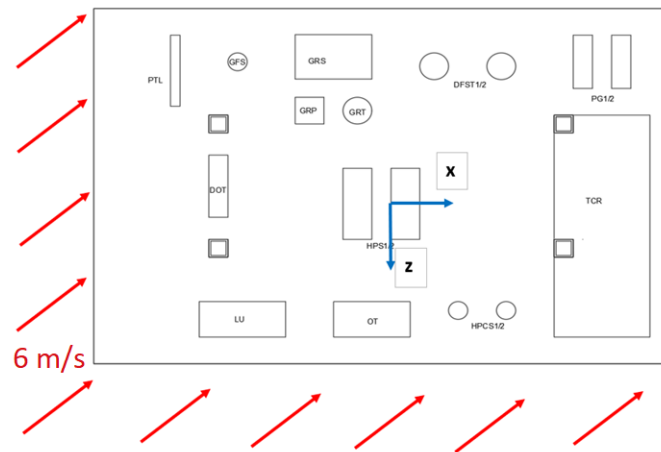


Figura 4.2 – Caso studio con vento a 45° e intensità pari a 6 m/s

Si è pertanto deciso di costruire un dominio più grande, che racchiudesse al suo interno il deck, con lo scopo di imporre la condizione di velocità del vento uniforme ad una distanza tale che il profilo del vento non fosse più influenzato dalla presenza degli ostacoli a valle.

Il dominio creato tramite l'ausilio di *Design Modeler* è mostrato in Figura 4.3.

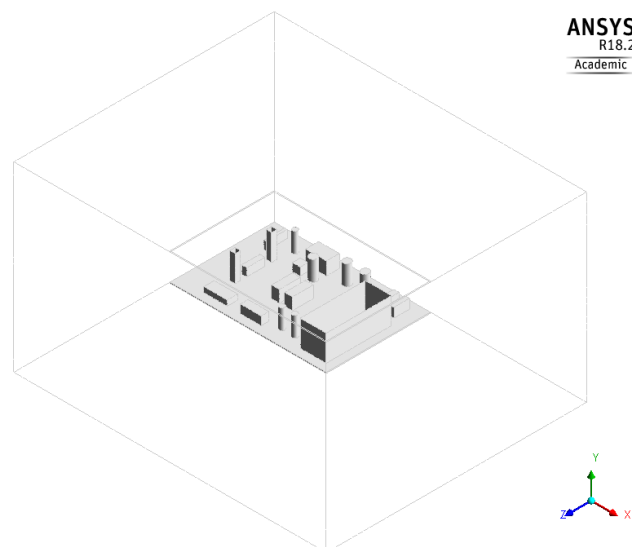


Figura 4.3 – Dominio allargato contenente il deck

Le dimensioni sono state aumentate rispetto al dominio classico (a cui si farà riferimento d'ora in poi con la dicitura "Dominio 0") in tutte le direzioni (x , y , z) in modo simmetrico. In particolare, si è concentrata l'attenzione su quattro diversi domini, allargati rispetto al Dominio 0 di quantità Δl pari a:

- $\Delta l = +5 \text{ m}$, per il "Dominio 1"
- $\Delta l = +10 \text{ m}$, per il "Dominio 2"
- $\Delta l = +15 \text{ m}$, per il "Dominio 3"
- $\Delta l = +20 \text{ m}$, per il "Dominio 4"

La rappresentazione che segue evidenzia la quantità Δl che distingue i vari domini.

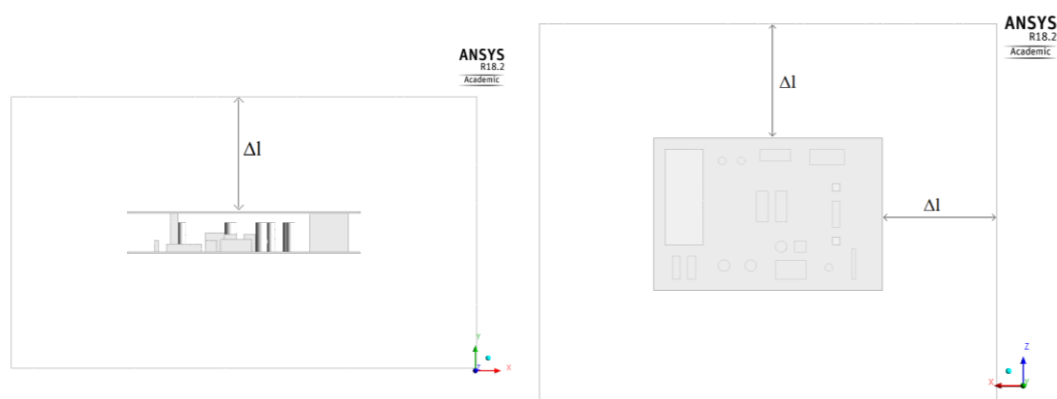


Figura 4.4- Vista frontale (a sinistra) e dall'alto (a destra) del dominio allargato

È stato escluso dalla modellazione degli ostacoli il cubo rappresentante la Source Box, sia perché le superfici sono di ausilio all'inserimento delle informazioni sul rilascio e non rappresentano pareti fisiche, sia perché questo consente di utilizzare i risultati dello studio del vento in ciascuna direzione per i diversi casi studio (con le Source Box in posizioni diverse). Per quanto riguarda la mesh utilizzata, è stato realizzato un maggior infittimento all'interno del deck stesso, dove la presenza degli ostacoli ha reso necessaria la definizione di un "Face Sizing" e di un "Inflation Layer" in accordo con quanto fatto in precedenza per gli studi della dispersione nel "Dominio 0". È stato definito un "Inflation Layer" anche in corrispondenza delle superfici della base e del soffitto del deck. La realizzazione di un dominio intermedio ha poi permesso di rendere più graduale l'infittimento progressivo della mesh, attraverso l'utilizzo dello strumento "Body Sizing". In Figura 4.5 è presente una rappresentazione della mesh in una sezione nel piano xz nella mezzeria del dominio.

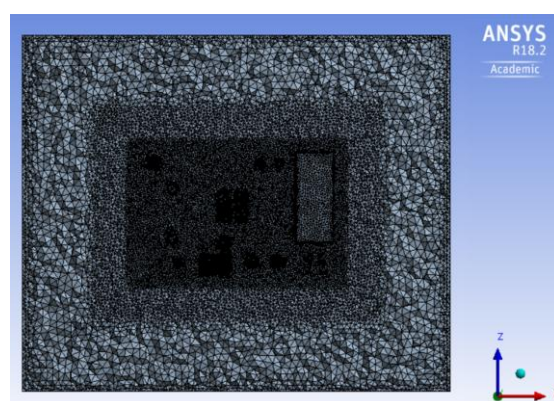


Figura 4.5 – Sezione della mesh utilizzata nel piano xz , $Y = 2,5 \text{ m}$

La creazione di questo dominio è stata funzionale all'imposizione in Fluent della condizione di "Velocity Inlet" in corrispondenza delle facce del dominio (evidenziate in celeste in Figura 4.6), non più coincidenti con le facce di ingresso nel deck. La Figura 4.7 mostra appunto come è stata configurata la condizione di "Velocity Inlet" in Fluent.

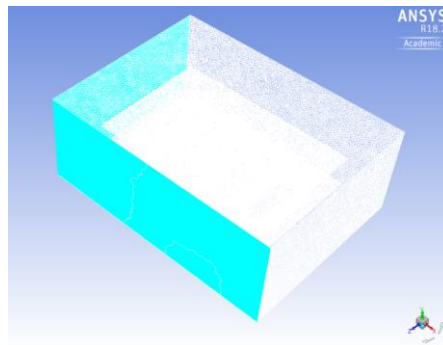


Figura 4.6 – Dominio allargato, Condizione al contorno "Velocity Inlet" (Vento 1)

In analogia con quanto fatto nel caso del Dominio 0, le altre facce del dominio fluido sono state configurate con la condizione al contorno "Pressure Outlet", laddove le superfici corrispondenti alla base e al soffitto del deck sono state definite come "walls", così come fatto in precedenza per tutti gli altri ostacoli.

Non essendo stato simulato alcun rilascio, non è coinvolto alcun trasporto di specie e l'unico fluido presente nel dominio è l'aria. Le simulazioni sono state effettuate scegliendo di utilizzare il metodo "Coupled" e il modello $k-\omega$ SST, avendo verificato come l'utilizzo dei diversi modelli $k-\omega$ comporti minime differenze nelle simulazioni con solo vento. Si puntualizza che l'utilizzo di questo modello non è in disaccordo con la scelta del modello di turbolenza discussa nel capitolo precedente: essa è infatti quella che assicura una migliore convergenza della soluzione nelle simulazioni che coinvolgono il fenomeno di rilascio, mentre per lo studio del solo vento il raggiungimento della convergenza è decisamente più agevole e dipende molto meno dal modello scelto.

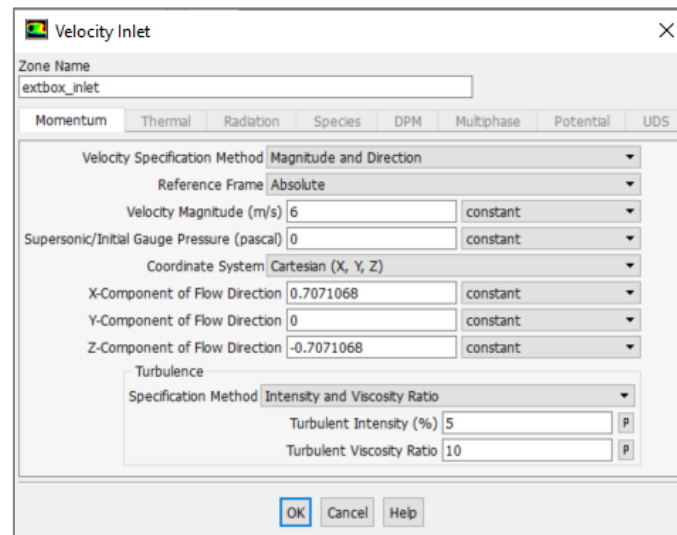


Figura 4.7 – Schermata della configurazione del "Velocity Inlet" in Fluent

Le immagini che seguono evidenziano i contour di velocità ottenuti nel post-processing dei piani corrispondenti alle facce di ingresso nel deck per i diversi domini di dimensioni crescenti.

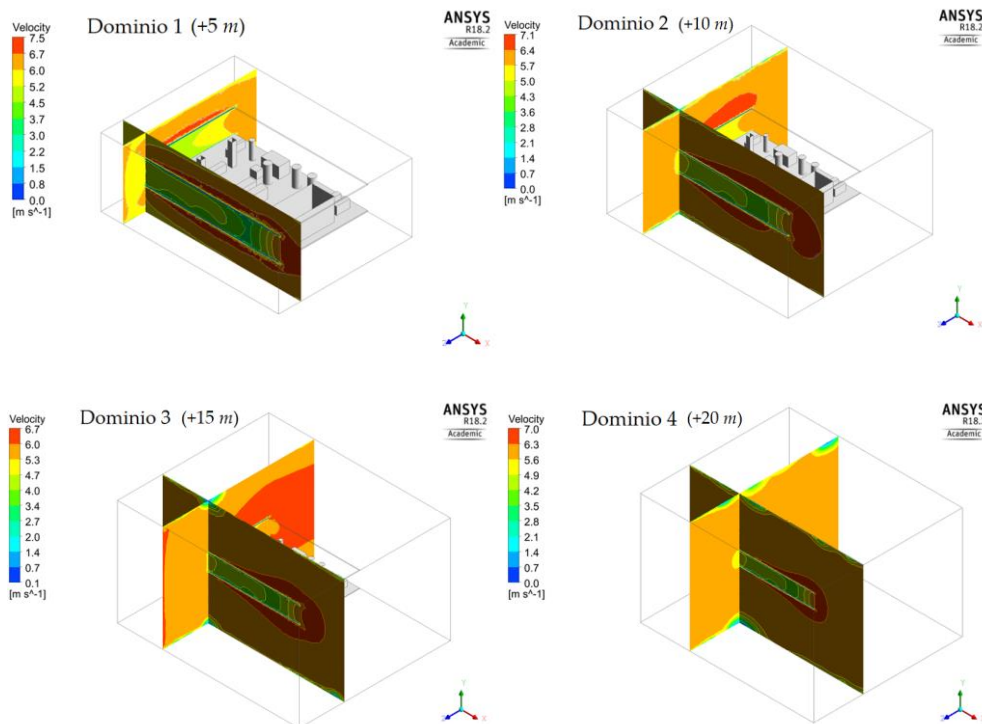


Figura 4.8 – Contour di Velocità sulle facce di ingresso al deck per i quattro diversi domini allargati

Per poter meglio concentrare l'attenzione sul contour di velocità nella zona corrispondente all'interno del deck ci si è anche avvalsi di un codice Matlab che permette di confrontare gli andamenti delle velocità, mediate sull'area della griglia scelta per elaborare i dati, e di ottenere un grafico della distribuzione delle differenze nei vari casi. Si riportano ad esempio le immagini del confronto tra i risultati ottenuti con il Dominio 1 (+5 m) e quelli ottenuti con il Dominio 2 (+10 m).

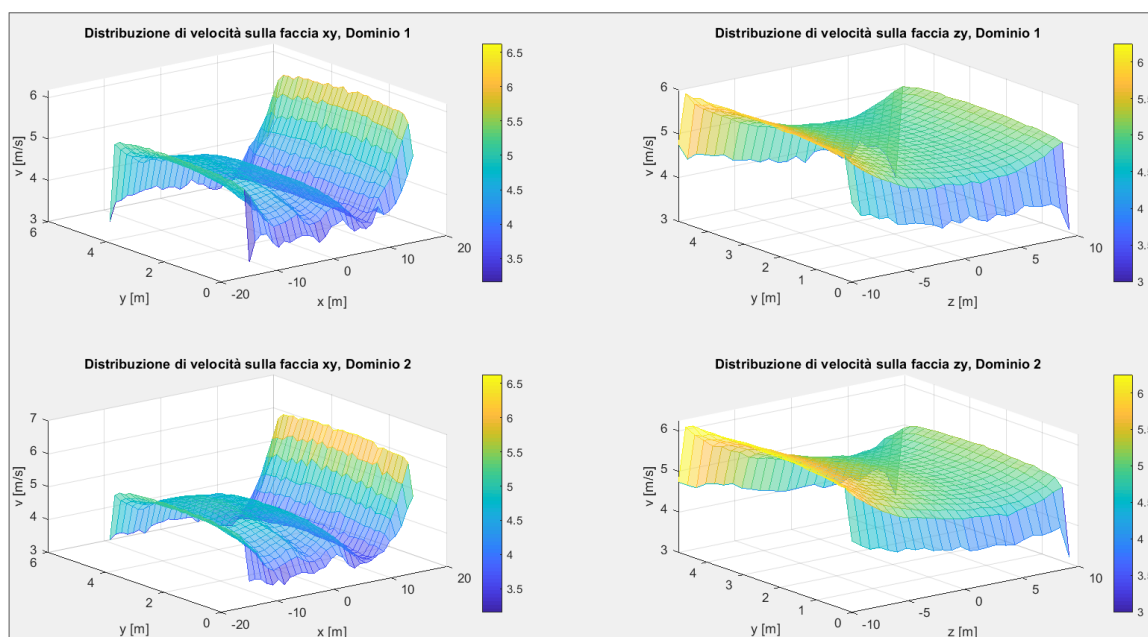


Figura 4.9 – Confronto degli andamenti di velocità ottenuti tramite elaborazione con Matlab

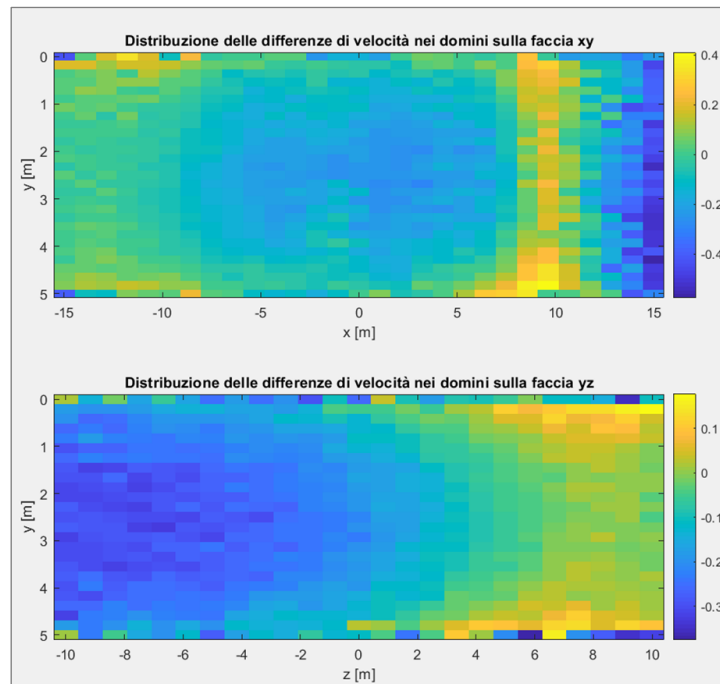


Figura 4.10 – Differenza tra gli andamenti di velocità sulle facce di ingresso in piattaforma in due diversi domini, ottenuta attraverso elaborazione con Matlab

Dai confronti tra i vari *contour* si osserva come di fatto i risultati ottenuti siano simili, ma con differenze che possono essere indagate più nel dettaglio mediante un'analisi puntuale sugli andamenti delle velocità. A tal fine sono state selezionate alcune linee, visibili in Figura 4.11, in cui calcolare, tramite lo strumento di post-processing di Fluent, i valori di velocità al fine di rappresentare su un grafico gli andamenti. Sono stati estrapolati gli andamenti relativi a ciascuna linea per tutti i domini in analisi, dal dominio classico (Dominio 0) al Dominio 4. I risultati sono visibili nelle figure che seguono (Grafici 4.1) dove una freccia indica la direzione del vento a partire dalla faccia in cui viene imposta la condizione al contorno di "Velocity Inlet", definendo così quella che è la zona a monte del deck. È inoltre evidenziata la zona del dominio all'interno del deck.

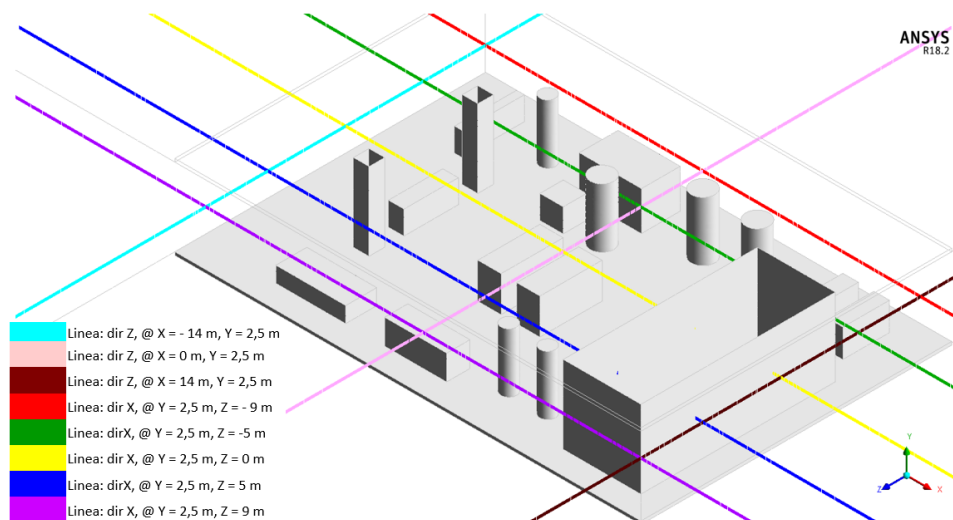
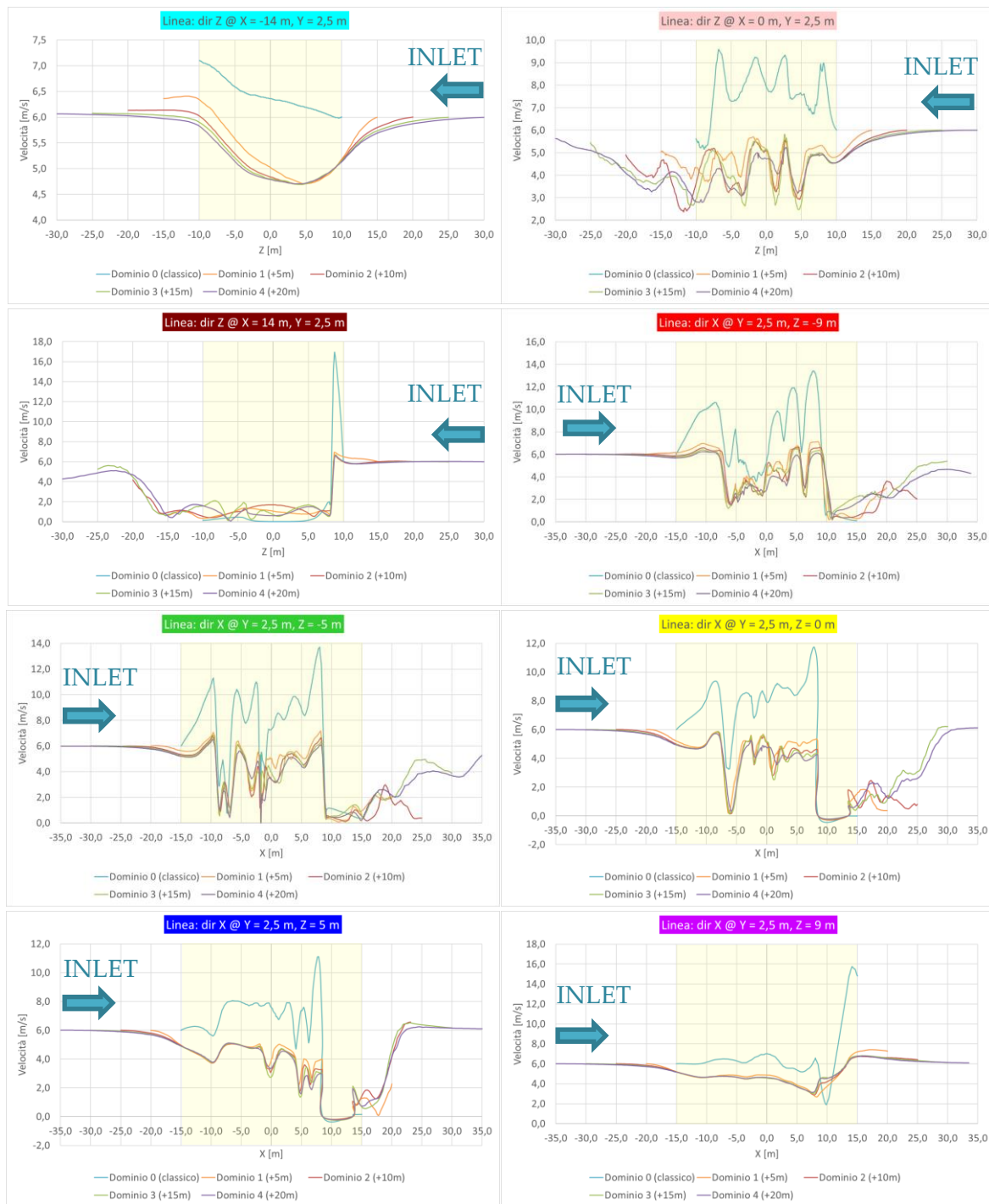


Figura 4.11 – Linee create in ANSYS CFD-Post per estrapolare l'andamento delle velocità (Vento 6 m/s a 45°)



Grafici 4.1 – Andamenti delle velocità del vento lungo le linee selezionate (Vento 6 m/s a 45°)

Si osserva che le maggiori differenze nei valori di velocità relative alle diverse linee sono quelle tra il Dominio 0 e i domini allargati. Nel primo caso si raggiungono infatti all'interno del deck valori di velocità molto maggiori rispetto a quelli ottenuti imponendo la condizione di "Velocity Inlet" uniforme lontano dall'ingresso in piattaforma. Se però ci si pone l'obiettivo di individuare la distanza alla quale il campo di moto del vento non è più influenzato dalla presenza degli ostacoli a valle, ci si accorge che le curve tendono ad appiattirsi ad una certa distanza a monte del deck. In particolare, concentrando ad esempio

l'attenzione sui primi due grafici (relativi alle linee "Linea: dir Z, @ X = - 14 m, Y = 2,5 m" e "Linea: dir Z, @ X = 0 m, Y = 2,5 m"), si osserva che per valori di Z maggiori di 20 m si assiste al raggiungimento di un plateau per le curve relative ai Domini 2, 3 e 4. Il Dominio 1, cioè quello con il dominio allargato di 5 m in tutte le direzioni, appare di fatto incapace di contenere gli effetti di influenza degli ostacoli sul vento.

Si è poi perseguito l'obiettivo di individuare come variassero i profili del vento in varie linee verticali (in direzione y) in corrispondenza dell'ingresso al deck, poste a 5 m di distanza l'una dall'altra. Le linee prese in considerazione sono quelle rappresentate in giallo nella Figura 4.12, accompagnate da un numero, a cui si farà riferimento nei singoli grafici.

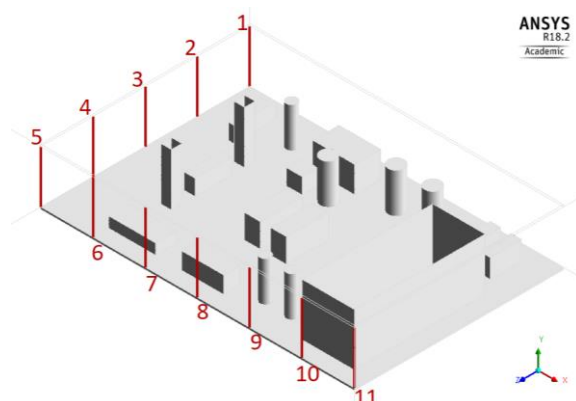
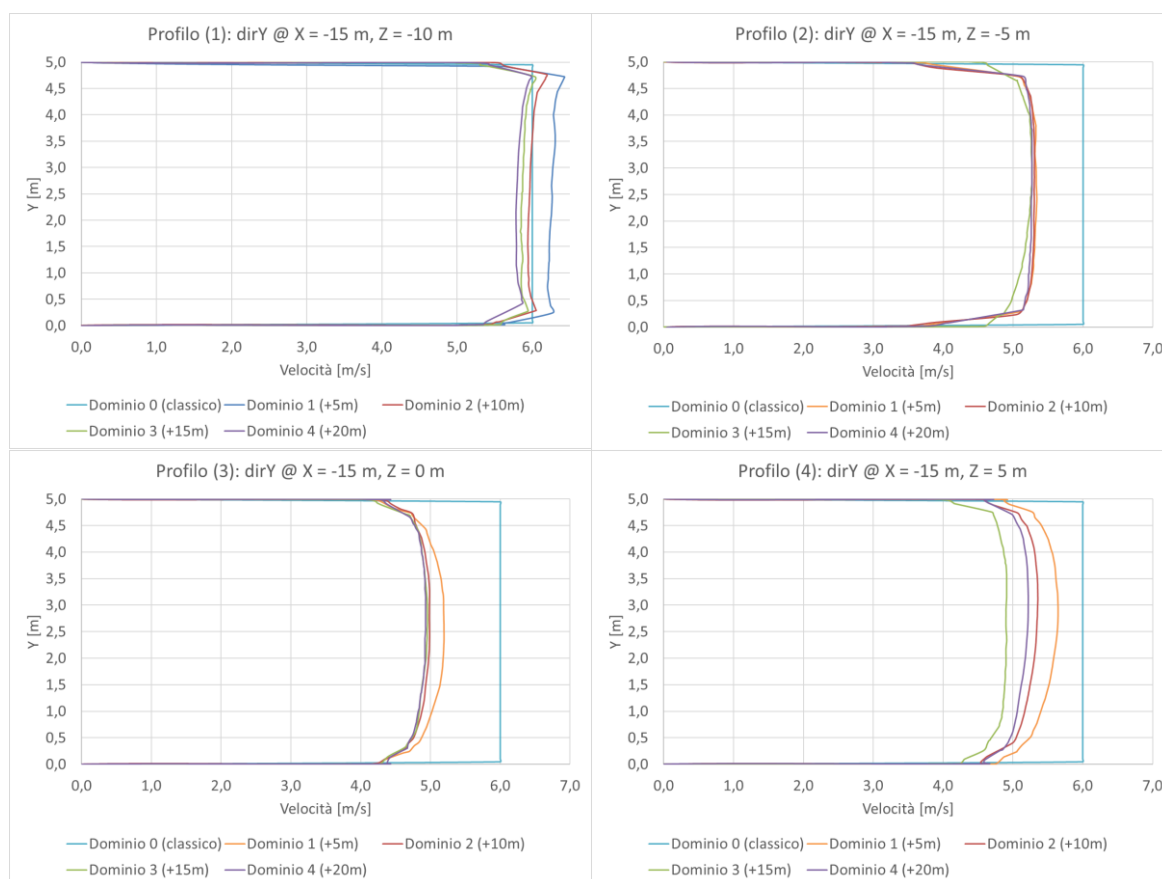
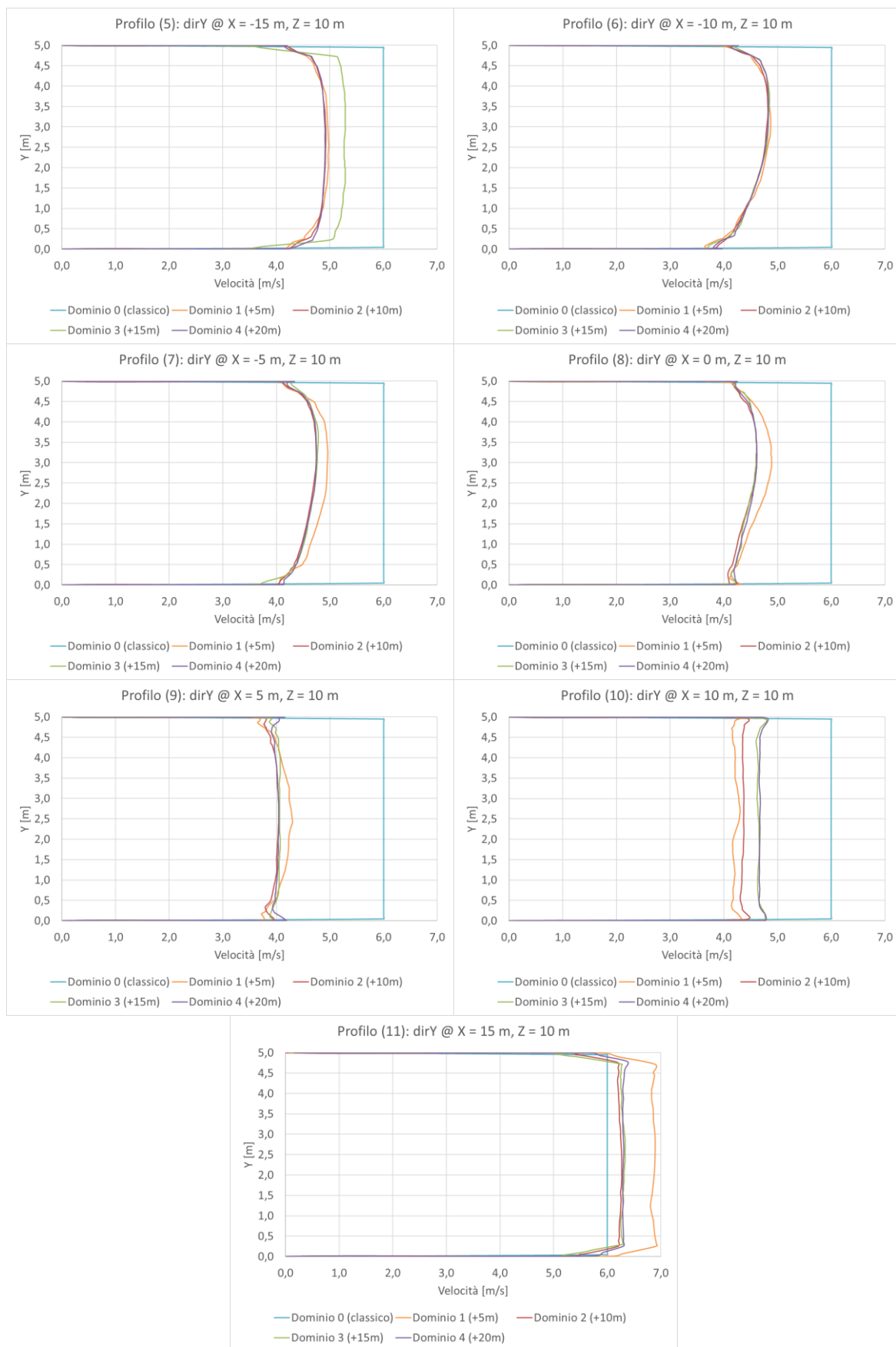


Figura 4.12 – Linee create in ANSYS CFD-Post per estrapolare i profili di velocità sulle facce del deck (Vento 6m/s a 45°)





Grafici 4.2 – Profili di velocità in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma (Vento 6 m/s a 45°)

Come si può notare dagli andamenti in figura, i profili del vento variano in funzione della distanza in cui viene applicata la condizione al contorno di vento uniforme. Ciò è dovuto al fatto che, aumentando la distanza a cui si impone un flusso di vento uniforme, cambia l'effettiva velocità del vento all'ingresso in piattaforma. Anche qui, si può osservare come i profili dei Domini 2, 3 e 4 siano di fatto molto simili, mentre il Dominio 1, nonostante le notevoli differenze con il dominio classico, ha profili di velocità che si differenziano abbastanza da quelli ottenuti negli altri casi. Si tratta di un'ulteriore conferma di come questo dominio non sia sufficiente a rappresentare bene le condizioni di vento effettivamente presenti in mare aperto, nell'ipotesi di vento uniforme. In generale, il Dominio 3 appare il più adatto a garantire l'indipendenza del campo di moto dalla distanza a cui è applicata la condizione al contorno relativa al vento: l'andamento del vento nella zona a monte del deck risulta praticamente identico a quello del Dominio 4.

Con il fine di comparare il campo di moto del vento nel Dominio 3 e nel Dominio 0, sono stati definiti i Contour di velocità su piani xz a tre diverse altezze ($Y = 1\text{ m}$, $Y = 2,5\text{ m}$, $Y = 4\text{ m}$), imponendo le stesse scale di valori per rendere significativo il confronto (Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15).

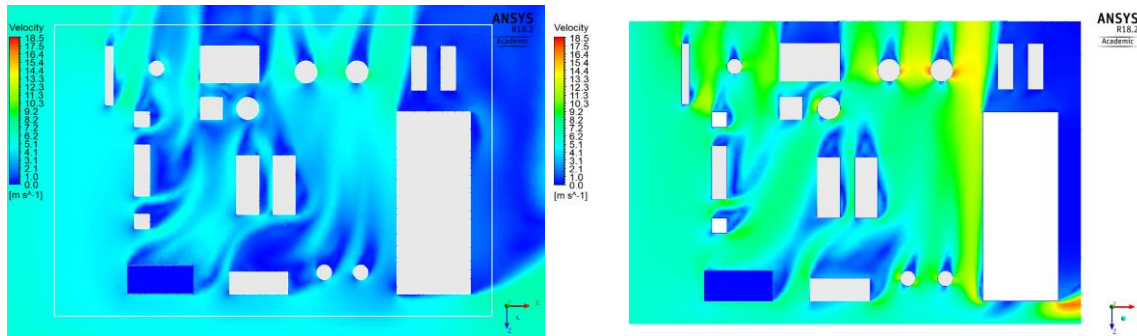


Figura 4.13 – Campo di moto del vento nel piano $Y = 1\text{ m}$: Dominio 3 (a sinistra) e Dominio 0 (a destra)

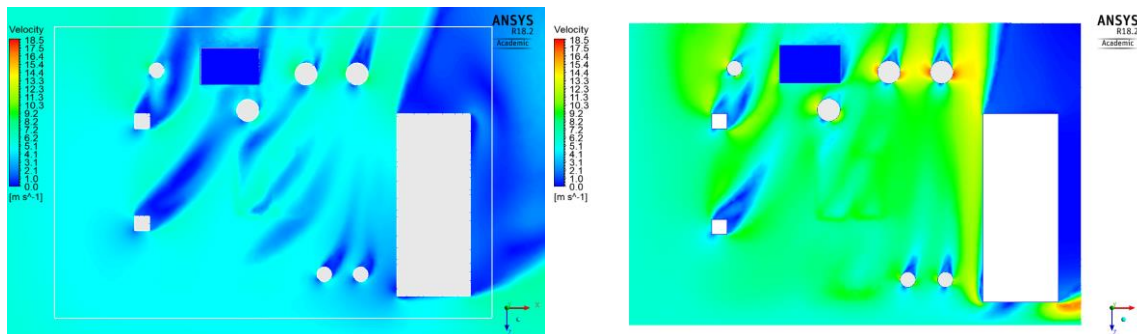


Figura 4.14 – Campo di moto del vento nel piano $Y = 2,5\text{ m}$: Dominio 3 (a sinistra) e Dominio 0 (a destra)

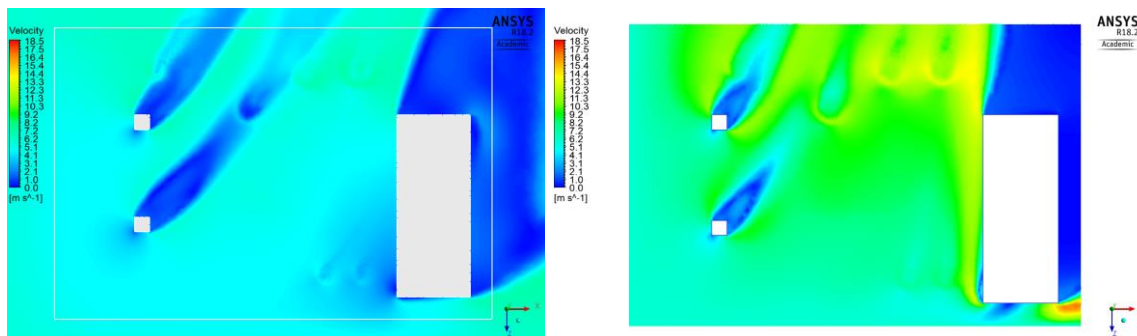


Figura 4.15 – Campo di moto del vento nel piano $Y = 4\text{ m}$: Dominio 3 (a sinistra) e Dominio 0 (a destra)

Le immagini evidenziano notevoli differenze nel campo di moto generato, sottolineando ancora una volta la necessità di porre le condizioni al contorno del vento lontano dal deck.

4.2. CAMPO DI MOTO DEL VENTO A 0°

In analogia a quanto fatto per il caso del vento a 45° , è stato condotto uno studio per il caso in cui il vento investe frontalmente un lato della piattaforma, come meglio identificato in Figura 4.16.

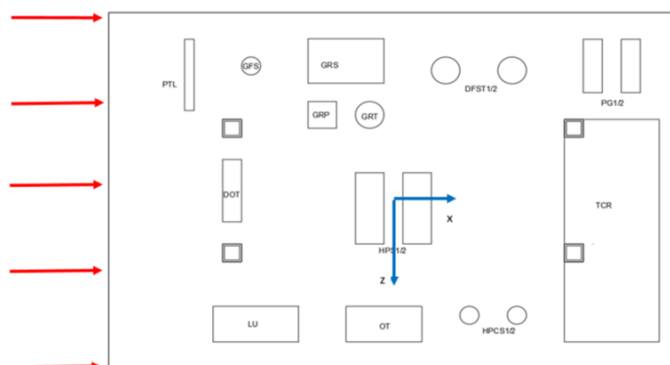


Figura 4.16 – Caso studio con vento orizzontale e intensità pari a 6 m/s

Si riportano in Figura 4.17 le linee utilizzate per estrapolare l'andamento del vento. Sono state scelte le sole linee in direzione del vento poiché sono quelle in cui si riescono a cogliere meglio le differenze tra le velocità nei diversi domini. Gli andamenti ottenuti sono mostrati nei Grafici 4.3. Inoltre, anche in questo caso sono stati analizzati i profili del vento, mediante l'ausilio di linee verticali equidistanziate in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma (visibili in Figura 4.18). I profili ottenuti sono visibili nei Grafici 4.4. Anche qui valgono le stesse considerazioni fatte per il caso del vento a 45° , tuttavia le differenze negli andamenti rispetto al dominio classico risultano meno marcate e appare già sufficiente porre la condizione di inlet del vento ad una distanza di 10 m dall'ingresso nel deck (Dominio 2). Va comunque osservato che nelle simulazioni che coinvolgono il solo studio del vento non sono rilevabili sostanziali differenze dal punto di vista dell'onere computazionale qualora

si utilizzi il Dominio 2 o il Dominio 3. Pertanto, dal momento che ci si aspetta da quest'ultimo una rappresentazione leggermente più accurata del campo di moto, si preferisce l'utilizzo del Dominio 3 (+15 m) per lo studio delle condizioni al contorno più adatte alla definizione del vento.

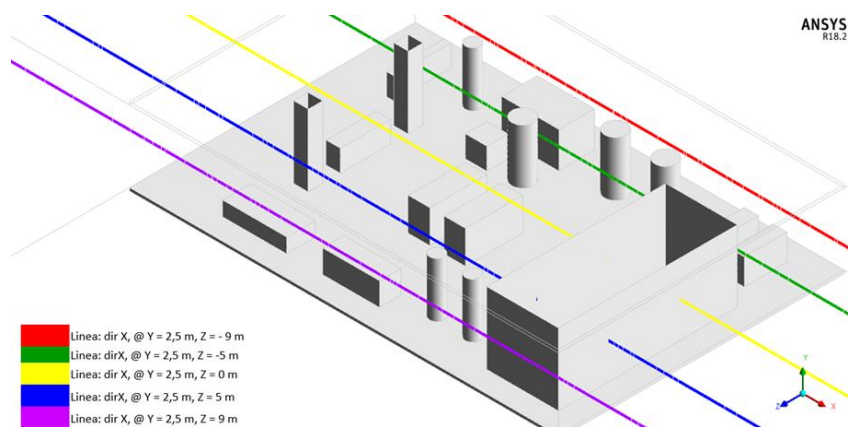
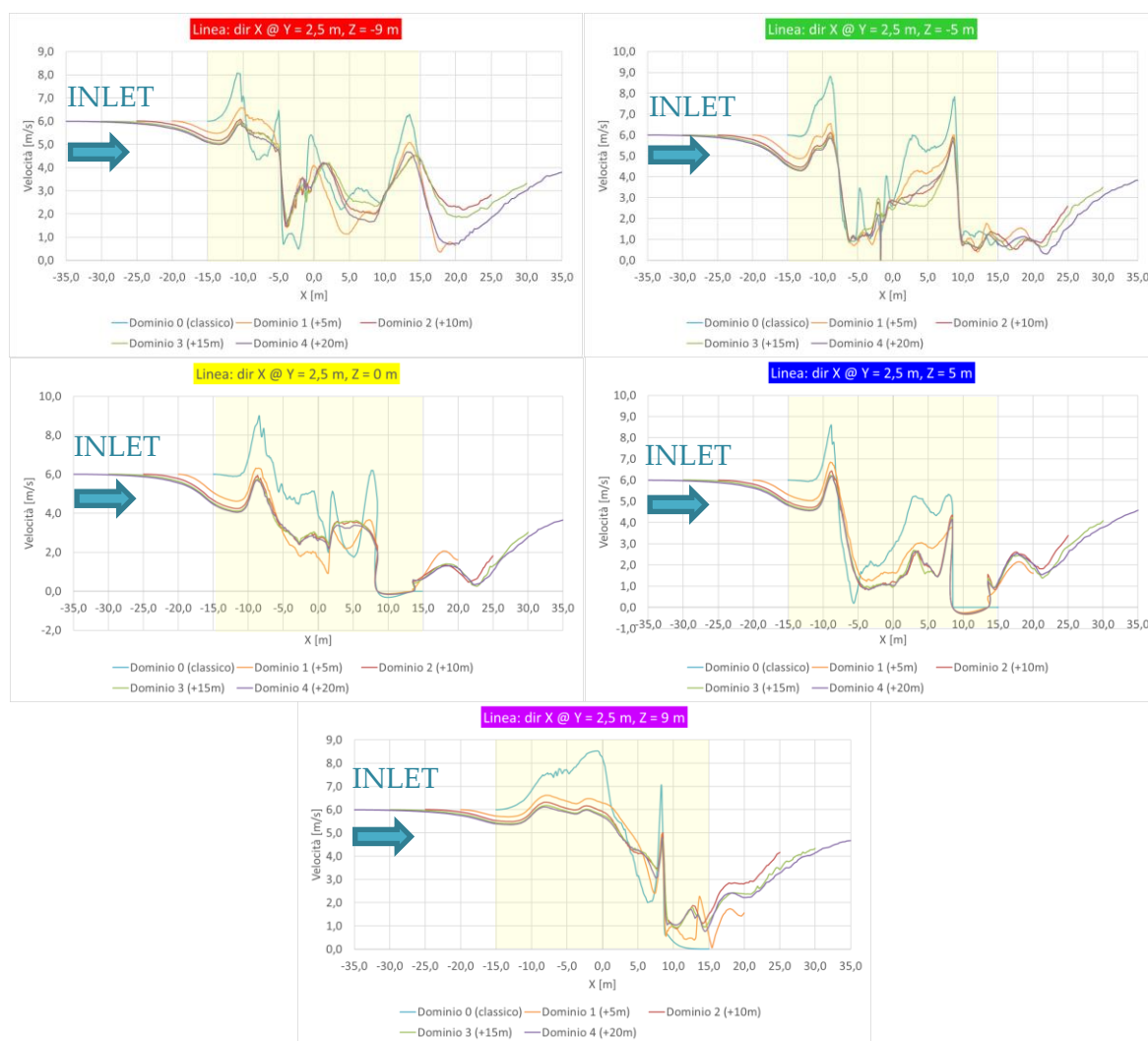


Figura 4.17 – Linee create in ANSYS CFD-Post per estrapolare l'andamento delle velocità (vento 6 m/s a 0°)



Grafici 4.3 – Andamenti delle velocità del vento lungo le linee selezionate (Vento 6 m/s a 0°)

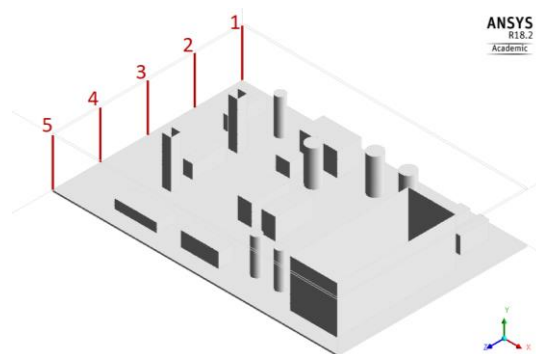
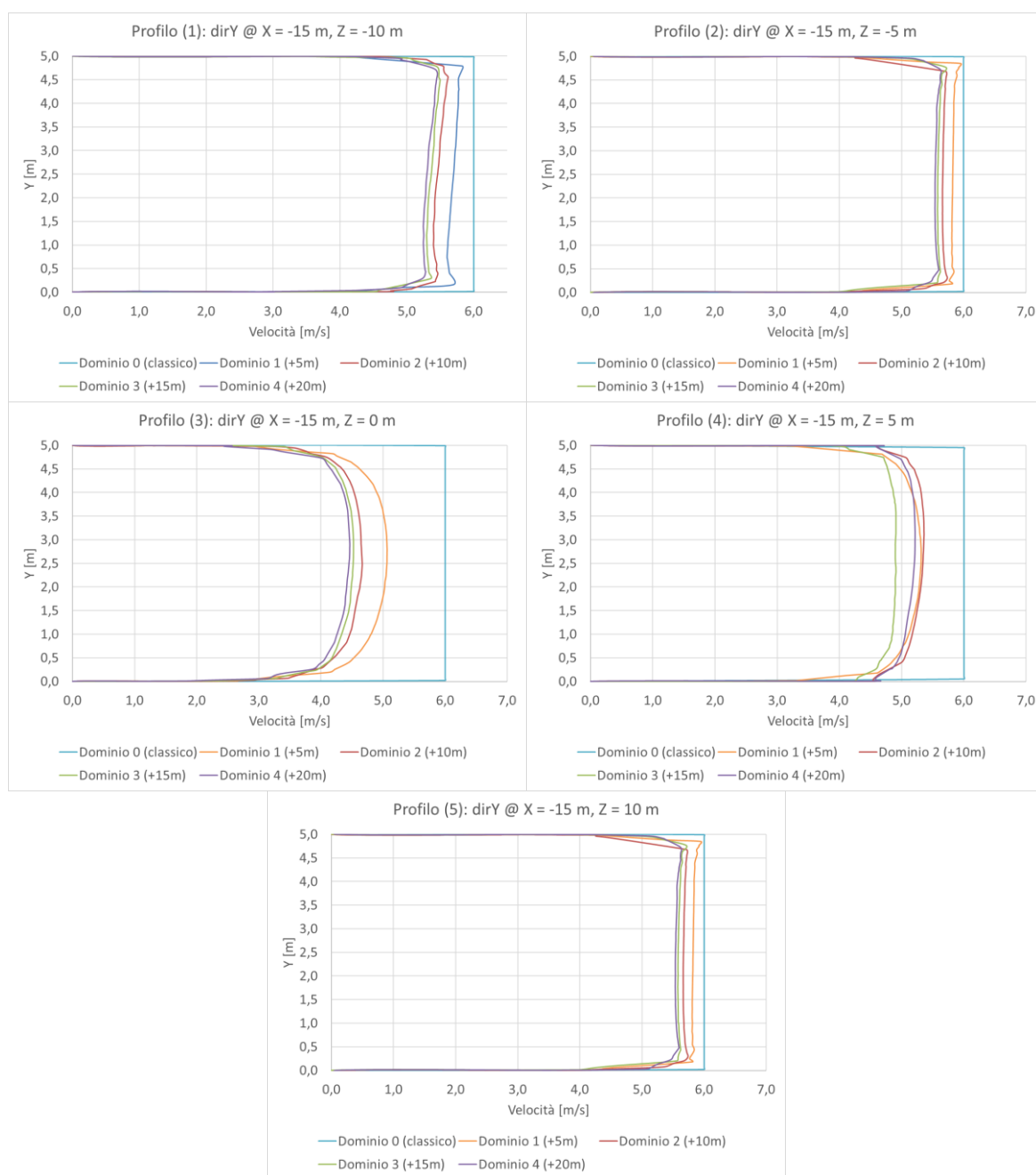


Figura 4.18 – Linee create in ANSYS CFD-Post per estrapolare i profili di velocità sulla faccia del deck (Vento 6m/s a 0°)



Grafici 4.4 – Profili di velocità in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma (Vento 6 m/s a 0°)

4.3. STUDIO DEL RILASCIO CON DOMINI DIVERSI

Con l'obiettivo di comprendere quanto una descrizione più o meno accurata del campo di moto del vento influenzi di fatto la dispersione della nube e quale sia il miglior approccio da utilizzare per studiare il rilascio, si è deciso di mettere a confronto i risultati ottenuti tramite tre diverse simulazioni:

- A. Simulazione standard del rilascio con dominio classico (0) e profilo del vento uniforme;
- B. Simulazione del rilascio con dominio allargato e profilo del vento uniforme;
- C. Simulazione del rilascio con dominio classico (0), caratterizzata dall'imposizione di condizione al contorno di "Velocity Inlet" non più uniforme, come nella simulazione A, ma definita dall'importazione del profilo del vento atteso.

Quest'ultimo è quello ricavato dalla simulazione finalizzata allo studio del campo di moto del vento e avente come dominio allargato il Dominio 3 (+15 m). Per comprendere meglio come sia stato estrapolato questo profilo, sono stati riportati ad esempio i contour di velocità ottenuti nelle facce in corrispondenza dell'ingresso in piattaforma, per il caso di vento a 45° (Figura 4.20). Il file esportato dallo strumento di post-processing di ANSYS è stato poi elaborato mediante l'utilizzo di un codice Matlab creato ad hoc, col fine di selezionare le sole coordinate (e le rispettive componenti di velocità) appartenenti al dominio del deck. Le zone di interesse sono state evidenziate nei contour di velocità tramite un tratteggio in bianco. È anche fornita in Figura 4.21 un'immagine rappresentativa del profilo ottenuto e imposto come condizione al contorno nel Dominio 0.

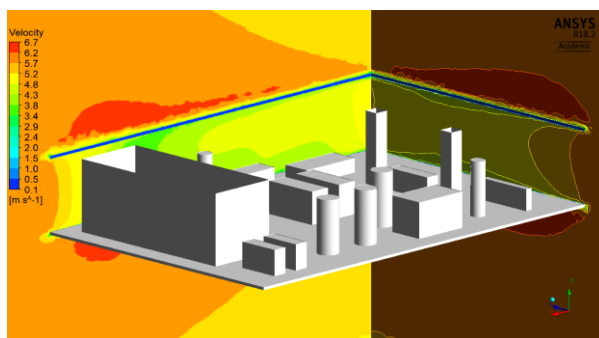


Figura 4.19 – Post-processing in Fluent: Contour di velocità sulle superfici adiacenti all'ingresso in piattaforma

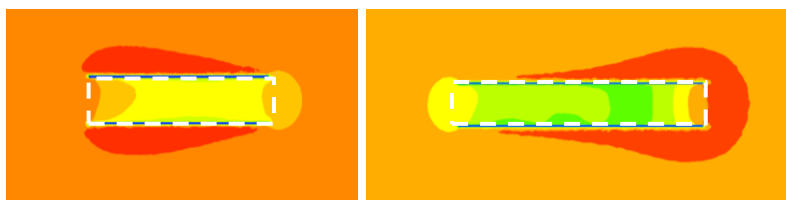


Figura 4.20 – Zone selezionate per l'estrazione dei profili di velocità (vento a 45°): faccia yz sulla sinistra, faccia xz sulla destra

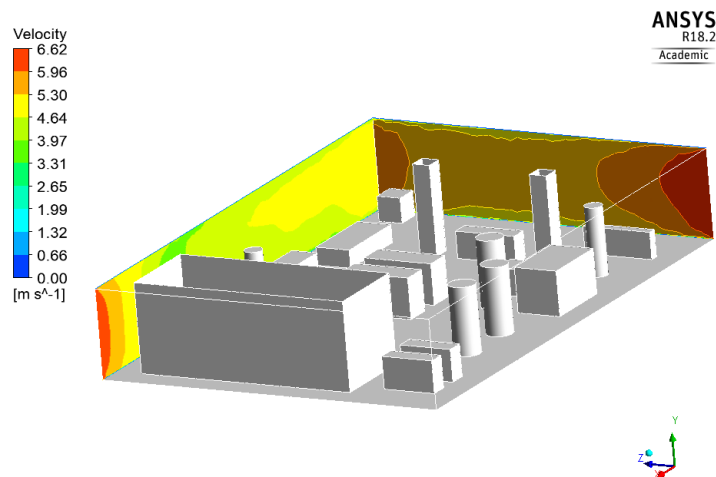


Figura 4.21 – Simulazione C: Dominio classico con profilo di vento importato

I confronti sono stati effettuati sui casi studio con la Source Box nelle posizioni 1 e 3, a tre diversi valori di pressioni di rilascio per entrambi i casi: $P_a = 30 \text{ bar}$, $P_b = 40 \text{ bar}$, $P_c = 50 \text{ bar}$.

Va sottolineato che per estrapolare i profili di velocità utilizzati nella simulazione C è stato utilizzato il Dominio 3 (+15 m): come già osservato, esso dà risultati molto simili a quelli ottenuti dal Dominio 2 (+10 m) ma leggermente più precisi. Tuttavia, per quanto riguarda la simulazione B, la necessità di trovare un compromesso tra accuratezza dei risultati e onere computazionale ha condotto alla scelta del Dominio 2 per via della migliore convergenza della soluzione che essa garantisce rispetto all'uso del Dominio 3: la simulazione con il rilascio è infatti molto più dispendiosa e non paragonabile a quella con solo vento. In ogni caso, si è potuto verificare che le differenze sono piccole e tali da non giustificare l'utilizzo di un dominio ancora più grande del 2, che renderebbe di fatto la simulazione più onerosa.

Il modello usato è il $k-\omega$ Standard in tutte le simulazioni. A mo' di esempio, si riportano per un unico caso studio le immagini delle aree e dei volumi di infiammabilità, che consentono di effettuare un confronto di tipo qualitativo.

Si osserva che per poter rappresentare le nubi di infiammabilità nel caso di dominio allargato è stato necessario definire una nuova variabile, che introducesse una restrizione geometrica al solo deck, unitamente alla selezione dei valori di frazione massica di metano nel range di infiammabilità.

$$\text{If } (abs(X) \leq 15 [m] \ \&\& \ Y \leq 5 [m] \ \&\& \ Y \geq 0 [m] \ \&\& \ abs(Z) \leq 10 [m] \ \&\& \ Ch4MoleFraction \geq 0.05 \ \&\& \ Ch4MoleFraction \leq 0.15, 1, 0)$$

Il rendering 3D della nube è stato ottenuto definendo un "Isovolume" che avesse in input la variabile precedentemente creata e prendesse come riferimento il valore 1.

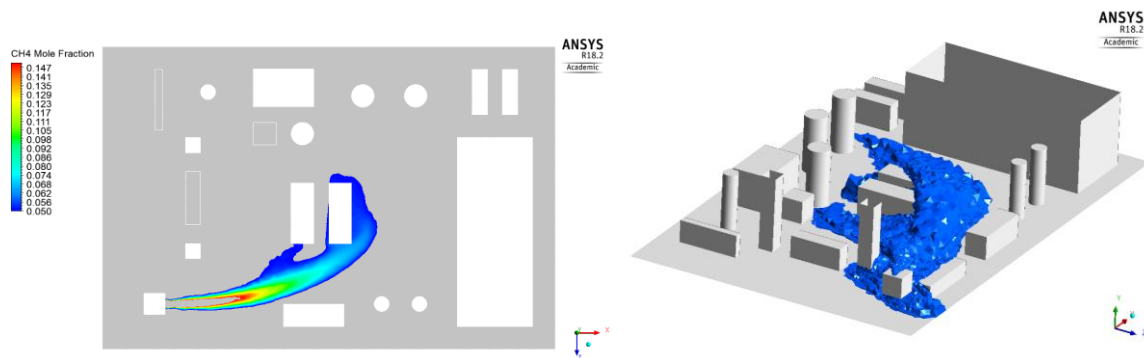


Figura 4.22 – Posizione 1, Pc, Simulazione A (Dominio 0 – Standard): Area e Volume di Infiammabilità

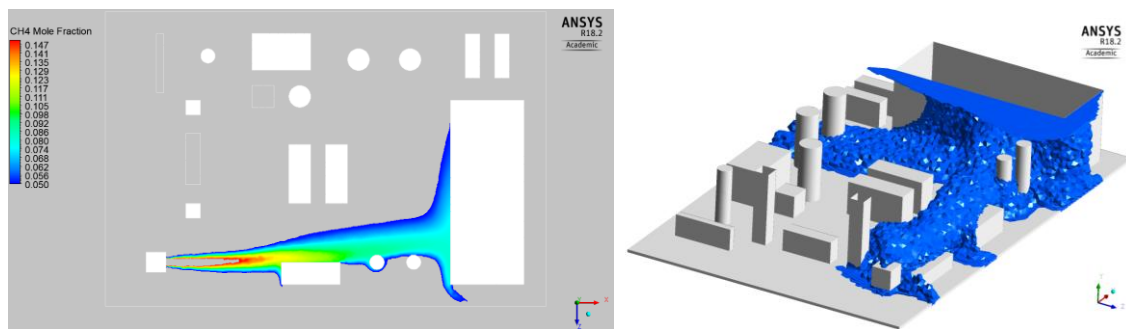


Figura 4.23 – Posizione 1, Pc, Simulazione B (Dominio 3): Area e Volume di Infiammabilità

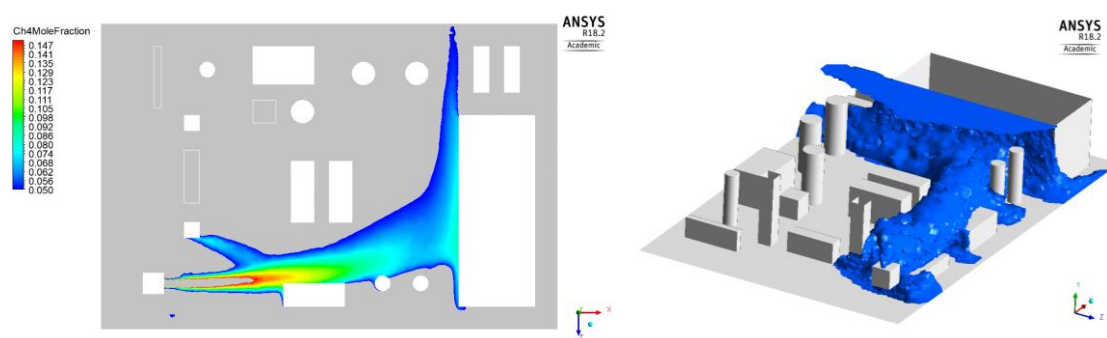


Figura 4.24 – Posizione 1, Pc, Simulazione C (Dominio 0 con profilo di velocità): Area e Volume di Infiammabilità

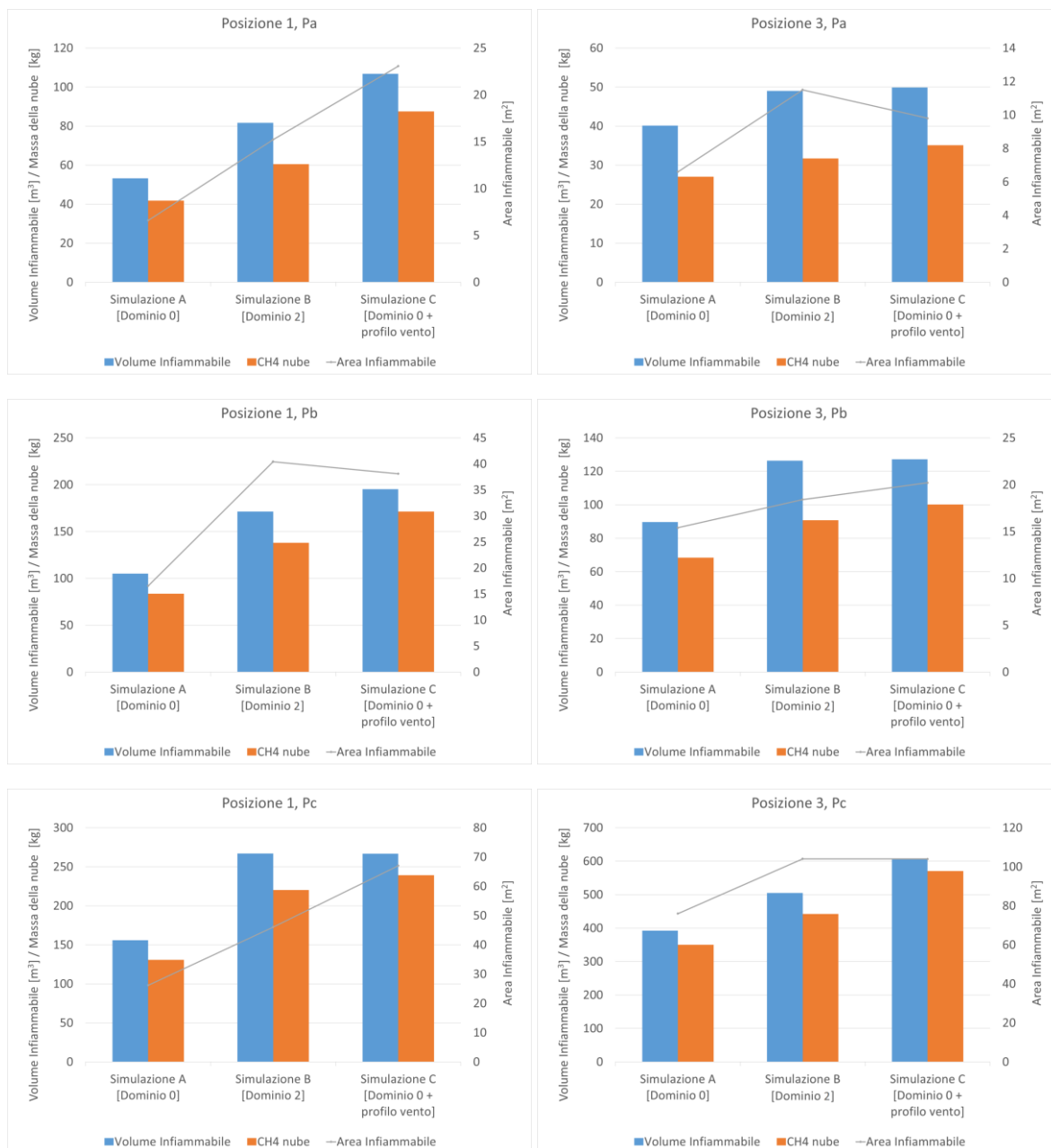
Nella Tabella 4.1 sono sintetizzati i principali risultati di interesse delle tre simulazioni, posti a confronto per tutti i casi analizzati.

		Volume Infiammabile [m ³]	CH ₄ nube [kg]	Area Infiammabile [m ²]
Posizione 1				
Pa	Simulazione A	53	42	7
	Simulazione B	82	60	15
	Simulazione C	107	88	23
Pb	Simulazione A	105	83	17
	Simulazione B	171	138	40
	Simulazione C	195	171	38
Pc	Simulazione A	156	131	26
	Simulazione B	246	199	43
	Simulazione C	266	239	67
Posizione 3				
Pa	Simulazione A	40	27	7
	Simulazione B	49	32	12
	Simulazione C	50	35	10
Pb	Simulazione A	90	68	15
	Simulazione B	126	91	18
	Simulazione C	127	100	20
Pc	Simulazione A	392	350	76
	Simulazione B	505	442	104
	Simulazione C	606	570	104

Tabella 4.1 – Risultati di interesse delle diverse simulazioni, a confronto

Infine, i grafici riportati a pagina seguente permettono di comparare quantitativamente i risultati delle diverse simulazioni. Tanto dal confronto qualitativo quanto da quello quantitativo, si evince come i casi in cui il campo di moto del vento è stato rappresentato in maniera più accurato (Simulazioni B e C) siano di fatto molto simili, mentre nelle simulazioni classiche (A), dove il campo di moto del vento è caratterizzato da valori maggiori della velocità, si ottengono zone di infiammabilità inferiori. Il caso più conservativo appare quello con il dominio classico e il profilo del vento estratto imposto in corrispondenza delle facce di ingresso in piattaforma. Tale simulazione è da preferirsi non soltanto per questa motivazione, ma anche perché la simulazione risulta meno onerosa e consente di ottenere un migliore infittimento della *mesh* nel deck, per via delle minori dimensioni del dominio.

Tutte le simulazioni finalizzate al confronto con le prove sperimentali, discusse nel prossimo capitolo, sono state quindi realizzate sulla base dell'approccio utilizzato nella simulazione C.



Grafici 4.5 – Confronto qualitativo dei risultati per le tre simulazioni, Posizione 1 a sinistra, Posizione 3 a destra

5. APPARATO SPERIMENTALE E SVOLGIMENTO DELLE PROVE

Con il fine di rispondere all'obiettivo finale di intraprendere la validazione del modello SBAM, sono state svolte diverse prove di rilascio nella galleria del vento SEASTAR-WT, situata presso l'Environment Park di Torino e ultimata ad inizio ottobre 2020. Prendendo parte alle fasi iniziali della sperimentazione nonché al commissioning della galleria stessa, il presente lavoro di tesi ha permesso di dare un contributo a:

- la selezione delle prove da realizzare in galleria del vento;
- l'analisi dei primi risultati, che hanno consentito di verificare il funzionamento del Mock-Up e della strumentazione presente e di rilevare problemi nella modalità di esecuzione dell'offset nei sensori;
- la fase di ripetizione delle prove, resa necessaria dall'inattendibilità dei valori ottenuti dalle prime prove svolte.

Per comprendere meglio il contesto in cui le prove sono state realizzate, nelle pagine che seguono si offre una descrizione tanto della galleria e del laboratorio in cui è essa collocata, quanto dell'apparato sperimentale funzionale allo svolgimento delle prove.

5.1. LABORATORIO SEASTAR WT

Il laboratorio adibito allo svolgimento delle prove sperimentali è situato presso l'Environment Park, dove si colloca il Centro di competenza SEASTAR.

Per la progettazione del laboratorio, importanti contributi provengono dai lavori di tesi di A. Tortora [32], che ha studiato le condizioni fluidodinamiche a cui è soggetta la piattaforma e N. Bono [33], il quale si è occupato della definizione del modello fisico in scala della piattaforma, scegliendo dimensioni, gas di rilascio e altri parametri funzionali.

L'ambiente di prova e tutti i componenti necessari sono stati progettati in modo da sottostare ad una serie di requisiti tecnico/funzionali atti al raggiungimento di alcuni obiettivi:

- La riproduzione di un ambiente con condizioni atmosferiche analoghe al caso reale, considerando tanto l'azione del vento quanto la presenza di ostacoli. In particolare, per la simulazione del flusso di vento si è resa necessaria la realizzazione di una galleria del vento, descritta più nel dettaglio nella sezione seguente;
- La realizzazione di un flusso di vento che deve investire completamente il Mock-Up, posizionato all'interno della galleria stessa;
- Il rilascio di gas in pressione simulato tramite un sistema di distribuzione, che deve essere opportunamente dimensionato.

Prima di entrare nel dettaglio degli elementi costitutivi della galleria, attenti dalle informazioni riportate nel progetto di massima del DIMEAS (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale) [34] e dal report sullo Stato di Avanzamento dei lavori [35] si riporta uno schema planimetrico del laboratorio in cui sono state svolte le prove.

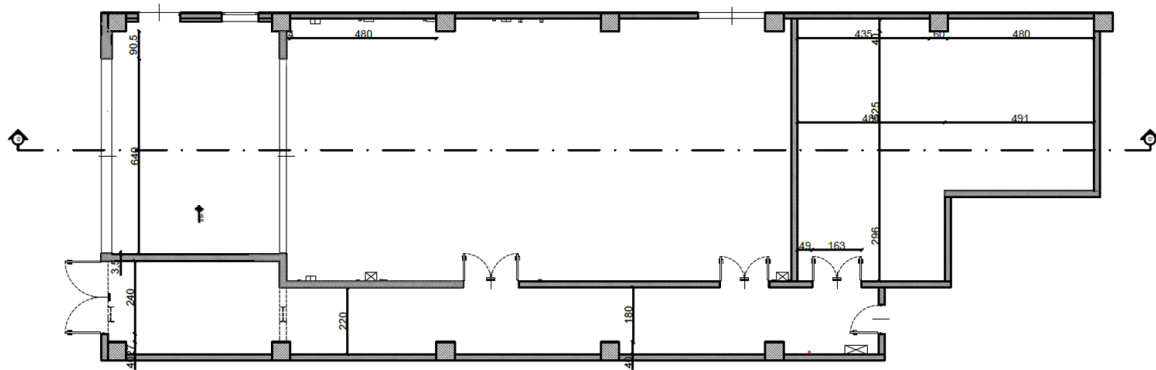


Figura 5.1 – Planimetria dei locali adibiti al laboratorio SEASTAR [36]

5.1.1. GALLERIA DEL VENTO

La galleria costruita nel laboratorio è di tipo subsonico, a ciclo aperto, caratterizzata da una potenza totale installata di circa 100 kW, che consente di realizzare un range di velocità dell'aria nella sezione di prova compreso tra 0 e circa 8 m/s.

Gli elementi che compongono la galleria del vento sono:

- Condotta convergente;
- Camera di prova;
- Condotta divergente;
- Vano ventilatori;
- Camera di rotazione del flusso;
- Cavedio.

La Figura 5.2 mostra uno schema della galleria ed evidenzia le dimensioni dei vari componenti. Si osserva in particolare che la sezione di prova misura 5 m di larghezza trasversale, 2,5 m di altezza e 6,30 m di profondità (nella direzione del flusso d'aria). Per maggiori dettagli tecnici dei singoli componenti si rimanda al progetto di massima del DIMEAS [34].

È importante evidenziare che l'aria non viene insufflata, bensì aspirata tramite 10 ventilatori posti a valle della camera di prova e disposti come in Figura 5.3. Tale scelta progettuale è stata legata principalmente a motivazioni di compatibilità con gli spazi preesistenti.

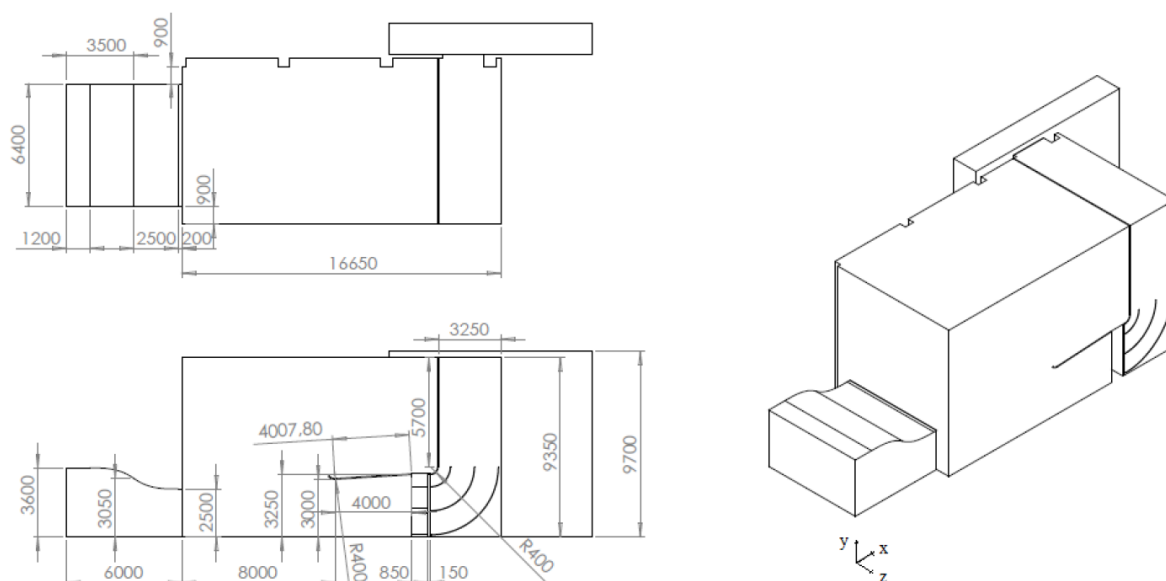


Figura 5.2 – Componenti e dimensioni della galleria del vento, [34]



Figura 5.3 – Disposizione dei ventilatori a valle della camera di prova

La figura che segue mostra una rappresentazione del funzionamento della galleria evidenziando un *contour* di velocità ottenuto da modellazione fluidodinamica del flusso di aria in galleria.

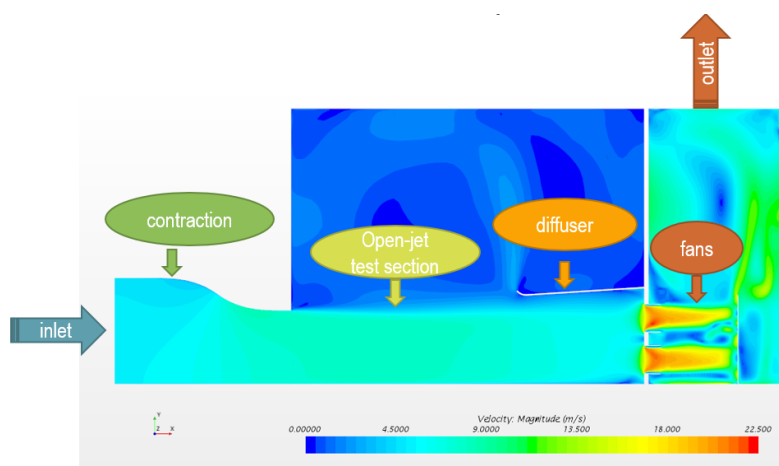


Figura 5.4 – Immagine tratta dallo studio mediante CFD del funzionamento della galleria, [37]

Benché a supporto della progettazione siano state effettuate simulazioni fluidodinamiche tramite l'utilizzo di codici commerciali quali ANSYS Fluent e Star CCM+, al termine della realizzazione della galleria si è reso necessario, come sempre accade, lo svolgimento della fase di caratterizzazione della galleria, con la quale verificare l'effettivo campo di moto prodotto: in generale, tutte quelle componenti strutturali definite solo schematicamente nel modello CFD potrebbero dar vita ad un campo di moto non del tutto conforme a quello previsto dalle simulazioni. Inoltre, questa fase è stata necessaria per la definizione della correlazione tra la frequenza degli inverter e le velocità raggiunte. La rampa di frequenza – velocità è stata definita tramite un set di prove realizzato posizionando un rake di tubi di Pitot in posizione centrale alla galleria. Le misure sono state effettuate dopo circa 15 minuti dall'accensione dei ventilatori, tempo necessario alla stabilizzazione del campo di moto. Si riporta l'andamento dei valori medi di velocità ottenuti facendo variare la frequenza da 5 Hz a 50 Hz, con passo pari a 5 Hz.

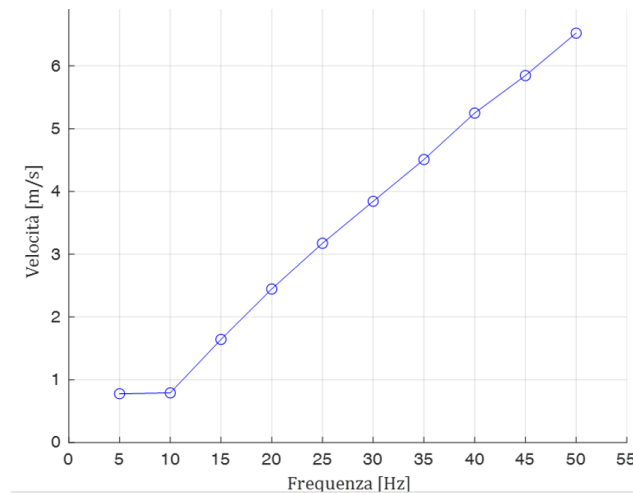


Grafico 5.1 — Rampa frequenze-velocità, [35]

Si osserva che, per un range di frequenze tra 10 Hz e 50 Hz, la relazione risulta praticamente lineare. Dalla rampa frequenza-velocità si desume che per ottenere una velocità media di 2,77 m/s (corrispondente ai 6 m/s del caso reale, come già commentato nella sezione 2.5) è necessario impostare i ventilatori alla frequenza di 22,9 Hz.

Dal momento che la presenza di oggetti in galleria del vento provoca una modifica del campo di moto, è stato necessario lo svolgimento di una verifica delle velocità ottenute in seguito all'inserimento del Mock-Up, essendo il campo di moto prodotto in quest'ultimo caso quello effettivamente presente durante lo svolgimento delle prove sperimentali. I risultati delle rilevazioni prima e dopo l'inserimento del Mock-Up, realizzate alla frequenza di 22,9 Hz, sono visibili nella figura seguente.

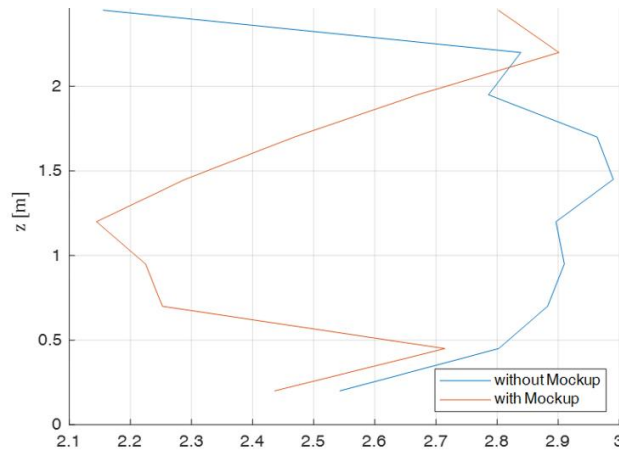


Grafico 5.2 – Risultato delle prove con e senza Mock-Up, [35]

Come ulteriore considerazione, è importante sottolineare che le misure effettuate mostrano uno scostamento percentuale nei valori di velocità su ciascun piano della camera di prova fino ad un massimo del 6% nelle zone centrali, laddove per le gallerie aeronautiche è prassi considerare accettabile uno scostamento percentuale massimo del 2-3%. Lo scostamento raggiunto è da considerarsi però normale nelle gallerie atmosferiche, dove la realizzazione di un campo di moto uniforme risulta più complesso per le basse velocità realizzabili. Di fatto le applicazioni della galleria SEASTAR-WT sono sostanzialmente diverse da quelle delle gallerie aeronautiche classiche, in cui si raggiungono valori maggiori di velocità. Se si considera inoltre che la galleria non è stata creata ad hoc ma è stata inserita in un contesto architettonico preesistente si comprende maggiormente come lo scostamento ottenuto sia già un ottimo risultato. Come ulteriore considerazione, si osserva che sarebbe opportuno procedere con la definizione delle frequenze di rotazione dei singoli ventilatori che siano in grado di rendere più uniforme il campo di moto, e quindi procedere nuovamente con la caratterizzazione della galleria.

5.2. DESCRIZIONE DEL SET-UP SPERIMENTALE

All'interno della galleria del vento è installato il Mock-Up, modello in scala della piattaforma, con dimensioni in pianta pari a $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ e altezza dell'interpiano di interesse pari a 50 cm . Gli elementi che lo compongono sono i seguenti:

- una “rotobase”, ovvero una base dotata di ruote e di piedi di livellamento;
- quattro colonne di sollevamento telescopiche;
- tre piani;
- otto colonne fisse;
- quindici box dotati di sensori, per un totale di 38 sensori di concentrazione e 9 sensori di velocità;
- una Source Box, con la quale viene simulato il rilascio del gas.

Una volta movimentato il Mock-Up in modo che venga investito dal vento nella direzione desiderata, il bloccaggio della struttura avviene per mezzo dei freni di cui sono dotate le ruote. In seguito al posizionamento della struttura, seguono le operazioni di “messa in bolla” e di regolazione dell’altezza tramite il movimento sincrono delle quattro colonne sollevatrici, collegate con un apposito cavo alla centralina. Essa è situata vicino al “rack di controllo”, la zona adibita al controllo elettronico e all’alimentazione del sistema della piattaforma. L’altezza dei piani da terra può essere variata da un minimo di 66 cm a un massimo di 105 cm. Nello specifico delle prove effettuate, il volume di interesse è stato posizionato nella mezzeria della camera di prova, alta 2,5 m: il posizionamento è quindi tale che la base del volume di interesse si trovi ad un’altezza di 1 m da terra.

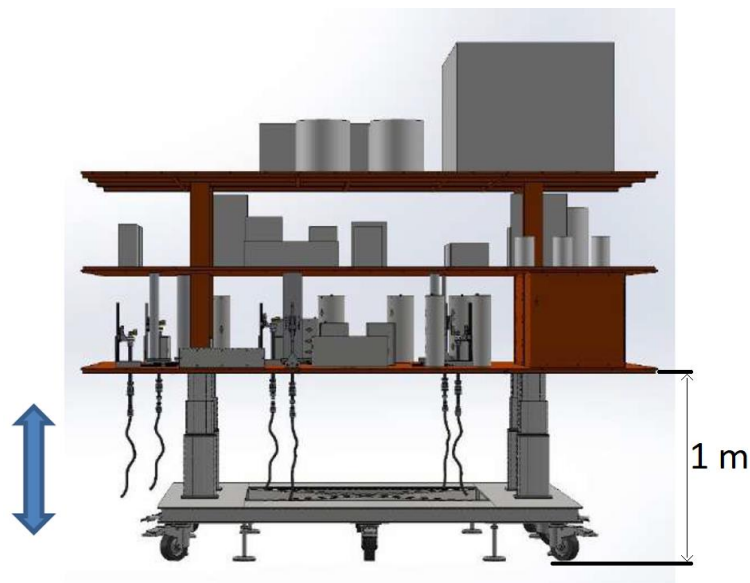


Figura 5.5 – Sollevamento del Mock-Up all’altezza adeguata alle prove



Mock-Up installato nella galleria del vento

Come si è già commentato più volte, il rilascio di gas viene effettuato grazie alla Source Box collegata alla linea di rilascio del gas mediante un tubo flessibile (visibile in Figura 5.7) e dotata di un ugello intercambiabile. Nello specifico, sono disponibili ugelli di diverse dimensioni (1 mm, 3 mm e 5 mm) che consentono di realizzare prove di rilascio coerenti con i diametri di rottura che si desiderano analizzare in sede di analisi di rischio. In base a quanto già esposto nel paragrafo 3.1, le prove sono state svolte con l'ugello di 3 mm.

Il rilascio del gas viene comandato mediante il software di controllo prodotto da Microla Optoelectronics e rilasciato contestualmente all'installazione del Mock-Up, il quale consente di impostare i vari parametri di interesse, tra cui la pressione di rilascio, e di monitorare le misure di velocità e di concentrazione del gas in galleria del vento.



Figura 5.6 – Sensori di concentrazione e di velocità installati sugli ostacoli

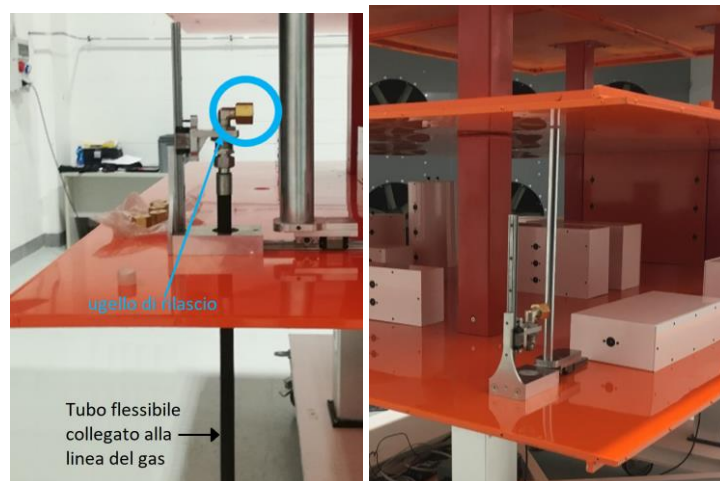


Figura 5.7 – Source Box: ugello di rilascio, tubo della linea del gas e posizionamento dell'ostacolo cilindrico

Come già descritto nella sezione 2.2.2, il dominio della Source Box nella modellazione CFD include anche l'ostacolo contro cui impatta il getto di rilascio prima che si diffonda sul resto

del deck. Anche nel Mock-Up è presente un ostacolo, disponibile nelle forme di piastra piana e di cilindro con diametro di diverse dimensioni (pari a 1 cm, 2 cm e 5 cm).

I sei punti del piano in cui sono stati predisposti i fori per l'inserimento della Source Box, rappresentati in Figura 5.8, consentono di realizzare varie configurazioni di rilascio, con l'ulteriore possibilità di rotazione della Source Box in specifiche direzioni.

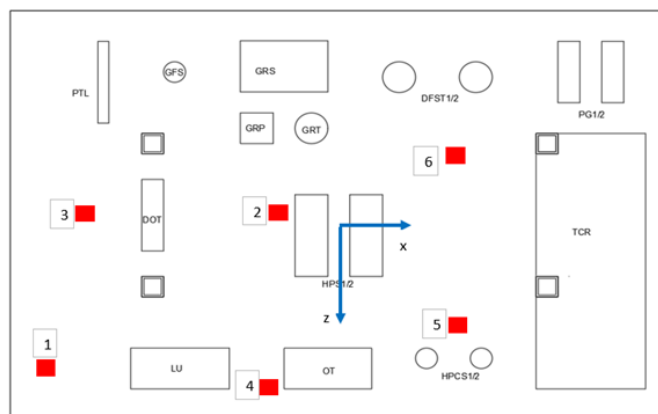


Figura 5.8 – Layout della piattaforma con l'identificazione delle 6 possibili posizioni della Source Box

In Figura 5.9 è visibile una mappatura dei sensori sugli ostacoli, i quali permettono di monitorare la distribuzione del gas e le distribuzioni di velocità: in arancione i sensori di concentrazione, in celeste quelli di velocità. Inoltre, quasi tutti gli ostacoli possono essere ruotati in modo da consentire l'esposizione al rilascio della faccia sensorizzata.

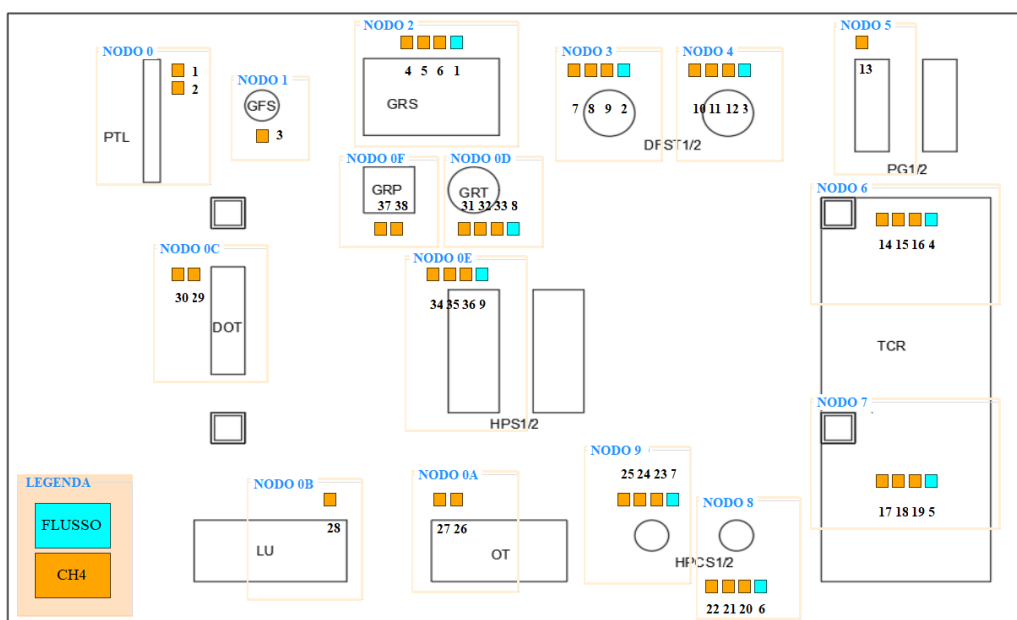


Figura 5.9 – Distribuzione dei sensori di concentrazione e velocità

È opportuno sottolineare che per ragioni di sicurezza non si è potuto effettuare un rilascio di gas naturale puro, pertanto la scelta del gas è ricaduta su una miscela di aria e CH₄ al

2,2% in volume, appositamente prodotta da Linde S.p.A. Il setup della prova ha previsto l'utilizzo di 5 bombole di gas da 50 litri a 150 bar collegate in parallelo. Per quanto difficoltosa potesse rivelarsi la rilevazione del metano in piattaforma (vista la sua estrema rarefazione nella miscela), si è potuto in realtà constatare che il fondoscala dei sensori scelti risulta adeguato a cogliere anche basse percentuali di CH₄.

5.3. RIEPILOGO DELLE PROVE SVOLTE

Come già anticipato nella descrizione dei casi studio nel capitolo 3, la necessità di effettuare rilasci che consentano la rilevazione di una buona concentrazione di gas in determinate posizioni ha portato all'esclusione delle prove che prevedessero una rapida dispersione del gas senza investire ostacoli (caso poco interessante anche in materia di sicurezza), condizionando di fatto la scelta della posizione della Source Box, degli ostacoli e delle loro facce sensorizzate.

I parametri caratteristici di ciascuna prova sono:

- Posizione della Source Box
- Altezza della Source Box
- Direzione e velocità del vento
- Diametro dell'ugello
- Pressione di rilascio

Si ricorda che le geometrie presenti sul set sperimentale sono scalate di un fattore 1:10 rispetto alle dimensioni reali e che le velocità del vento e le pressioni di rilascio in sede di sperimentazione rispondono alle regole di scalatura descritte nella sezione 2.5. Sono state selezionate cinque diverse posizioni del rilascio (descritte nel capitolo 3.2), considerate le più rappresentative per via della maggiore esposizione al vento che rende lo sviluppo della nube rilevabile in tutta la piattaforma. Anche la scelta della direzione del vento risponde a questa finalità, mentre l'intensità di 2,77 m/s è quella che, sulla base delle regole di scalatura, corrisponderebbe alla velocità di 6 m/s nel caso reale. Tutte le prove sono state effettuate con un ugello di 3 mm e l'ostacolo in prossimità del rilascio è un cilindro di diametro pari a 2 cm posto a 3 cm di distanza dal rilascio. Va sottolineato ancora una volta che in tale scelta si è dovuto tener conto non solo degli ugelli e degli ostacoli a disposizione per le prove sperimentali, ma anche di questioni strettamente legate all'effetto di tali scelte sull'efflusso di gas prodotto. Inoltre, in Tabella 5.1 sono sintetizzate le corrispondenze fra pressione reale dei rilasci full scale (simulati in ANSYS Fluent) e pressione scalata in laboratorio.

	Pressione di rilascio full scale	Pressione di rilascio scalata
P_a	30 bar	6,4 bar
P_b	40 bar	8,5 bar
P_c	50 bar	10,6 bar

Tabella 5.1 – Corrispondenza fra pressione reale e pressione scalata in laboratorio

Le configurazioni scelte per le prove sono ovviamente coerenti con le simulazioni svolte in ANSYS Fluent. Nella tabella che segue è presente un riepilogo delle prove effettuate.

POSIZIONE RILASCIO	Vento	Rilascio		Prova n.
		Direzione	Pressione	
1	<i>6 m/s a 45° f.s. 2,77 m/s a 45° s.s.</i>	$\vec{x}$	P _a	1
			P _b	2
			P _c	3
2	<i>Vento 6 m/s a 45° f.s. 2,77 m/s a 45° s.s.</i>	$\vec{x}$	P _a	4
			P _b	5
			P _c	6
	<i>6 m/s a 0° f.s. 2,77 m/s a 0° s.s.</i>	$\vec{x}$	P _a	7
			P _c	8
3	<i>6 m/s a 0° f.s. 2,77 m/s a 0° s.s.</i>	$\vec{x}$	P _a	9
			P _b	10
			P _c	11
4	<i>6 m/s a 45° f.s. 2,77 m/s a 45° s.s.</i>	$-\vec{z}$	P _a	12
			P _c	13
5	<i>6 m/s a 45° f.s. 2,77 m/s a 45° s.s.</i>	$-\vec{z}$	P _a	14
			P _b	15
			P _c	16
	<i>12 m/s a 45° f.s. 5,54 m/s a 45° s.s.</i>	$-\vec{z}$	P _a	17

Tabella 5.2 – Riepilogo dei casi studio – f.s.: full scale; s.s.: small scale

Si osserva che l'ordine con cui sono stati indicati i diversi casi studio differisce dall'ordine temporale di esecuzione delle prove. Quest'ultimo è stato di fatto funzionale ad una minimizzazione delle modifiche al setup sperimentale, in modo da garantire la comparabilità dei risultati da prova a prova.

6. ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI

Con l'obiettivo di realizzare un confronto con le previsioni delle simulazioni CFD, vengono qui esposti i risultati delle rilevazioni di velocità e di concentrazione di gas, effettuate con uno specifico passo temporale e monitorate grazie all'ausilio del software di controllo. Esso consente di visualizzare in fase di test l'andamento in tempo reale delle misurazioni di due sensori precedentemente selezionati, offrendo un'idea della qualità della prova, almeno dal punto di vista della stabilità delle rilevazioni nel tempo.

I dati raccolti a fine prova consentono di visualizzare gli andamenti delle grandezze d'interesse per ogni sensore e di ottenere quindi una valutazione della durata del transitorio iniziale. Si osserva che la stabilità degli andamenti delle grandezze nel tempo dipendono principalmente dalle concentrazioni di gas raggiunte, nella cui misurazione gioca un ruolo fondamentale la sensibilità dei sensori.

Occorre rimarcare che nelle simulazioni CFD non è stato effettuato alcuno studio del transitorio, non necessario per i fini della sperimentazione. Pertanto, nel comparare i dati a disposizione è stato necessario concentrare l'attenzione sulle rilevazioni successive al raggiungimento dello stato stazionario.

L'analisi dei risultati ha coinvolto l'utilizzo di due strumenti principali: Matlab ed Excel. Come prima operazione, i dati raccolti nelle prove sperimentali sono stati elaborati in modo da renderli fruibili al confronto con i dati delle simulazioni, contenenti valori puntuali univoci nel tempo. È stato necessario valutare il valore medio e la deviazione standard dei valori rilevati da ciascun sensore, prendendo in considerazione soltanto gli ultimi 40 s del rilascio, in modo da evitare le misurazioni relative al transitorio del PID (sistema di regolazione della pressione). Ciò ha permesso di ottenere un unico valore per ciascun sensore, con il relativo errore, e di valutare quindi la corrispondenza tra i dati sperimentali e quelli simulati, tramite un'opportuna normalizzazione degli andamenti rispetto al valor medio di ciascun set di dati. L'errore così definito non tiene conto dell'incertezza degli strumenti di misura, che andrebbero integrati nello studio.

I dati analizzati dalle prime prove effettuate hanno mostrato la presenza di un problema nella modalità di rilevazione delle concentrazioni di metano, evidenziando così la necessità di una ripetizione delle prove. Tale questione verrà approfondita nella sezione 6.2, dove verranno anche introdotte le simulazioni CFD in scala utilizzate per avere conferma dello scostamento dei valori assoluti delle concentrazioni misurate rispetto al livello di concentrazioni atteso.

Si riportano nel seguito della trattazione alcune delle elaborazioni ottenute dal primo set di prove sperimentali, concentrando l'attenzione sulle anomalie emerse negli andamenti normalizzati che hanno permesso di individuare il problema alla base. In seguito alla sua risoluzione, le prove sono state ripetute: vengono quindi discussi più nel dettaglio alcuni dei risultati ottenuti da questo secondo set di dati.

6.1. RISULTATI DEL PRIMO SET DI PROVE

Si riportano qui alcuni dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati sperimentali derivanti dal primo set di prove. In particolare, si mostrano i confronti tra gli andamenti normalizzati ottenuti nelle prove con la Source Box nelle posizioni di rilascio 1, 2 e 3, senza soffermarsi sui valori assoluti delle concentrazioni ottenuti in ciascuna prova poiché questi, come si è potuto comprendere grazie all'analisi dei risultati, non danno alcuna rappresentazione dei valori reali, ma corrispondono agli scostamenti da specifici valori di riferimento di cui non è stato possibile tenere traccia nel corso del primo set di prove.

6.1.1. POSIZIONE 1, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.

Come già indicato in Tabella 5.2, i rilasci effettuati in sede sperimentale con la Source Box in posizione 1 (prove 1, 2, 3) sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente a 45° con intensità pari a 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Prima di entrare nel dettaglio delle concentrazioni misurate nelle varie prove, si riportano per un unico caso studio (rilascio a 30 bar) gli andamenti normalizzati delle velocità rilevate sperimentalmente, a confronto con quelle ottenute dalle simulazioni CFD full-scale. Andamenti simili sono ottenuti nelle due prove con rilasci a pressione maggiore.

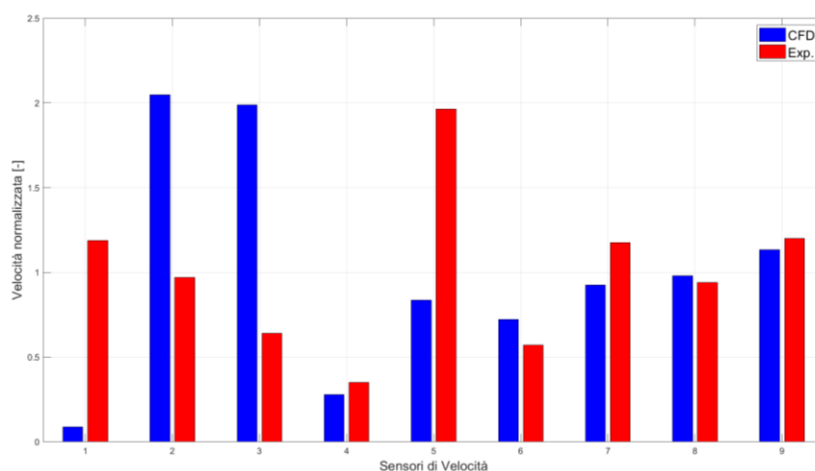


Grafico 6.1 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pa

Gli andamenti a confronto tra le velocità mostrano alcuni scostamenti che possono essere legati a motivazioni diverse. In particolare, va evidenziato il fatto che i sensori di velocità sono localizzati molto vicino alle pareti degli ostacoli: nella modellazione CFD è stata fatta l'assunzione forte di "no-slip condition" a parete poiché questa consente di ottenere un ottimo compromesso tra accuratezza della soluzione e tempo computazionale; tuttavia, tale condizione semplificativa non consente di ottenere una buona descrizione della più complessa interazione fluido-parete che si realizza nella realtà. Inoltre, non è stato condotto

alcuno studio sulla rugosità superficiale delle superfici, pertanto si comprende maggiormente l'approssimazione effettuata nella rappresentazione dello strato limite. Tale considerazione è di carattere generale e risulta valida per tutti i risultati analizzati in questo lavoro. Con il fine di effettuare un confronto con valori di velocità più significativi, i sensori andrebbero quindi posti a maggiore distanza dalle pareti, in modo da garantire una misura all'esterno dello strato limite.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

Si riportano di seguito gli andamenti normalizzati delle concentrazioni misurate, a confronto con i valori normalizzati risultanti dalle simulazioni CFD.

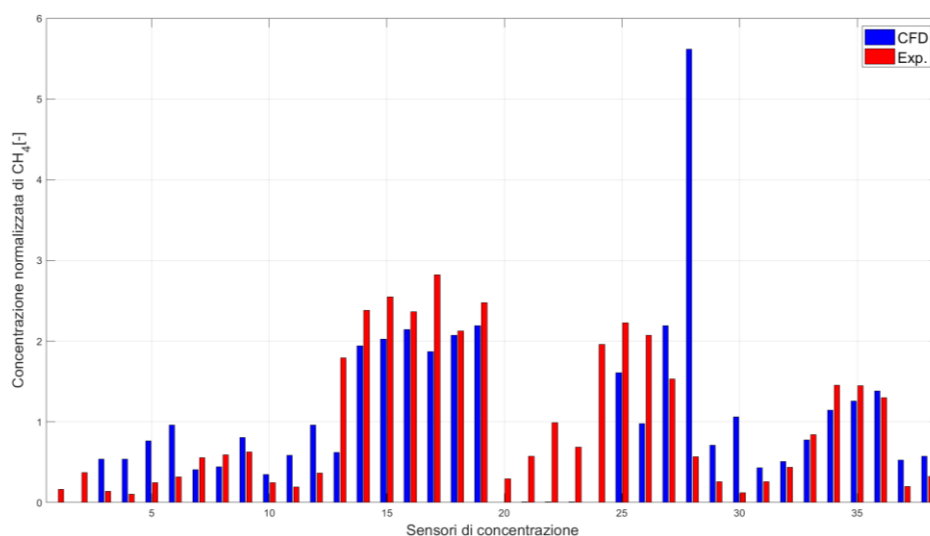


Grafico 6.2 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pa

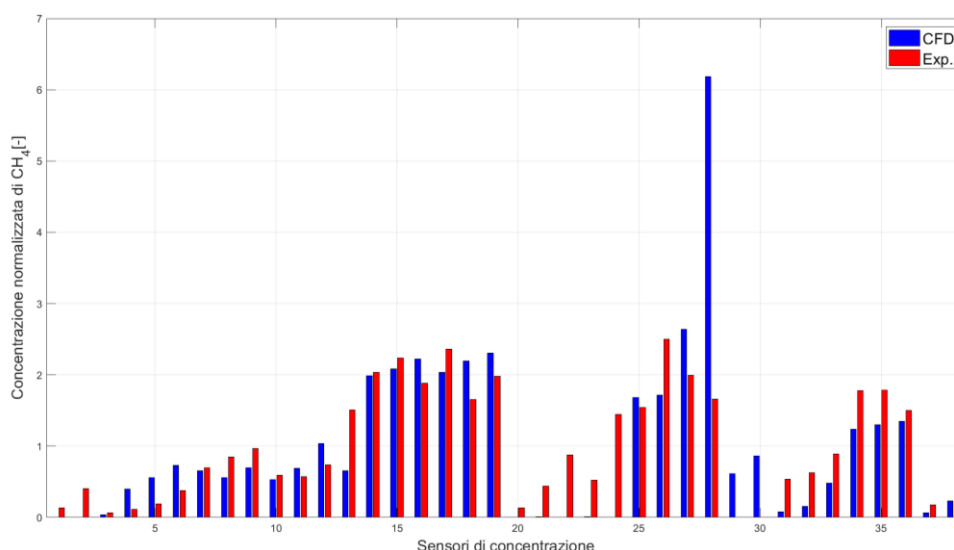


Grafico 6.3 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pb

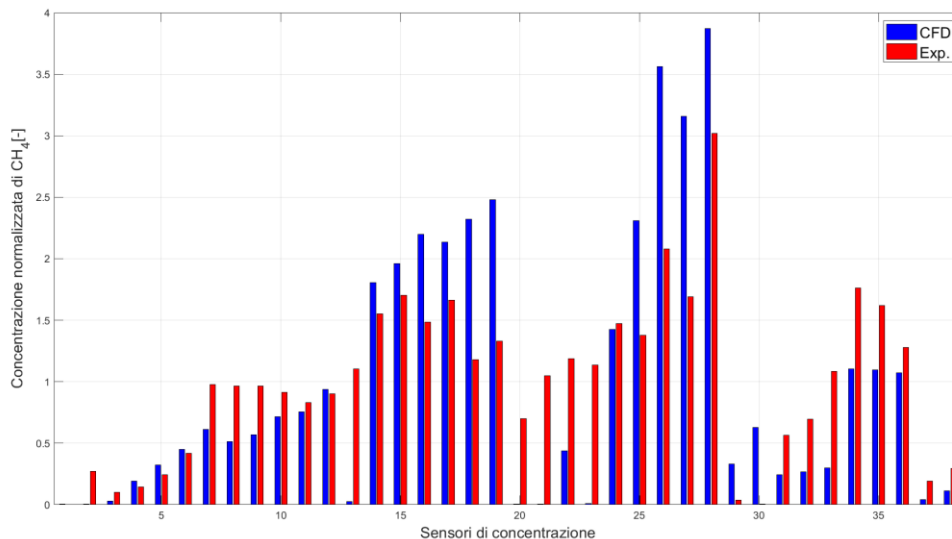


Grafico 6.4 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_c

Dall’osservazione degli andamenti normalizzati a confronto si è potuto osservare in tutti i casi una sostanziale corrispondenza tra i due set di dati. La più evidente anomalia è stata rilevata nelle prove 1 e 2 in corrispondenza del sensore 28, il più vicino alla posizione di rilascio. Inizialmente si è ipotizzato che una motivazione potesse essere rinvenuta in un disturbo nella rilevazione da parte del sensore nelle immediate vicinanze del rilascio, dove l’efflusso di gas è elevato. Tuttavia, tale disturbo sembrava non presentarsi nella prova di rilascio alla pressione maggiore P_c. La ricerca della causa ha condotto all’esecuzione di ulteriori prove di rilascio frontalmente ad uno specifico sensore: i risultati ottenuti hanno mostrato ancora una volta discrepanze con i livelli di concentrazione attesi.

La reale causa, resa evidente anche dalle prove sugli altri casi studio che verranno illustrati nel seguito, è stata poi rinvenuta nella modalità con cui viene effettuato l’offset nelle rilevazioni dei sensori. Si tratta di un aspetto non chiarito al momento delle prove iniziali e che ha condotto ad un approfondimento ulteriore, di cui si parlerà nel paragrafo 6.2.

Riguardo alle concentrazioni rilevate invece nei sensori dal 20 al 24, corrispondenti ad una zona in cui le simulazioni CFD non mostrano concentrazioni apprezzabili di metano, sono state individuate due possibili cause, analizzate di seguito. Dal confronto tra gli andamenti di velocità mostrati nel Grafico 6.1 si osservano alcuni scostamenti dai valori attesi. In particolare, il fatto che nel sensore 5 siano state rilevate velocità notevolmente superiori a quelle nei sensori 1 e 2 (contrariamente a quanto previsto dalla CFD), potrebbe dare una possibile spiegazione delle differenze rilevate nelle concentrazioni. Guardando la mappa dei sensori in Figura 6.1, in cui le frecce indicano lo scostamento dei valori misurati rispetto a quelli attesi, si può ipotizzare che le maggiori concentrazioni di metano rilevate in corrispondenza dei nodi 8 e 9 derivino da una deflessione del vento in quella direzione, rispetto alla simulazione fluidodinamica. Tuttavia, per le considerazioni fatte precedentemente sull’attendibilità dei valori di velocità in prossimità della parete, non è possibile avere una reale rappresentazione del campo di moto generato nella galleria del vento. Va rilevato inoltre che anche il posizionamento della piattaforma, reso difficoltoso

dal peso della struttura, gioca un ruolo non trascurabile nella qualità del campo di moto realizzato nel volume all'interno del mock-up. Un'altra possibile causa potrebbe essere legata ad errori dovuti ad un imperfetto direzionamento del getto rispetto all'ostacolo: una deviazione del getto rispetto al centro dell'ostacolo potrebbe avere ripercussioni sulla distribuzione del gas sulla piattaforma stessa. Tuttavia, il fatto che si evidenzia tale scostamento anche nel secondo set di prove (come visibile nella sezione 6.3.1.), in seguito a varie movimentazioni tanto del mock-up quanto dell'ugello, porta ad escludere che il getto sia stato mal direzionato.

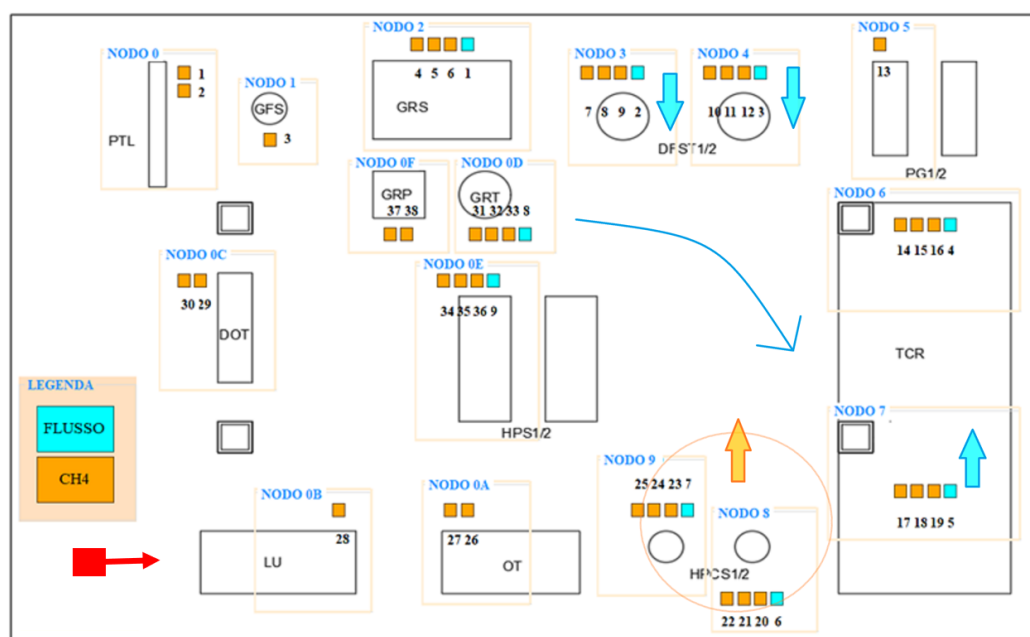


Figura 6.1 – Mappa dei sensori per il rilascio in Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., con indicazione degli scostamenti dei dati sperimentali rispetto alla CFD nei nodi 8 e 9 (freccie verso l'alto per scostamenti positivi, e viceversa)

6.1.2. POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.

I rilasci effettuati nelle prove 4, 5 e 6 con la Source Box in posizione 2 sono caratterizzati dalla presenza di vento alla velocità di 2,77 m/s con inclinazione a 45°.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Il Grafico 6.5 riporta per il caso a pressione P_a un raffronto tra le velocità rilevate e quelle ottenute dalle simulazioni CFD, in seguito alla normalizzazione rispetto al valor medio. Andamenti molto simili sono stati trovati per le prove di rilascio a pressione maggiore. Valgono per questi andamenti le stesse osservazioni già fatte per il rilascio in Posizione 1. Le velocità normalizzate rilevate nei sensori 2 e 3 sono inferiori a quelle previste dalla simulazione CFD, mentre in 1 e in 5 i valori sperimentali risultano decisamente maggiori. Dal momento che sia questo caso studio sia quello in posizione 1 sono caratterizzati dallo stesso vento e le distribuzioni di velocità sono molto simili, si può affermare che le velocità del vento rilevate sui sensori risultano poco influenzate dal rilascio (se si escludono zone in prossimità dello stesso). Questo suggerisce che le differenze negli andamenti siano legate principalmente al campo di moto: pur tenendo conto delle considerazioni già fatte sul

posizionamento dei sensori all'interno dello strato limite, la distribuzione di velocità del vento ricreata in galleria non sembra rispecchiare completamente quella prevista dalla CFD.

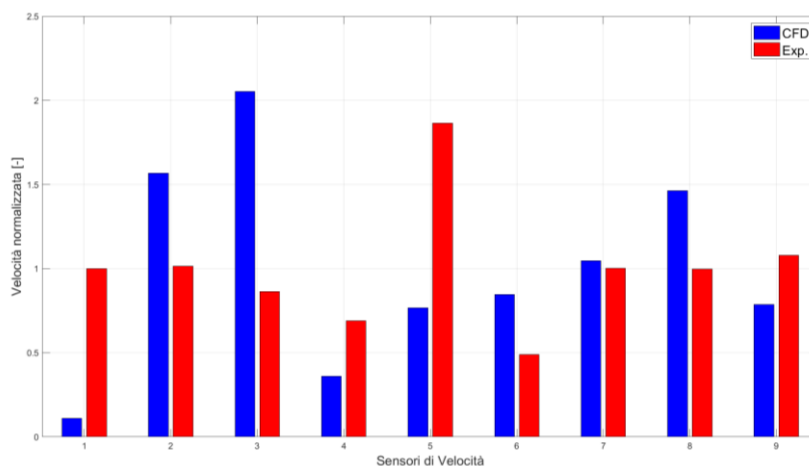


Grafico 6.5 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pa

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

Si riportano qui gli andamenti normalizzati delle concentrazioni misurate, a confronto con quelli risultanti dalle simulazioni, per due diversi valori di pressioni di rilascio.

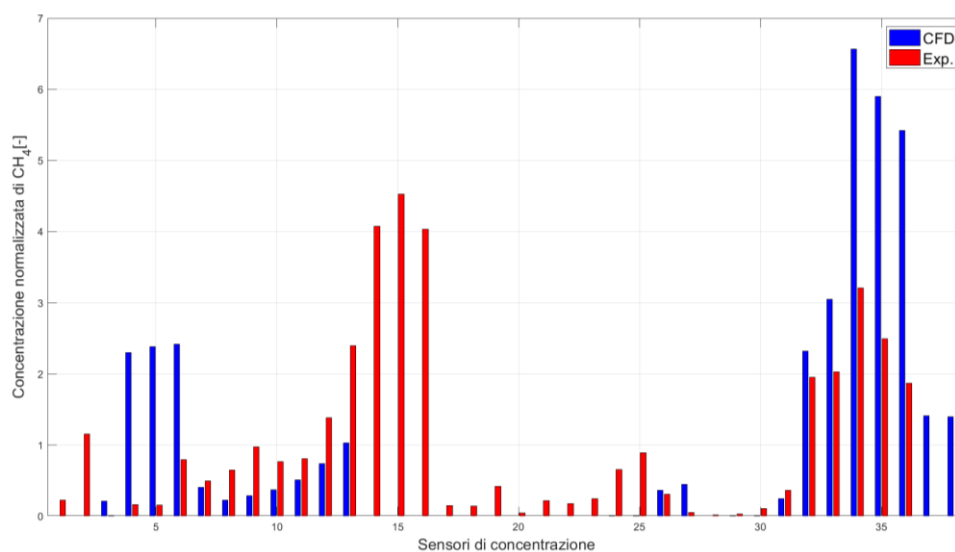


Grafico 6.6 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pa

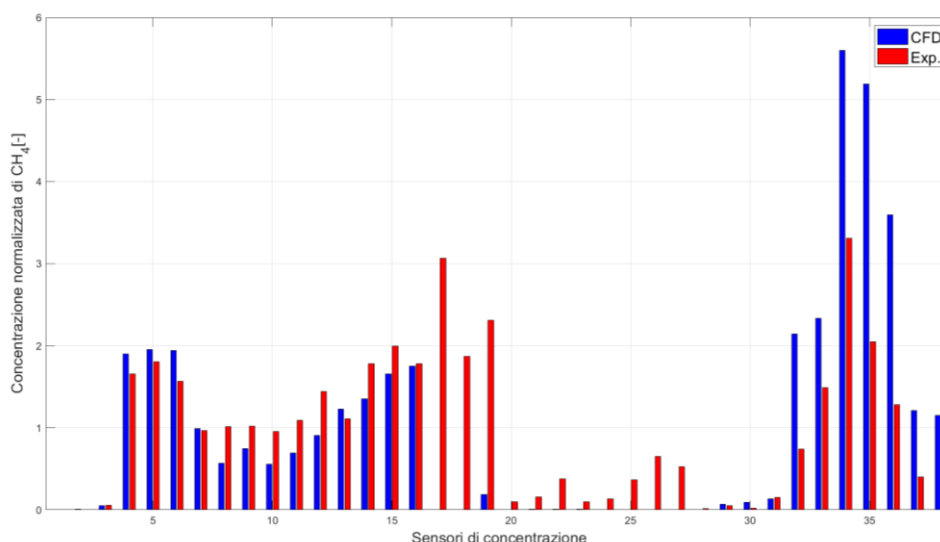


Grafico 6.7 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_c

Anche in questo caso i risultati mostrano un ottimo accordo nel caso alla pressione più elevata (P_c), dove sono pochi i sensori che hanno registrato valori molto diversi da quelli attesi: si tratta dei sensori 17, 18 e 19.

I risultati alle pressioni inferiori mostrano un maggior numero di rilevazioni in disaccordo con i valori estrapolati dalle simulazioni fluidodinamiche. A valori di pressione inferiori appare più complesso comprendere la reale distribuzione della nube: per quanto ciò possa essere dovuto ad errori tendenzialmente maggiori nella rilevazione di concentrazioni più basse, la motivazione più plausibile in questo caso è rinvenibile nella modalità di esecuzione dell'offset nei sensori di concentrazione, come si evidenzierà in maniera più approfondita nel seguito della trattazione.

In questo caso le rilevazioni sperimentali mostrano concentrazioni di metano inattese in corrispondenza dei nodi 7, 8 e 9 (si veda qui ancora la mappa dei sensori in Figura 6.1): Facendo inoltre riferimento alle considerazioni già fatte per il Grafico 6.5 si può ipotizzare che tali rilevazioni derivino da una deflessione della nube rispetto alla simulazione fluidodinamica. Per il rilascio in posizione 1, si era commentato che un'ulteriore causa potrebbe risiedere in un imperfetto direzionamento del getto rispetto all'ostacolo. Tuttavia, il fatto che la stessa anomalia si verifichi per un rilascio in posizione diversa consente di scartare tale ipotesi.

6.1.3. POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.

Come già indicato in Tabella 5.2 i rilasci effettuati nelle prove 7 e 8 con la Source Box in posizione 2 sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente frontalmente alla piattaforma alla velocità di 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

In questa sezione i valori normalizzati delle concentrazioni misurate sono posti a confronto con i valori normalizzati risultanti dalle simulazioni CFD.

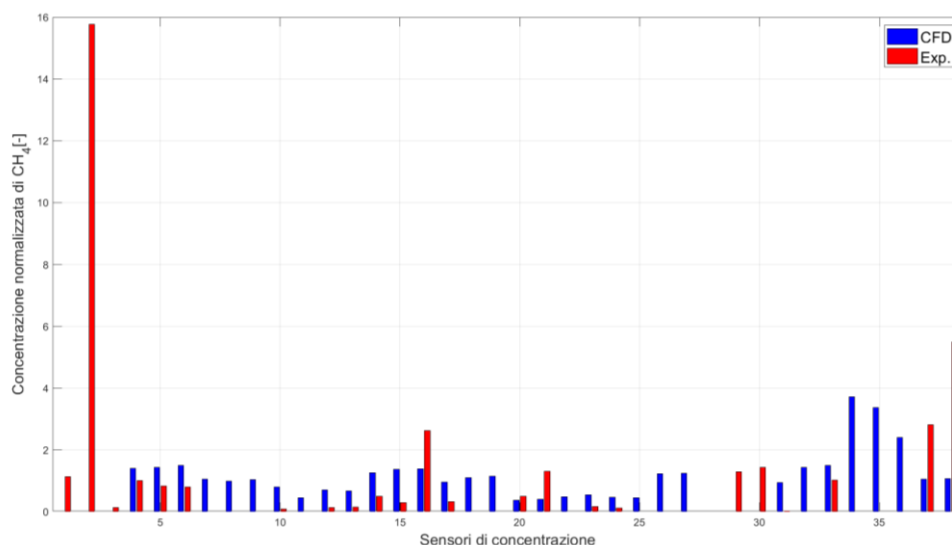


Grafico 6.8 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_a

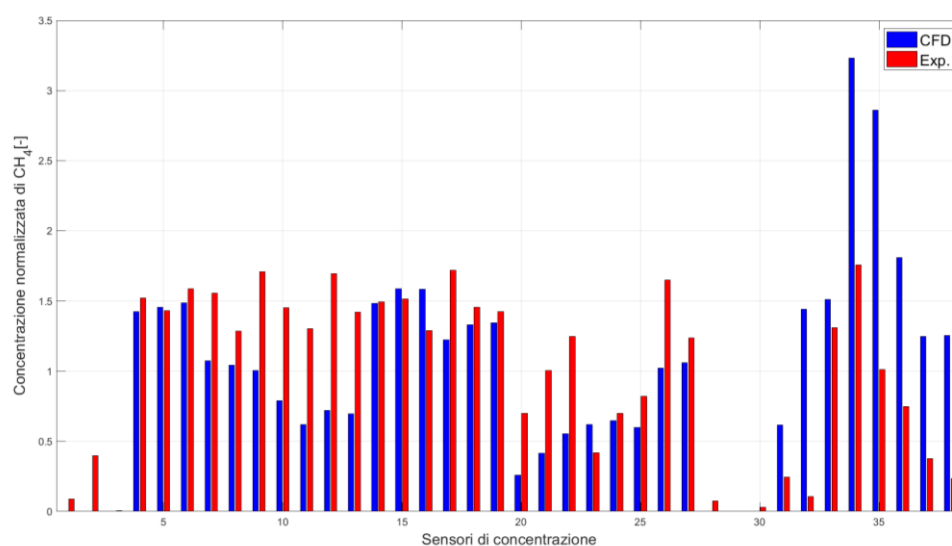


Grafico 6.9 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

Anche in questo caso i risultati mostrano un ottimo accordo nel caso alla pressione più elevata (P_c). Gli andamenti normalizzati nel caso a pressione P_a mostrano invece un'evidente anomalia nelle rilevazioni. Non facendo riferimento ai valori assoluti, il Grafico 6.8 non è stato in grado di spiegare se questo disaccordo tra i dati fosse dovuto principalmente alle rilevazioni nel sensore 2, dove si raggiunge un picco altissimo rispetto agli altri valori, o se fosse legata alle concentrazioni misurate in tutti gli altri sensori. Come

è possibile constatare da un'osservazione dei valori evidenziati in rosso in Tabella 6.1, la causa dell'andamento ottenuto è imputabile a un problema nelle rilevazioni in tutta la piattaforma: i valori irrealistici registrati hanno dato ulteriore conferma della problematica ipotizzata. Va comunque specificato che andamenti simili, in cui vengono rilevati valori molto bassi o nulli, sono stati evidenziati in altri casi studio non riportati nel corso della trattazione.

Pressione di rilascio:	P_a	P_c
Media Conc. CFD [ppm]	46882	39997
Max Conc. CFD [ppm]	174490	223830
Media Conc. Exp [ppm]	2	128
Max Conc. Exp [ppm]	25	425

Tabella 6.1 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

6.1.4. POSIZIONE 3, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.

Come mostrato in Tabella 5.2, i rilasci effettuati nelle prove 9, 10 e 11 con la Source Box in posizione 3 sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente frontalmente alla piattaforma alla velocità di 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Si riportano qui i grafici del raffronto delle velocità normalizzate per il rilascio a 30 bar.

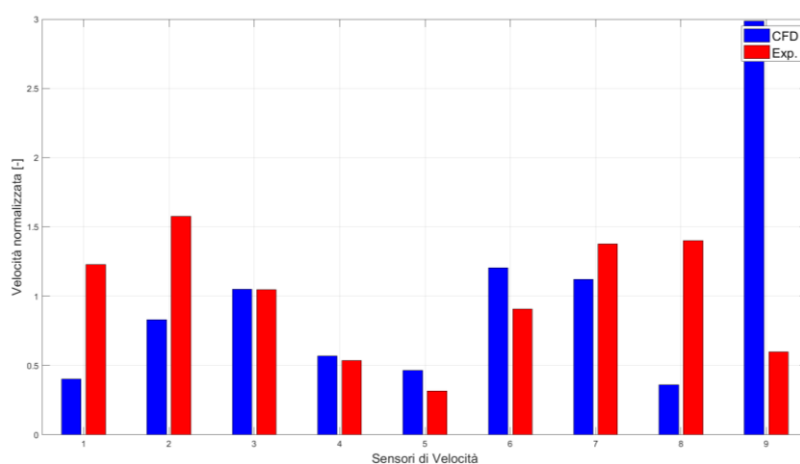


Grafico 6.10 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_a

La massima velocità attesa è quella in corrispondenza del sensore 9, essendo questo disposto frontalmente alla direzione del getto. Tuttavia, in tutte e tre le prove, la velocità qui rilevata è molto inferiore a quella prevista. Al contrario, nei sensori 1, 2 e 8 si osservano velocità maggiori di quelle attese e, comunque, superiori alla velocità rilevata nel sensore 9. Lo scostamento in quest'ultimo sensore appare così evidente da non poter essere

giustificato con il solo posizionamento dei sensori all'interno dello strato limite. La motivazione più probabile del disaccordo tra gli andamenti potrebbe risiedere in un errore di direzionamento del getto, che risulterebbe deviato verso sinistra.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

Dal momento che gli andamenti di concentrazioni rilevati nei casi alle tre diverse pressioni sono molto simili, si riporta di seguito il confronto tra i valori normalizzati per il solo caso a pressione maggiore (P_c).

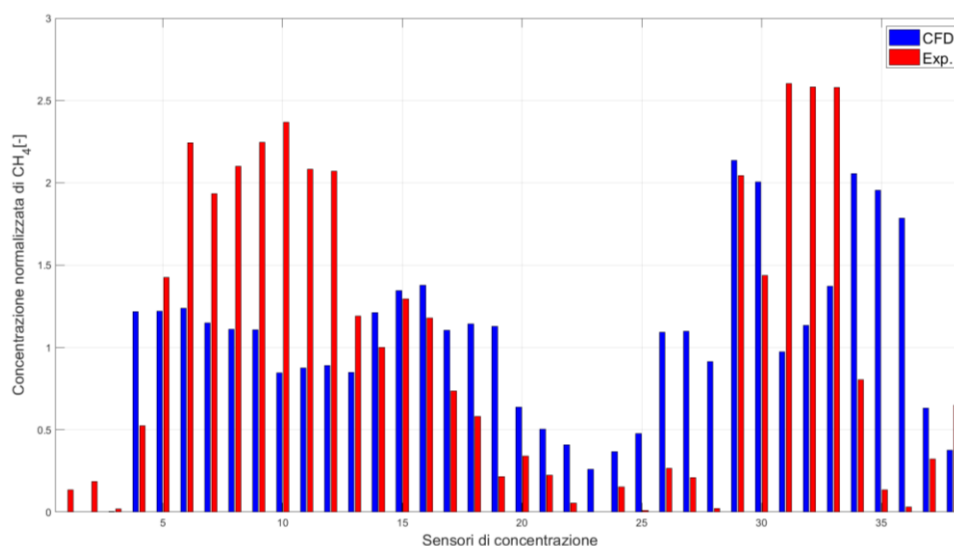


Grafico 6.11 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

È evidente che in questo specifico caso gli andamenti ottenuti non sono in buon accordo con quelli attesi. In particolare, si osserva che i dati sperimentali in cui sono rilevati picchi inattesi sono relativi ai sensori dal n. 6 al 12 e dal 31 al 33. Correlando le informazioni sulle anomalie delle concentrazioni e delle velocità, si osserva che tanto le velocità quanto le concentrazioni sono maggiori di quelle attese a sinistra della direzione del getto, pur essendo sia il getto sia il vento diretti orizzontalmente (in direzione x nel sistema di riferimento della piattaforma utilizzato in tutto il presente lavoro). In Figura 6.2 vengono riassunte queste informazioni, in modo da evidenziare graficamente le zone in cui si hanno importanti scostamenti dei valori misurati rispetto a quelli attesi dalla CFD: si tratta, cioè, dei nodi 2, 3 e 0D nella zona a sinistra del rilascio.

Sebbene le considerazioni sopra fatte non tengano conto del fatto che i valori registrati rappresentano in realtà scostamenti rispetto a dei valori di riferimento, tanto la distribuzione delle velocità quanto il fatto che i sensori con le più alte concentrazioni si trovino tutte a sinistra del rilascio sembrerebbero avvalorare tale ipotesi.

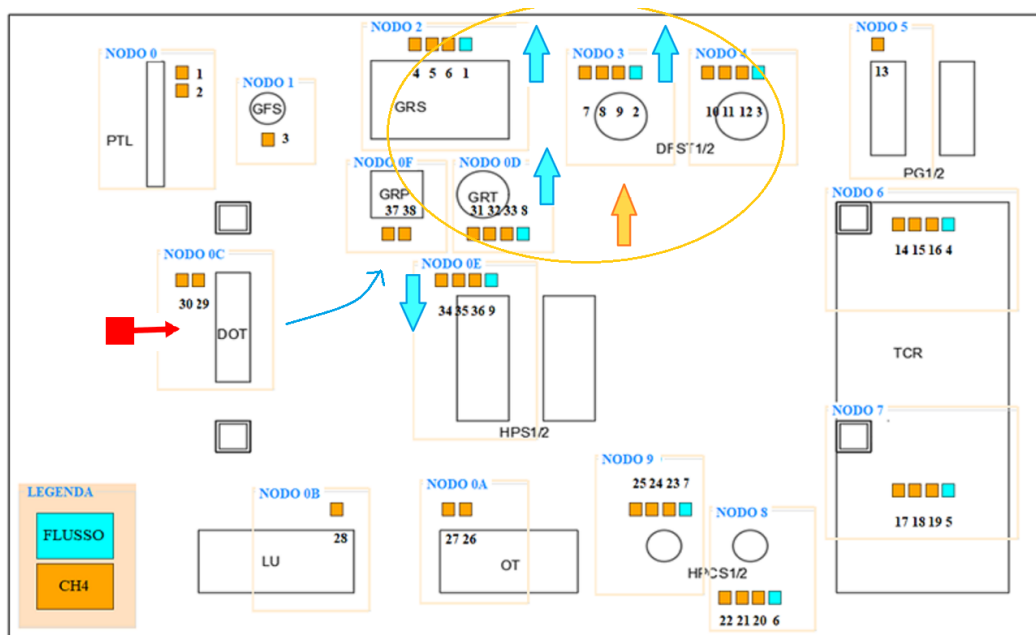


Figura 6.2 – Mappa dei sensori con indicazione dei maggiori scostamenti dei dati sperimentali rispetto alla CFD, per il rilascio in Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s. (freccie verso l'alto per scostamenti positivi, e viceversa)

Si vuole fornire, in questo caso studio, un ulteriore indizio delle problematiche nelle rilevazioni, mediante un confronto tra i valori assoluti registrati nelle prove a pressione P_a , P_b e P_c .

Pressione di rilascio:	P_a	P_b	P_c
Media Conc. CFD [ppm]	33335	40724	58588
Max Conc. CFD [ppm]	88750	102260	125200
Media Conc. Exp [ppm]	68	45	65
Max Conc. Exp [ppm]	199	140	169

Tabella 6.2 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

Osservando i valori di concentrazione ottenuti nelle tre prove, è evidente la presenza di un'anomalia nelle rilevazioni: le concentrazioni derivanti dai rilasci a 40 bar e 50 bar risultano inferiori a quelle rilevate nel caso a 30 bar. Questo aspetto risulta altrettanto evidente dall'osservazione (nel Grafico 6.12) dell'andamento delle concentrazioni rilevate nel tempo nel sensore 29 disposto frontalmente al getto. Questi valori hanno consentito di avvalorare l'ipotesi di una errata esecuzione dell'offset nei sensori. Inoltre, le prove 9, 10 e 11 sono tra le ultime effettuate con il gas a disposizione per il primo set di prove, il che ha fatto avanzare l'ulteriore ipotesi di instabilità della miscela nelle bombole nell'ultimo periodo in cui sono state effettuate le rilevazioni.

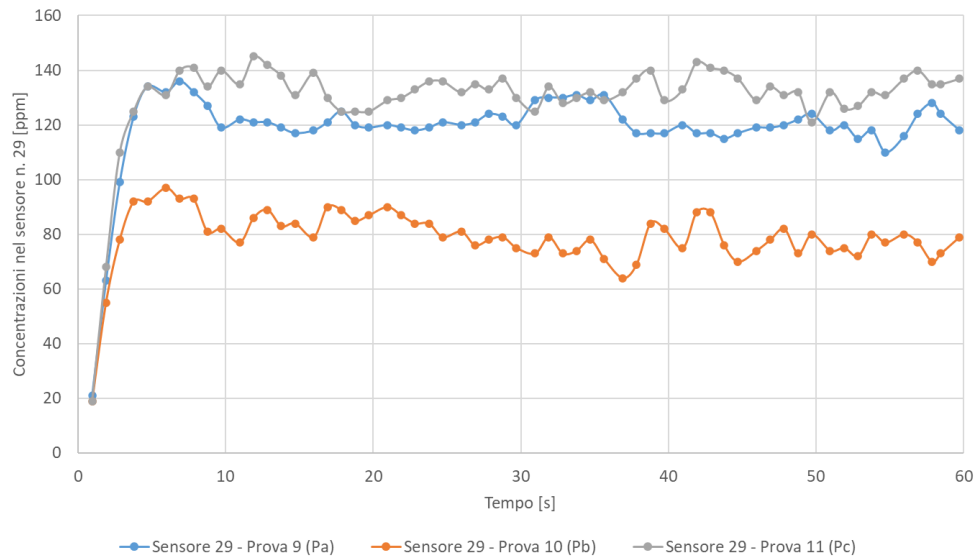


Grafico 6.12 – Andamento temporale della concentrazione rilevata nel sensore 29 per le prove 9, 10, 11

6.2. STUDIO SULL'OFFSET DEI SENSORI

Dall'analisi dei valori ottenuti nelle rilevazioni sperimentali, si è potuto notare come le concentrazioni sperimentali fossero piuttosto basse. Inoltre, come commentato precedentemente, non tutti gli andamenti trovati sono risultati in accordo con quelli attesi, rivelando alcune anomalie che hanno portato alla ricerca della principale causa degli scostamenti. Non essendo noto al momento delle prime rilevazioni il meccanismo di esecuzione dell'offset, si è cercato di capire se questo potesse essere alla base delle anomalie identificate.

Va specificato che le simulazioni CFD full-scale hanno permesso di ottenere informazioni sulla distribuzione di gas attesa in piattaforma, non fornendo tuttavia alcun riferimento atto a comprendere l'affidabilità dei dati sperimentali, dal momento che non è stato possibile stabilire una correlazione diretta tra le concentrazioni previste dalle simulazioni CFD full-scale e le corrispondenti concentrazioni nel caso in scala: la ricerca di una correlazione è complicata ulteriormente dall'utilizzo non di puro metano ma di una sua miscela in aria al 2,2%.

Pertanto, con il fine di identificare dei valori di riferimento per le concentrazioni attese nelle prove sperimentali, sono state svolte apposite simulazioni CFD in scala, utilizzando come parametri quelli imposti dalle regole di scalatura precedente descritte. Si riportano nei grafici che seguono alcuni esempi di risultati ottenuti dal confronto con il primo set di prove.

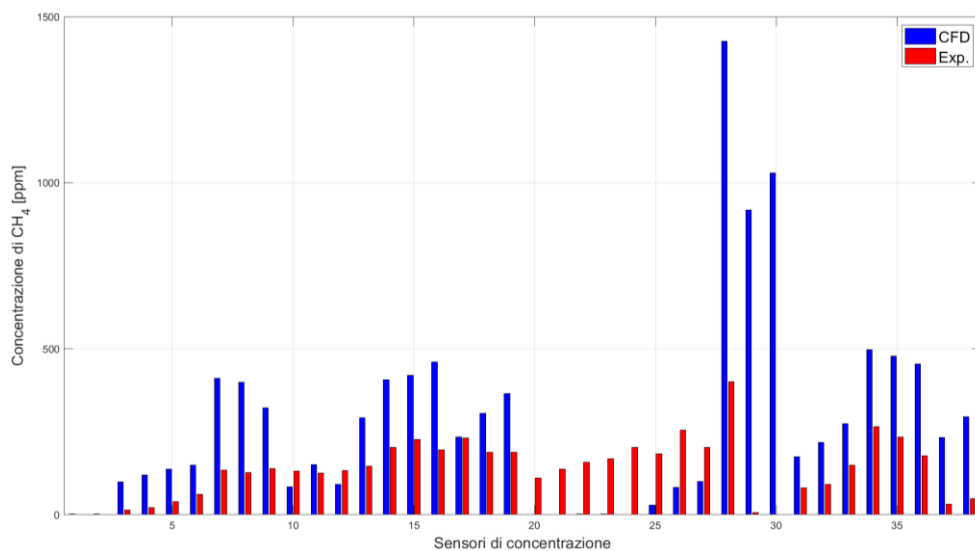


Grafico 6.13 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute dal CFD in scala (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45°

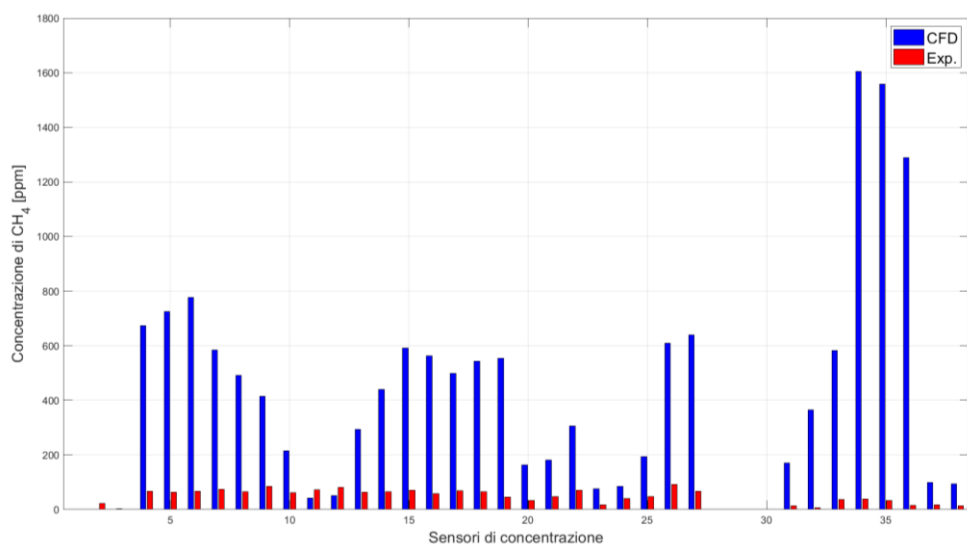


Grafico 6.14 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute dal CFD in scala (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0°

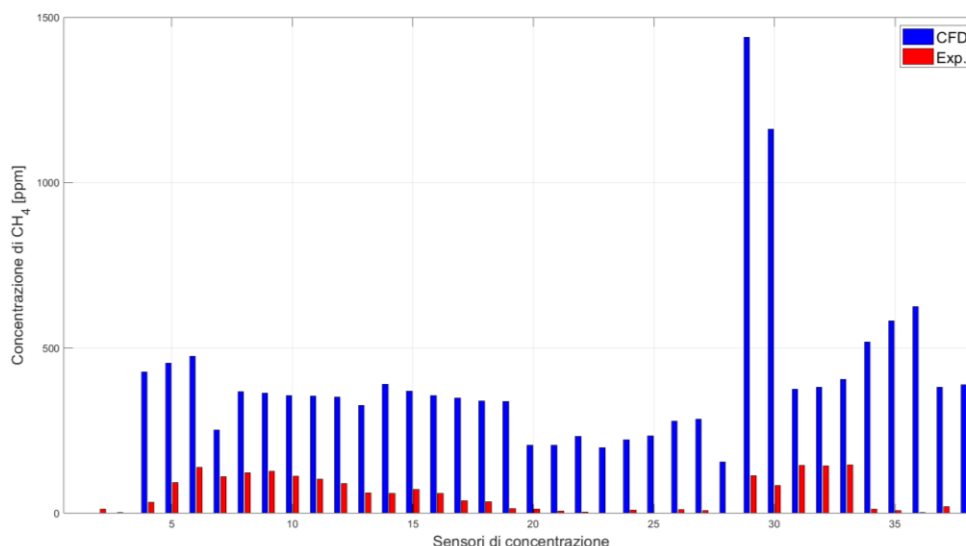


Grafico 6.15 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute dal CFD in scala (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0°

Dall’osservazione degli andamenti è evidente che le concentrazioni rilevate sono troppo basse rispetto a quelle attese. Ciò ha dato conferma dei sospetti iniziali, consentendo di indagare la modalità di esecuzione dell’offset e di concludere che i valori registrati fanno riferimento ad un offset rilevato in seguito all’inizio del rilascio: i valori così trovati nel primo set di dati non sono quindi valori assoluti, ma rappresentano gli scostamenti rilevati a partire da specifici offset di riferimento per ciascun sensore. In seguito al rilascio di una nuova versione del software di gestione dei dati, è stato quindi possibile eseguire le nuove prove registrando i valori rilevati immediatamente prima del rilascio e durante lo stesso, senza operare alcuna differenza rispetto a dei valori di riferimento. I risultati delle nuove prove verranno esposti nella sezione seguente.

6.3. RISULTATI DEL SECONDO SET DI PROVE

Vengono qui riportati alcuni dei risultati ottenuti dall’analisi del secondo set di dati raccolto nel corso della campagna sperimentale. Data l’elevata quantità di dati analizzati, si riportano i risultati più rilevanti emersi dallo studio del rilascio in quattro posizioni:

- Posizione 1, con Vento 2,77 m/s a 45° s.s.;
- Posizione 2, con Vento 2,77 m/s a 0° s.s.;
- Posizione 3, con Vento 2,77 m/s a 0° s.s.;
- Posizione 5, con Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

Le elaborazioni dei dati sono state effettuate con la stessa modalità delle prime prove, con l’unica ulteriore accortezza di sottrarre alle rilevazioni nei diversi time-step i valori di concentrazione misurati dai sensori prima del rilascio.

6.3.1. POSIZIONE 1, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.

I rilasci effettuati in sede sperimentale con la Source Box in posizione 1 (prove 1, 2, 3) sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente a 45° con intensità pari a 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Si riporta per un unico caso studio il grafico di raffronto tra le velocità rilevate e quelle ottenute dalle simulazioni CFD, in seguito alla normalizzazione rispetto al valor medio (Grafico 6.16). In Tabella 6.3 sono invece riportati i valori di riferimento delle velocità medie e massime per i tre casi studio in questa posizione di rilascio.

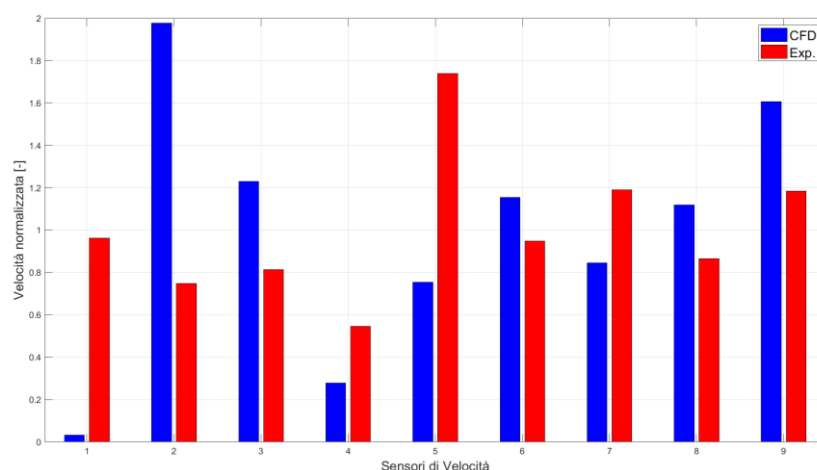


Grafico 6.16 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pc

Pressione di rilascio:	P _a	P _b	P _c
Media Vel. CFD [m/s]	2,98	3,18	3,25
Max Vel. CFD [m/s]	6,10	6,73	6,43
Media Vel. Exp [m/s]	1,37	1,34	1,28
Max Vel. Exp [m/s]	2,87	2,65	2,23

Tabella 6.3 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

In questa sezione i valori normalizzati delle concentrazioni misurate sono posti a confronto con i valori normalizzati risultanti dalle simulazioni CFD. I grafici qui mostrati sono relativi ai casi studio con rilascio alle pressioni P_a e P_c.

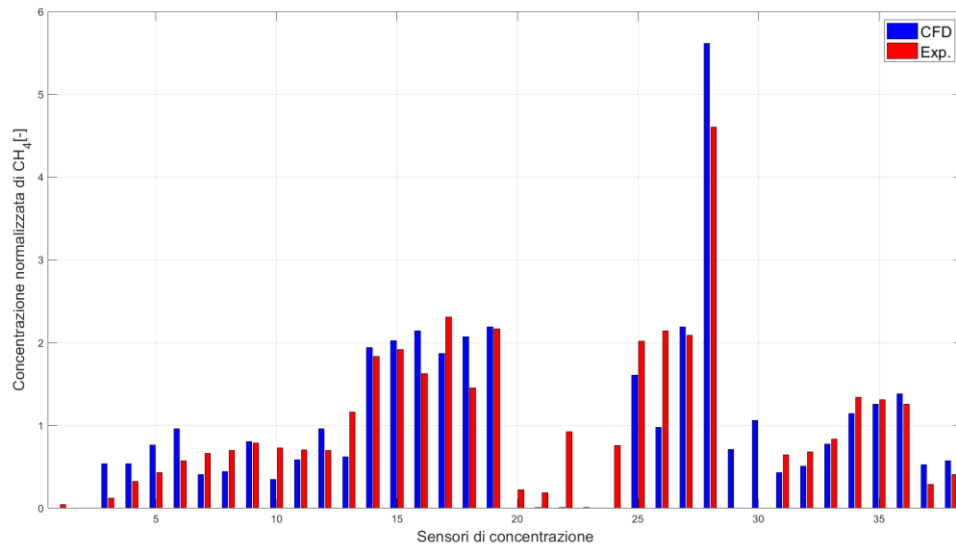


Grafico 6.17 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pa

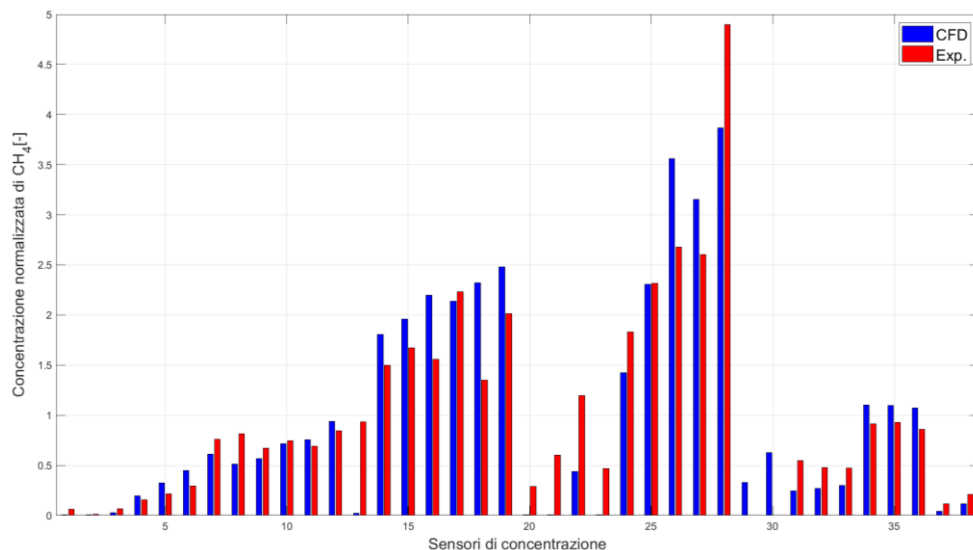


Grafico 6.18 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pc

I risultati CFD mostrano un ottimo accordo con le prove sperimentali, per tutti i valori di pressione di rilascio. Ovviamente, essendo qui i dati relativi a valori assoluti, non si verifica lo stesso scostamento rilevato nel primo set di dati nel sensore 28. Ciò dà conferma della motivazione alla base degli scostamenti prima ottenuti in questo sensore e dell'ottima rilevazione da parte dei sensori anche in vicinanza della posizione di rilascio.

Per tenere conto dell'errore nelle misurazioni effettuate dai sensori, è stato utilizzato il calcolo della deviazione standard, prendendo in considerazioni solo gli ultimi 40 s di misurazioni, in cui il transitorio del PID è sicuramente esaurito per ciascuna prova. Si riporta, a mo' di esempio, il grafico delle concentrazioni a confronto per il rilascio alla

pressione P_a (Grafico 6.19). Si osserva che, essendo la deviazione standard relativa alle misure in diversi time step relativi ad un'unica prova, l'intervallo di errore ottenuto non tiene conto della ripetitività dell'esperimento. Inoltre, la normalizzazione rispetto al valor medio tra tutti i valori non è di per sé garanzia di un confronto ottimale. Non è quindi inaspettato che i dati normalizzati della CFD non cadano quasi mai all'interno dell'intervallo di errore delle misure normalizzate.

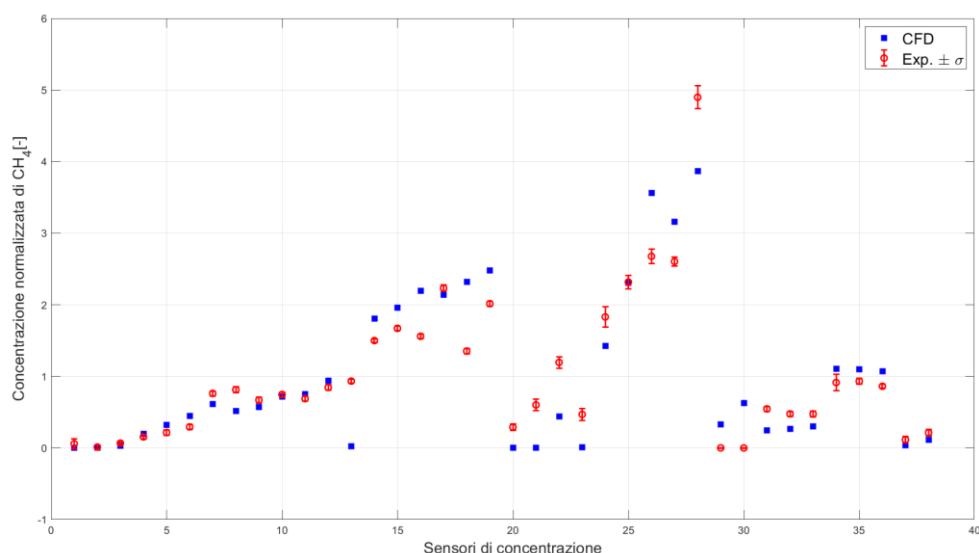


Grafico 6.19 – Misure di concentrazione con relativi intervalli di errore a confronto con i valori CFD, normalizzati, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_a

In Tabella 6.4 vengono riportate le grandezze di maggior interesse per ciascuna prova, ovvero le concentrazioni medie e massime, per entrambi i set di dati (sperimentali e CFD) e per ogni livello di pressione considerato.

Pressione di rilascio:	P_a	P_b	P_c
Media Conc. CFD [ppm]	23387	27056	33873
Max Conc. CFD [ppm]	131300	167330	131060
Media Conc. Exp [ppm]	157	185	225
Max Conc. Exp [ppm]	721	849	1101

Tabella 6.4 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

Dal confronto tra i valori sperimentali registrati in questo secondo set di prove con quelli ottenuti nella prima prova (Grafico 6.20), è evidente come questi ultimi fossero ricavati sottraendo alle reali rilevazioni i valori dell'offset.

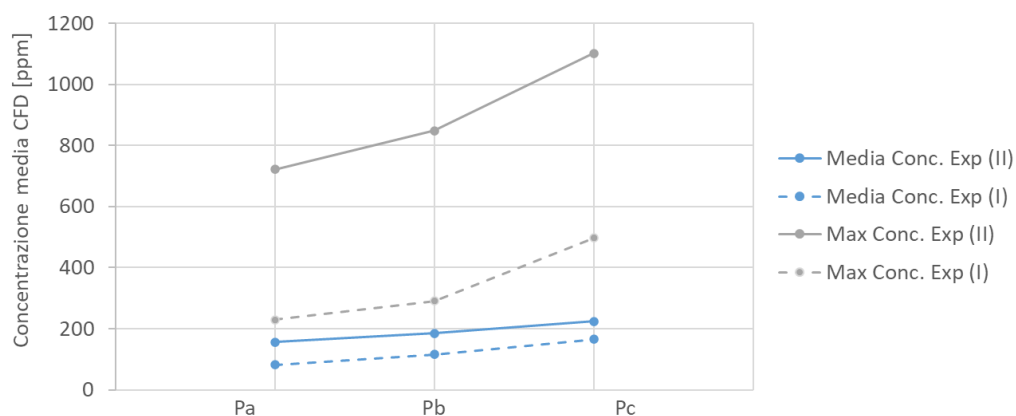


Grafico 6.20 – Confronto tra valori medi e massimi delle concentrazioni nel primo (I) e nel secondo (II) set di dati

Concentrando l'attenzione sui valori assoluti ottenuti dalle rilevazioni sperimentali, vengono mostrati nel Grafico 6.21 gli andamenti a confronto dei rilasci alle tre diverse pressioni: è evidente l'innalzamento dei picchi quando la pressione di rilascio aumenta.

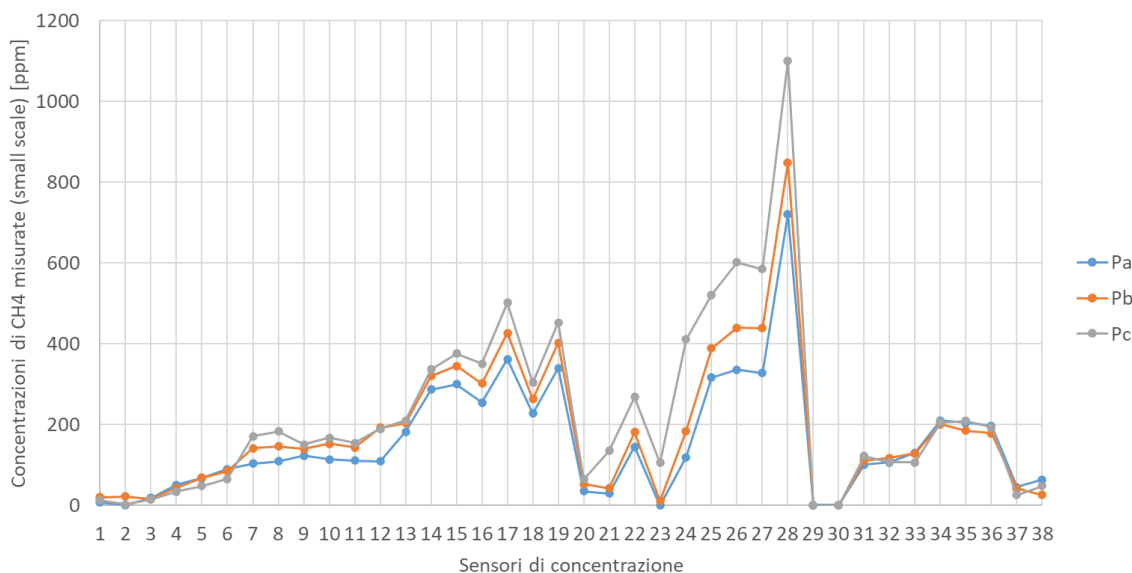


Grafico 6.21 – Valori rilevati dai sensori di concentrazione nelle prove 1 (Pa), 2 (Pb), 3 (Pc)

I valori massimi sono ottenuti, per tutti i casi studio e in entrambi i set di dati, in corrispondenza del sensore n. 28, posto in vicinanza del punto di rilascio, come visibile nella mappa dei sensori in Figura 6.3.

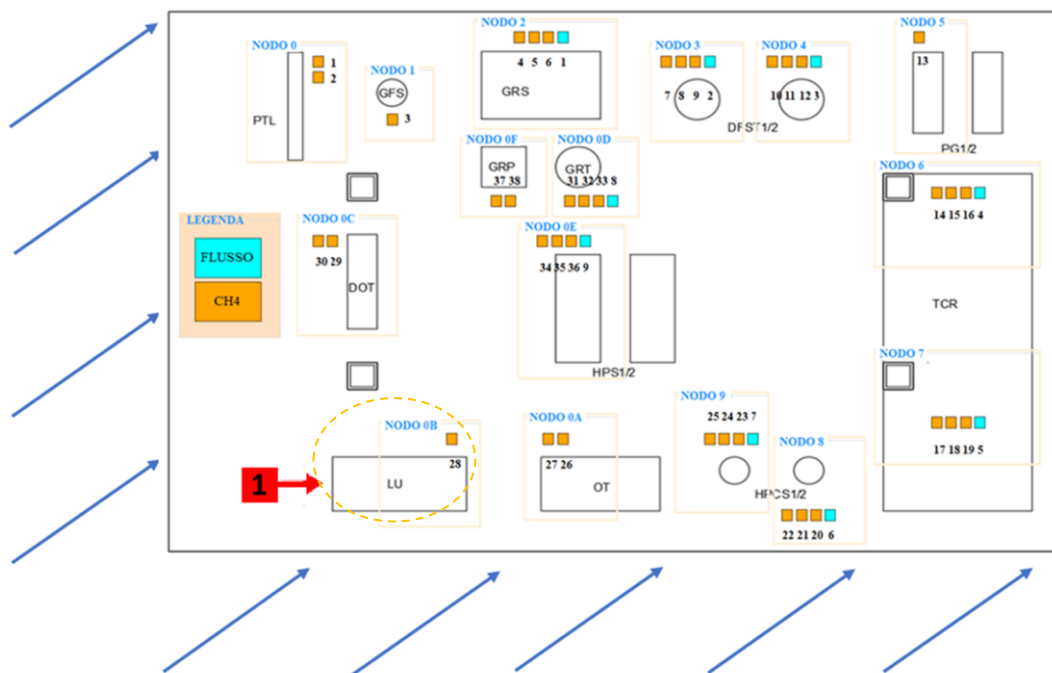


Figura 6.3 – Mappa dei sensori, rilascio in posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., in evidenza il sensore in cui si raggiunge il massimo

Nel Grafico 6.22 è rappresentato, per questo specifico sensore, l'andamento delle misure rilevate nei diversi time-step: è evidente che i valori misurati aumentano all'aumentare della pressione di rilascio. È inoltre possibile osservare l'ottima stabilità delle misurazioni nel tempo.

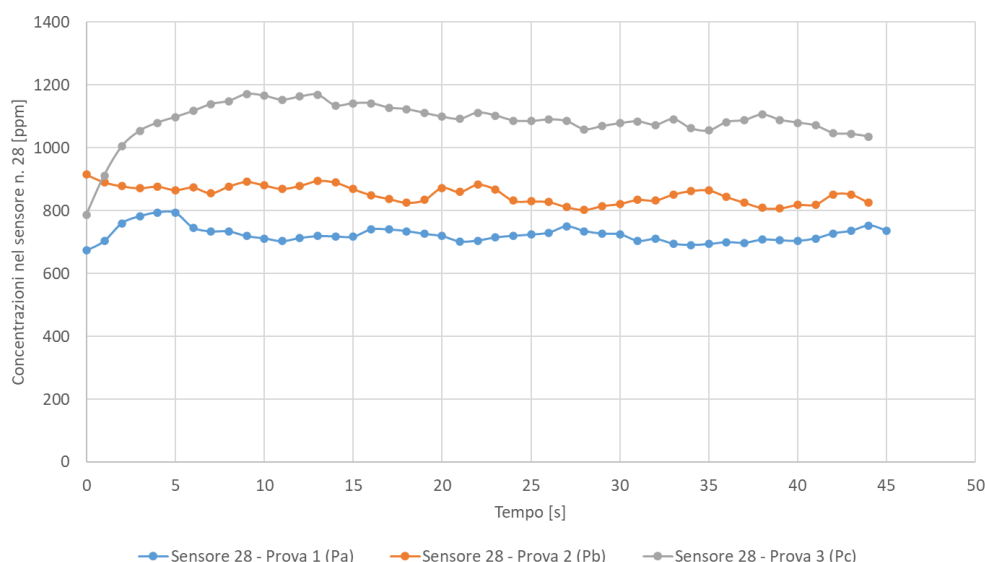


Grafico 6.22 – Andamento temporale della concentrazione rilevata dal sensore 28 nelle prove 1 (Pa), 2 (Pb) e 3 (Pc)

Confronto qualitativo con ANSYS Fluent

È altresì possibile ottenere, sfruttando il post-processing di Fluent, una visualizzazione grafica della distribuzione delle concentrazioni, non soltanto per i risultati delle simulazioni ma anche per i dati sperimentali, grazie alla possibilità di importarli tramite uno specifico file in formato .csv. La Figura 6.4 mostra i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati. Le sferette colorate rappresentano i dati CFD, mentre il set di dati sperimentali è indicato con un simbolo a forma di croce. Poiché entrambe le scale utilizzate vanno da 0 al valore massimo, è possibile verificare graficamente l'ottimo accordo tra i due set di dati.

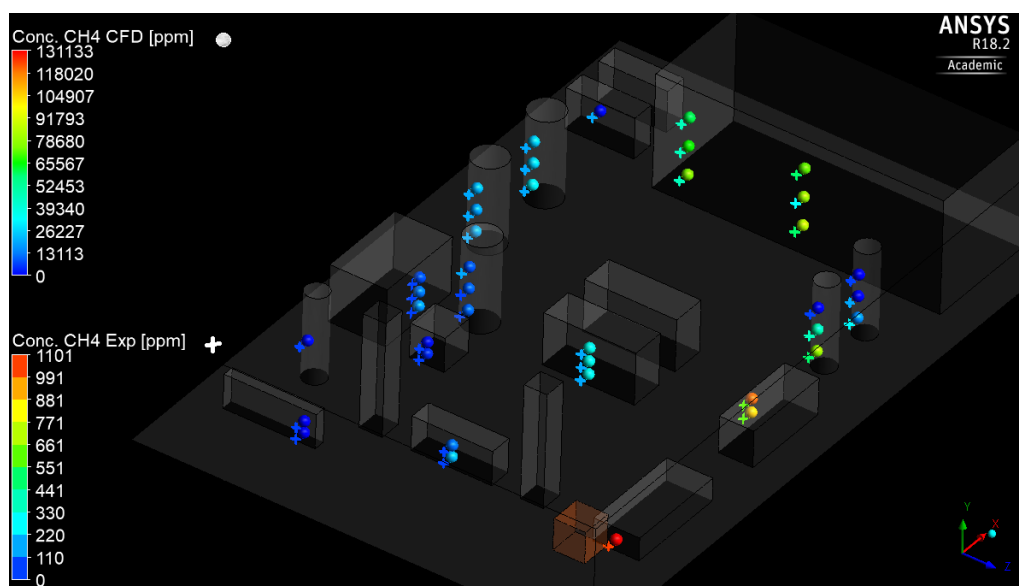


Figura 6.4 – Confronto grafico delle concentrazioni in ANSYS Fluent, Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pc

Confronto con le simulazioni CFD in scala

È interessante mostrare anche un esempio di confronto tra i valori risultanti dalle simulazioni CFD in scala e i valori misurati per il caso studio alla pressione maggiore Pc.

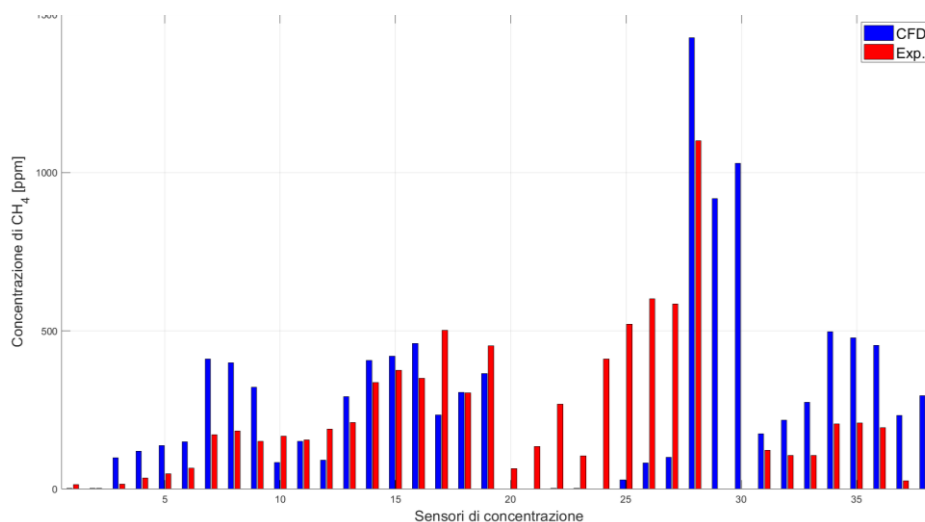


Grafico 6.23 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 1, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pc

È evidente che il confronto dei valori assoluti misurati con quelli ottenuti dalle simulazioni CFD scalate evidenzino un ottimo accordo, sebbene in buona parte dei sensori i valori sperimentali risultino inferiori a quelli attesi. Tuttavia, le concentrazioni maggiori nei sensori dal 20 al 27 evidenziano qualche differenza nella distribuzione nella nube, meno apprezzabile nel confronto con i risultati delle simulazioni CFD full-scale.

È infine utile fare un confronto tra i valori medi e massimi, che consentono di confermare un buon accordo dei dati, anche se le concentrazioni rilevate sperimentalmente sono in media leggermente inferiori a quelle attese.

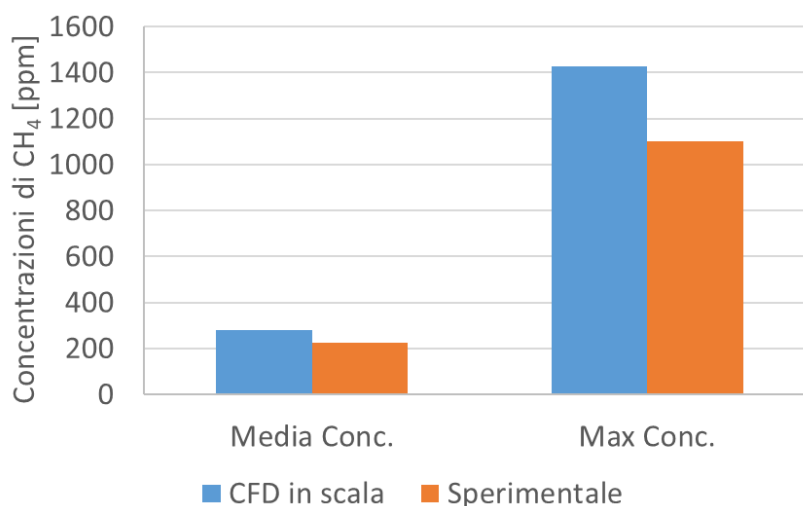


Grafico 6.24 – Confronto dei valori medi e massimi nelle simulazioni CFD in scala e nel caso sperimentale, Posizione 1, Pc

6.3.2. POSIZIONE 2, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.

Come già indicato in Tabella 5.2 i rilasci effettuati nelle prove 7 e 8 con la Source Box in posizione 2 sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente frontalmente alla piattaforma alla velocità di 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Prima di concentrare l'attenzione sull'analisi delle concentrazioni, si effettua un raffronto tra le velocità rilevate e quelle ottenute dalle simulazioni CFD, in seguito alla normalizzazione rispetto al valor medio.

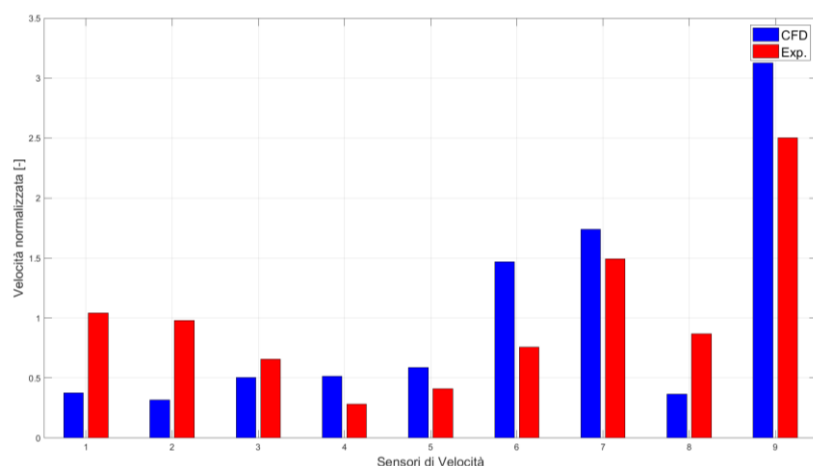


Grafico 6.25 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pa

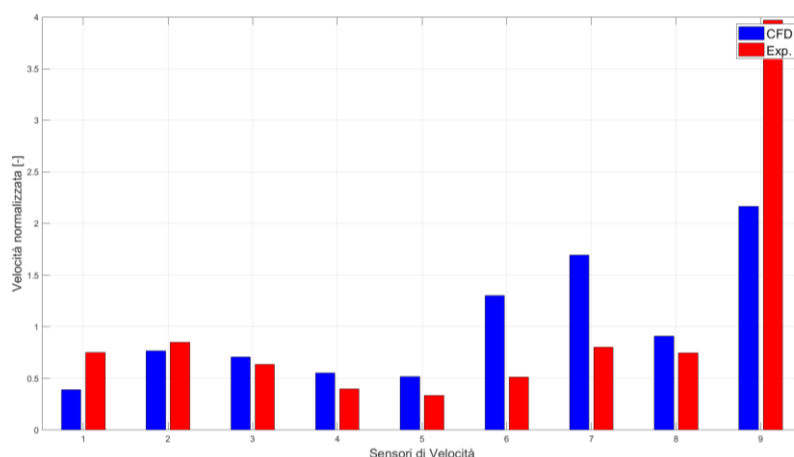


Grafico 6.26 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pc

Gli andamenti a confronto tra le velocità mostrano alcuni scostamenti, per i quali valgono i commenti generali già fatti sulle rilevazioni delle velocità.

Inoltre, dall'osservazione dei valori assoluti di velocità (mostrati in Tabella 6.5 e nel Grafico 6.27) è evidente che i dati sperimentali sono molto vicini ai valori ottenuti dalle simulazioni CFD, contrariamente a quanto ci si aspetterebbe da un confronto tra modello in scala e caso reale. Infatti, sulla base delle regole di scalatura utilizzate, il rapporto tra la velocità in scala imposta nella galleria del vento e quella reale è pari a 0,4615. Va specificato che non ci si aspetta una corrispondenza esatta delle velocità in ciascun punto della piattaforma poiché questo rapporto non tiene conto del fenomeno di rilascio, che ha certamente incidenza sulle velocità. Tuttavia, si può affermare che, se si escludono i sensori nelle immediate vicinanze del rilascio, l'influenza principale sui valori di velocità rilevati deriva dal flusso di vento. Simili rapporti inattesi tra le velocità reali e scalate sono stati rilevati per il rilascio in posizione 3 (caratterizzato dallo stesso vento), tanto nel primo quanto nel secondo set di

prove sperimentali, lasciando supporre che il campo di moto generato quando il vento incide frontalmente alla piattaforma non abbia una perfetta corrispondenza con quello studiato nelle simulazioni fluidodinamiche. Sebbene sia già stato evidenziato che le velocità trovate non garantiscono un confronto ottimale dei risultati, essendo queste troppo vicine alle pareti degli ostacoli, questo aspetto non andrebbe trascurato, dal momento che i casi con l'inclinazione del vento a 45° sembrano invece garantire una maggiore coerenza tra i valori assoluti delle velocità ricreate in galleria e quelle attese sulla base della scalatura dei risultati CFD. Andrebbe quindi indagata con più attenzione la distribuzione del vento ottenuta e l'effettiva corrispondenza con il caso reale.

Pressione di rilascio:	P _a	P _c
Media Vel. CFD [m/s]	1,75	3,29
Max Vel. CFD [m/s]	5,48	7,42
Media Vel. Exp [m/s]	1,75	2,80
Max Vel. Exp [m/s]	4,39	11,10

Tabella 6.5 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

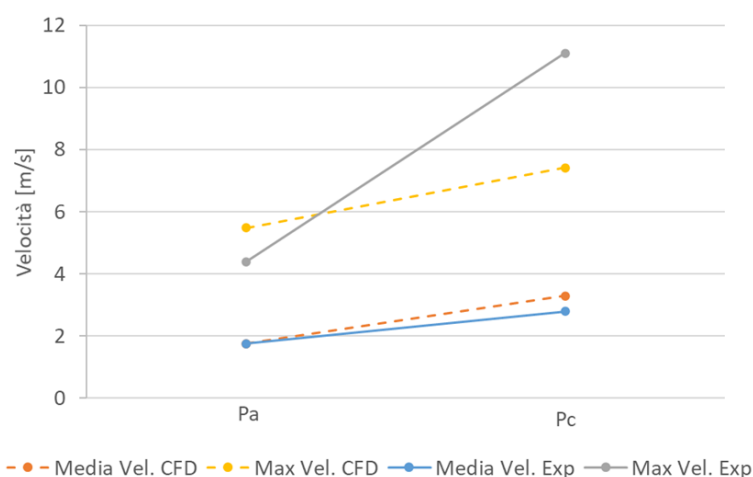


Grafico 6.27 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

In questa sezione i valori normalizzati delle concentrazioni misurate sono posti a confronto con i valori normalizzati risultanti dalle simulazioni CFD.

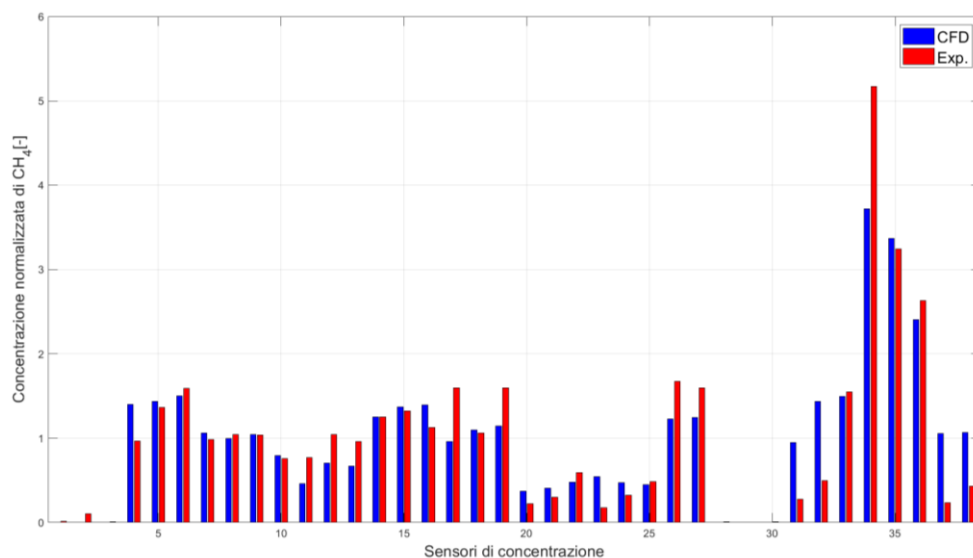


Grafico 6.28 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pa

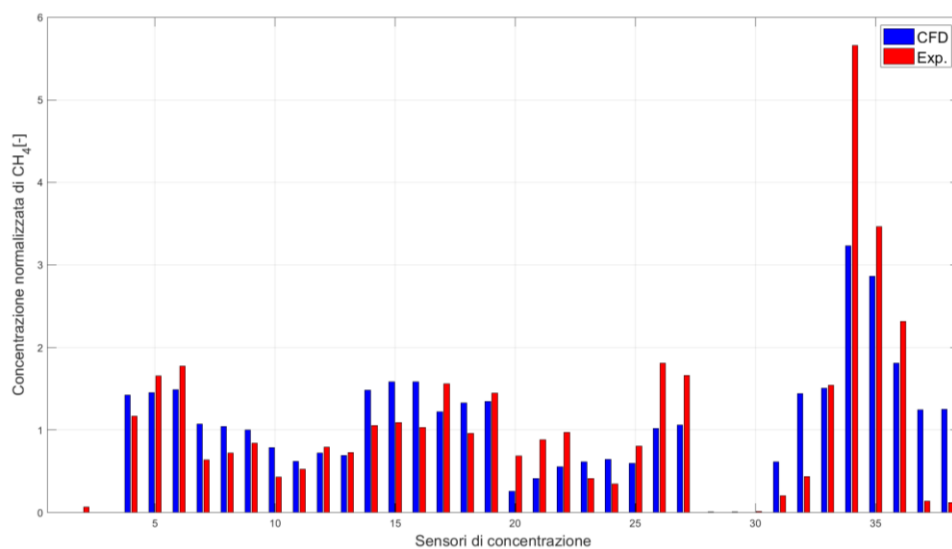


Grafico 6.29 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pc

Anche in questo caso i risultati CFD mostrano un ottimo accordo con le prove sperimentali, per entrambi i valori di pressione di rilascio. Facendo riferimento alla mappa in Figura 6.5 è evidente che i che i valori massimi sono ottenuti, per entrambi i casi studio e nei due set di dati, in corrispondenza del Nodo 0E, posto di fronte al punto di rilascio.

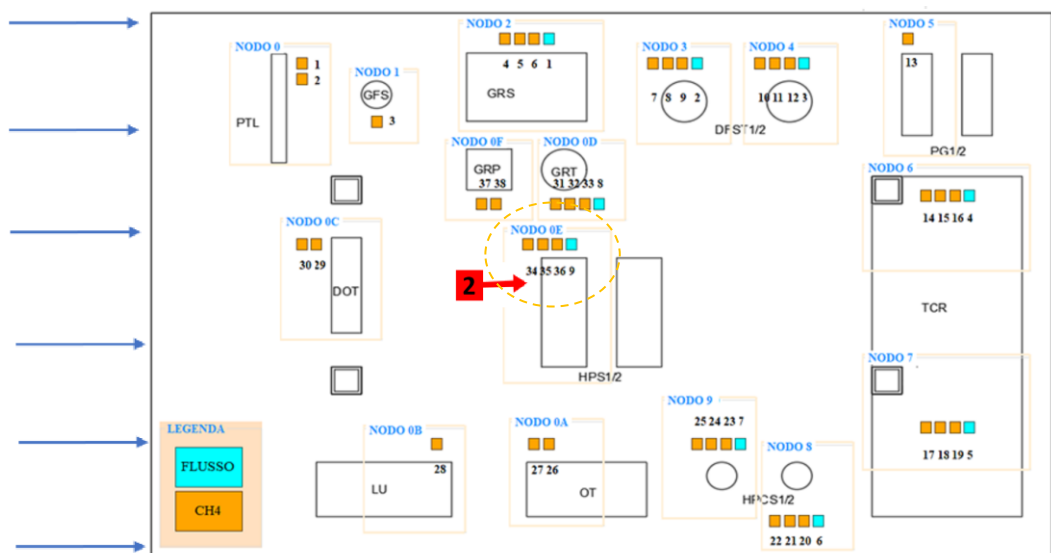


Figura 6.5 – Mappa dei sensori e rilascio in Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., in evidenza il nodo in cui si raggiunge il massimo

In Tabella 6.6 e nel Grafico 6.30 vengono riportate le grandezze di maggior interesse per ciascuna prova, ovvero le concentrazioni medie e massime, per entrambi i set di dati (sperimentali e CFD) e per ogni livello di pressione considerato.

Pressione di rilascio:	P_a	P_c
Media Conc. CFD [ppm]	46882	39997
Max Conc. CFD [ppm]	174490	223830
Media Conc. Exp [ppm]	199	276
Max Conc. Exp [ppm]	1028	1564

Tabella 6.6 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

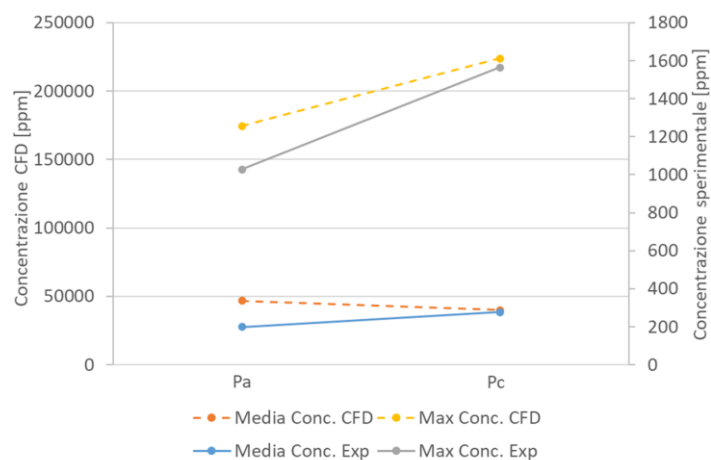


Grafico 6.30 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

Si riportano nel Grafico 6.31 gli andamenti delle concentrazioni sperimentali rilevate nei vari sensori nelle prove 7 e 8. In accordo con quanto ci si aspetterebbe, gli andamenti rilevati sono molto simili e alla pressione di rilascio P_c corrispondono maggiori valori di concentrazione.

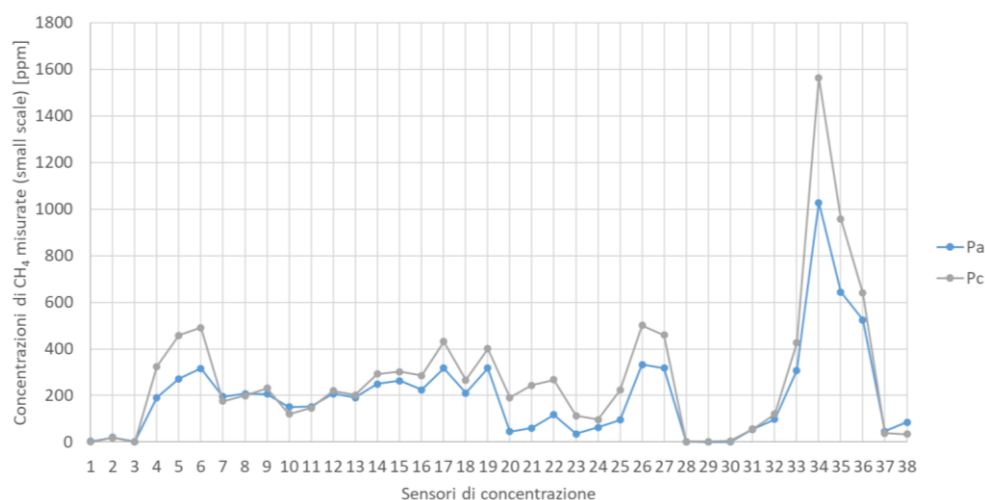


Grafico 6.31 – Valori rilevati dai sensori di concentrazione nelle prove 7 (P_a) e 8 (P_c)

I valori massimi sono ottenuti, per entrambi i casi studio e nei due set di dati, in corrispondenza del sensore 34, posto frontalmente alla direzione di rilascio. Nel Grafico 6.32 è rappresentato, per questo sensore, l'andamento delle misure rilevate nei diversi time-step: è evidente che nel caso a pressione maggiore P_c i valori misurati sono in ogni istante maggiori di quelli rilevati alla pressione P_a . È inoltre possibile osservare che il transitorio si esaurisce rapidamente e si raggiunge presto una buona stabilità degli andamenti delle grandezze nel tempo.

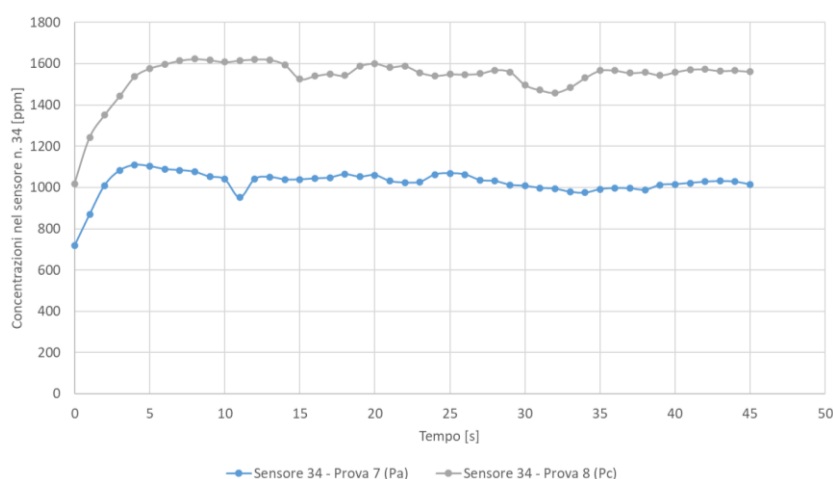


Grafico 6.32 – Andamento temporale della concentrazione rilevata dal sensore 34 nelle prove 7 (P_a) e 8 (P_c)

Confronto qualitativo con ANSYS Fluent

La Figura 6.6 mostra i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati sfruttando lo strumento di post-processing in ANSYS Fluent. Le sferette colorate rappresentano i dati CFD, mentre il set di dati sperimentali è indicato con un simbolo a forma di croce. Entrambe le scale utilizzate, per i dati CFD e quelli sperimentali, vanno da 0 al valore massimo. Ciò permette di verificare l'ottimo accordo tra i due set di dati analizzati.

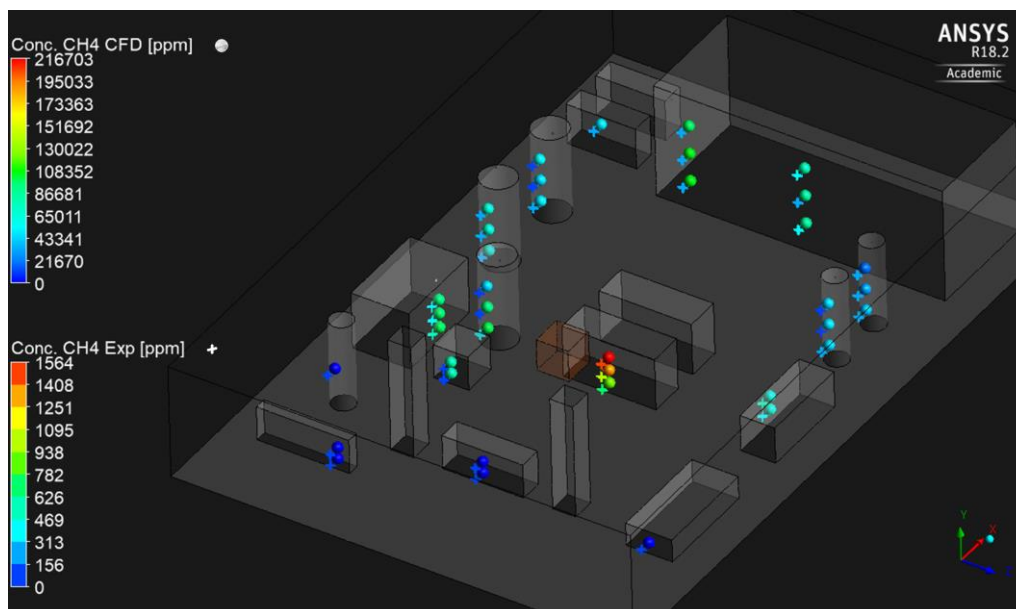


Figura 6.6 – Confronto grafico delle concentrazioni in ANSYS Fluent, Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pc

Confronto con le simulazioni CFD in scala

Di seguito si mostra il confronto tra i valori risultanti dalle simulazioni CFD in scala e i valori misurati per il caso studio alla pressione maggiore Pc.

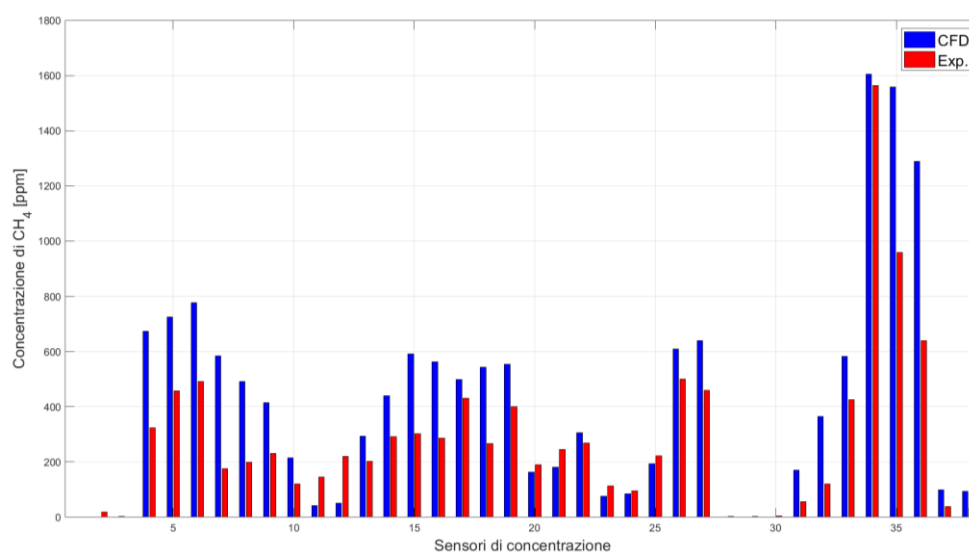


Grafico 6.33 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pc

È evidente dal confronto dei valori assoluti misurati con quelli ottenuti dalle simulazioni CFD che i valori sperimentali sono piuttosto inferiori a quelli attesi nella maggior parte dei sensori. Tra le cause va considerata la già citata velocità del vento che, dalle misurazioni effettuate, sembra corrispondere ad un vento maggiore di quello simulato. La figura che segue e che mostra il confronto delle velocità ottenute con i risultati della simulazione CFD in scala, dà conferma di quanto già commentato.

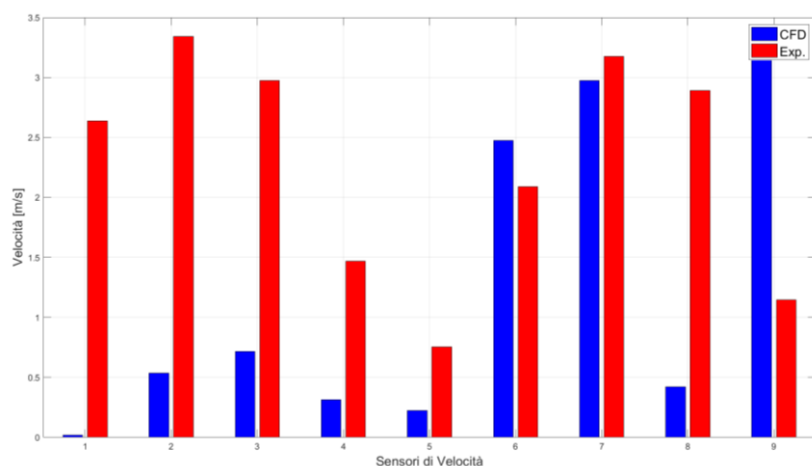


Grafico 6.34 – Confronto tra i valori normalizzati delle velocità ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 2, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

6.3.3. POSIZIONE 3, VENTO 2,77 m/s A 0° S.S.

Come mostrato in Tabella 5.2, i rilasci effettuati nelle prove 9, 10 e 11 con la Source Box in posizione 3 sono caratterizzati dalla presenza di vento incidente frontalmente alla piattaforma alla velocità di 2,77 m/s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Si riportano le velocità normalizzate per i casi a pressione P_a e P_c .

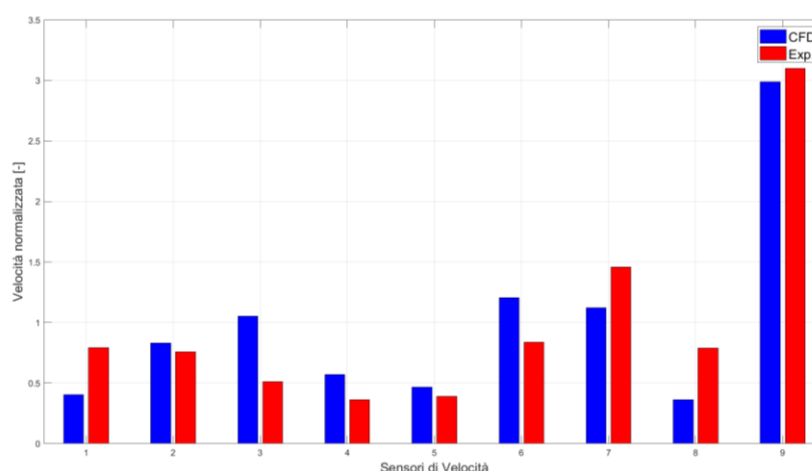


Grafico 6.35 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_a

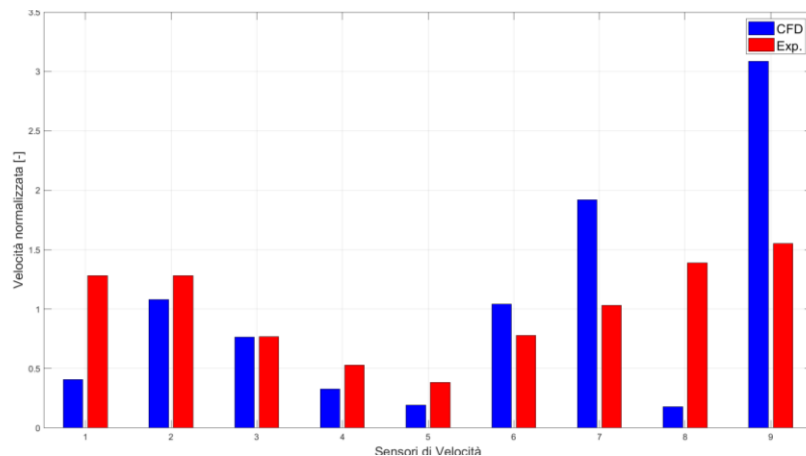


Grafico 6.36 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

Valgono, per gli andamenti di velocità, le stesse considerazioni precedentemente fatte. Così come già commentato per il caso “posizione 2, vento 2,77 m/s a 0° s.s.”, dall’osservazione dei valori assoluti massimi e medi mostrati nella tabella seguente è evidente che il rapporto tra le velocità non è sempre quello atteso tra scala reale e scala ridotta.

Pressione di rilascio:	P_a	P_b	P_c
Media Vel. CFD [m/s]	1,90	1,88	2,78
Max Vel. CFD [m/s]	5,67	5,96	8,60
Media Vel. Exp [m/s]	2,06	1,81	1,99
Max Vel. Exp [m/s]	6,37	2,64	3,08

Tabella 6.7 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

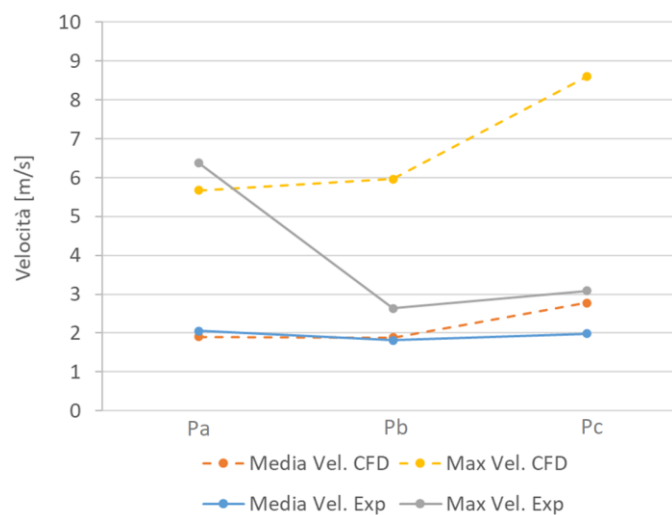


Grafico 6.37 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

Si riporta di seguito il confronto tra gli andamenti normalizzati delle concentrazioni risultanti dalle simulazioni CFD e dalle prove sperimentali.

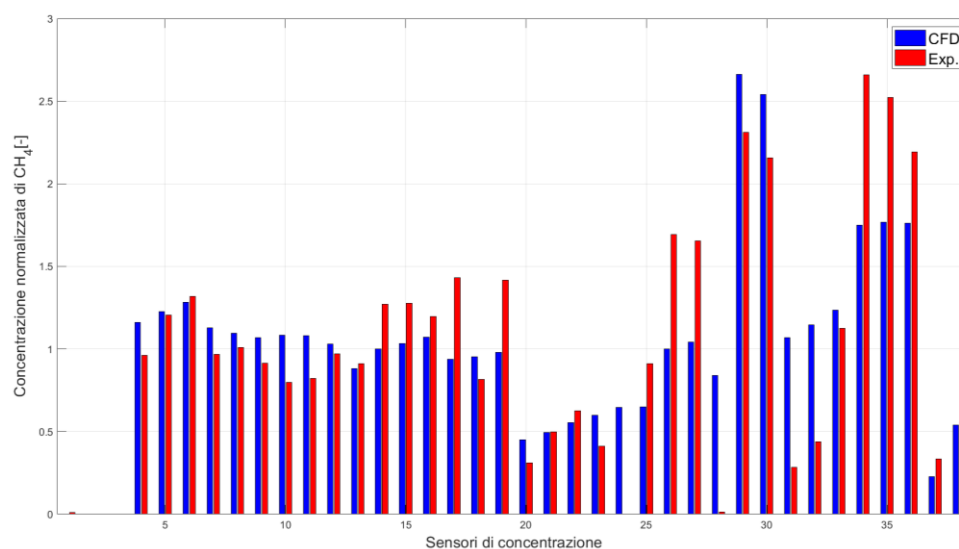


Grafico 6.38 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pa

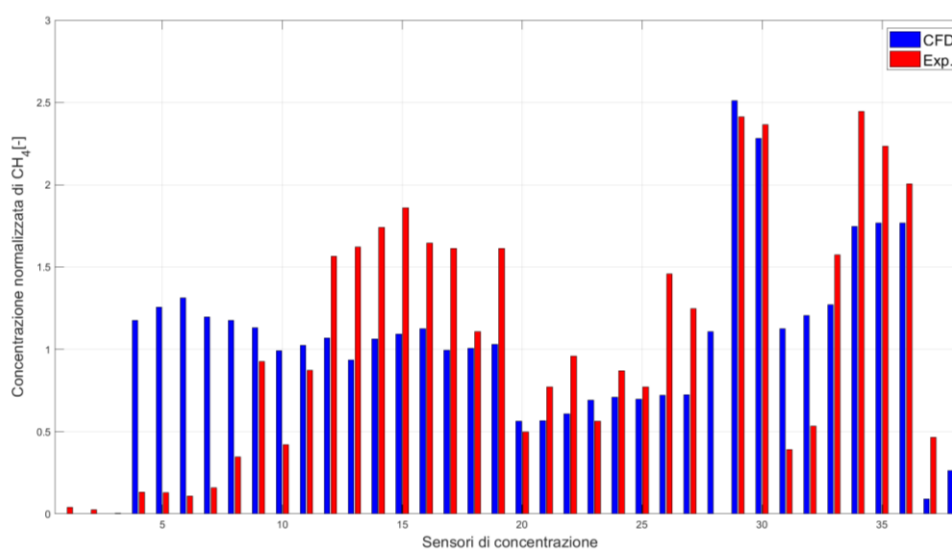


Grafico 6.39 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pb

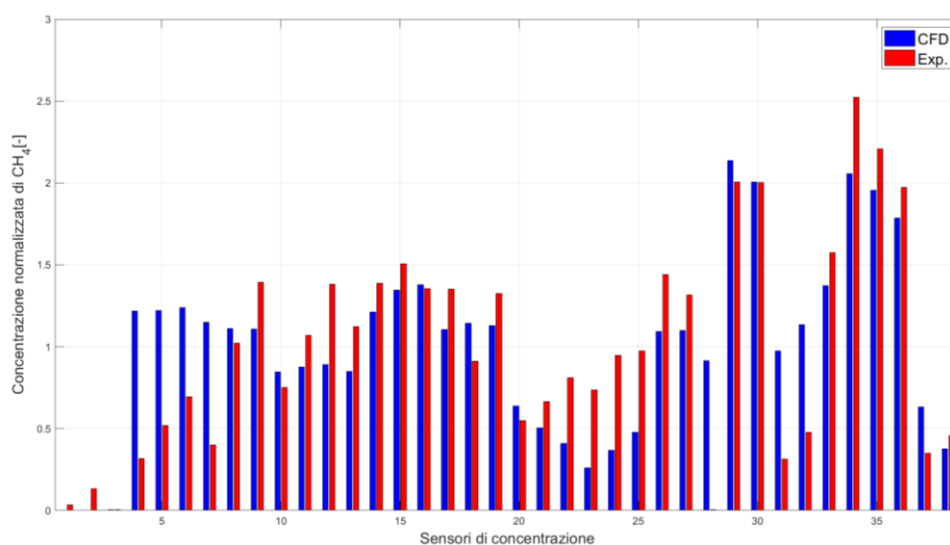


Grafico 6.40 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

I grafici degli andamenti normalizzati a confronto mostrano un ottimo accordo in tutti i rilasci ai diversi valori di pressione. Tuttavia, è comunque possibile individuare in un certo numero di sensori uno scostamento apprezzabile dall'andamento atteso. È interessante notare che i sensori in cui si registrano maggiori scostamenti dai valori attesi sono anche quelli in cui si registra il maggior intervallo di errore. Si riporta, a mo' di esempio, il grafico corrispondente al caso a pressione P_c .

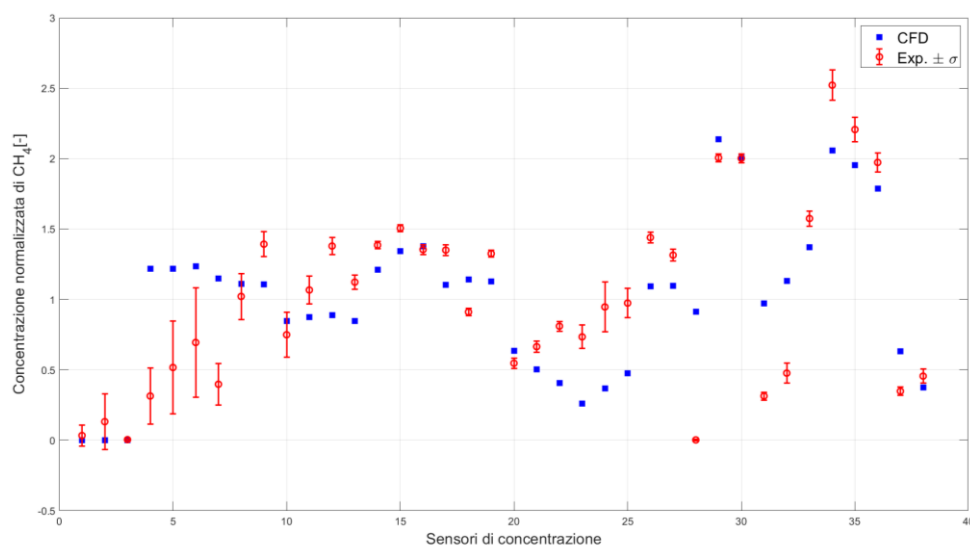


Grafico 6.41 – Misure di concentrazione con relativi intervalli di errore a confronto con i valori CFD, normalizzati – Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

Va comunque evidenziato un aspetto finora non citato ma non trascurabile: l'utilizzo dei modelli RANS nelle simulazioni CFD non consente una modellazione accurata delle zone vorticosi, pertanto alcuni scostamenti potrebbero derivare anche da questo aspetto.

La Figura 6.7 evidenzia inoltre le zone in cui viene raggiunto il massimo.

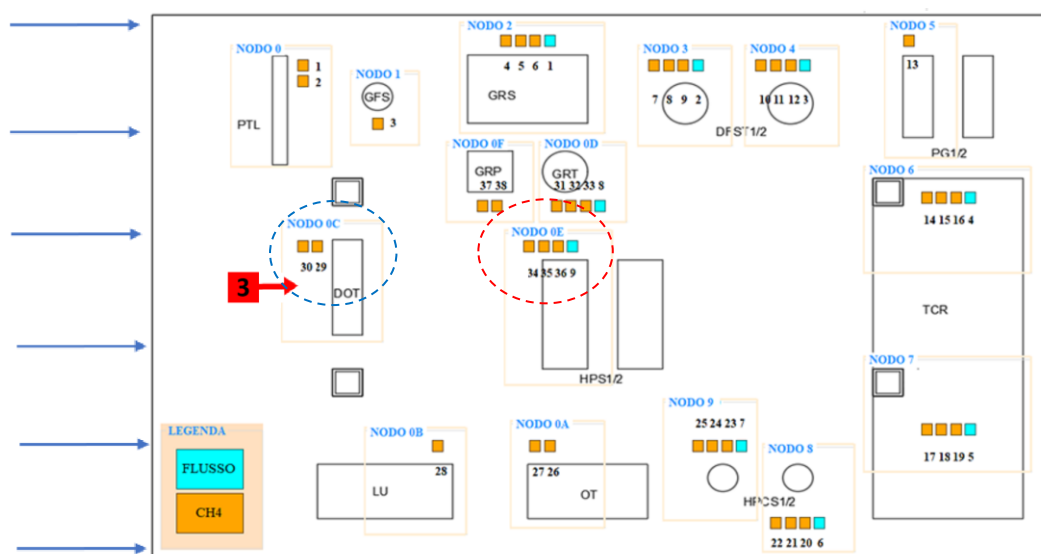


Figura 6.7 – Mappa dei sensori, rilascio in posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., in evidenza i nodi in cui si raggiungono i massimi (CFD in blu, sperimentale in rosso)

È interessante osservare che in tutte le tre prove sperimentali il massimo sia stato raggiunto in corrispondenza del nodo 0E (in cui i valori sperimentali sono comunque elevati), mentre le simulazioni CFD mostrano valori maggiori nel nodo 0C. Tuttavia, va sottolineato che si tratta comunque di differenze minime e che in entrambi i casi si conferma una buona attendibilità dei risultati, dal momento che i sensori di interesse sono quelli disposti frontalmente alla direzione del getto.

Vengono qui specificate le grandezze di maggior interesse per ciascuna prova, ovvero le concentrazioni medie e massime, per entrambi i set di dati (sperimentali e CFD) e per ogni livello di pressione. Le informazioni sono sintetizzate nella tabella e nel grafico che seguono.

Pressione di rilascio:	P _a	P _b	P _c
Media Conc. CFD [ppm]	33335	40724	58588
Max Conc. CFD [ppm]	88750	102260	125200
Media Conc. Exp [ppm]	171	167	221
Max Conc. Exp [ppm]	457	407	557

Tabella 6.8 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

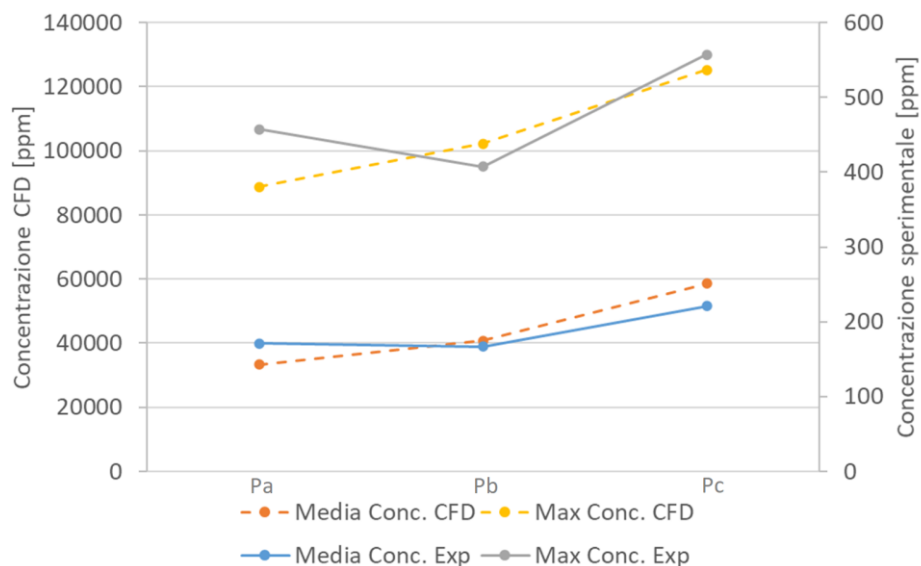


Grafico 6.42 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s.

Concentrando l'attenzione sui valori assoluti ottenuti dalle rilevazioni sperimentali, vengono mostrati nel Grafico 6.43 gli andamenti a confronto dei rilasci alle tre diverse pressioni: si evidenziano tanto un innalzamento dei picchi quando la pressione di rilascio aumenta, quanto leggere differenze nelle distribuzioni del gas nel Mock-Up.

Vengono infine mostrati nel Grafico 6.44 gli andamenti delle rilevazioni di concentrazione nei diversi time-step dal sensore 29, posto frontalmente al punto di rilascio. Si tratta di andamenti molto simili e in tutti è apprezzabile l'ottima stabilità delle rilevazioni, raggiunta anche in modo rapido.

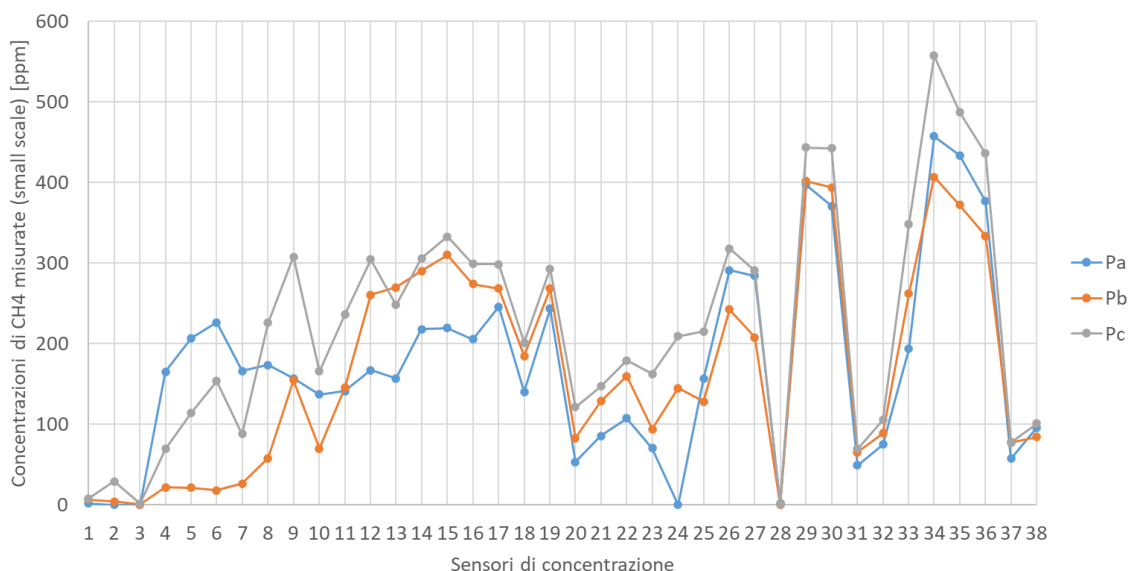


Grafico 6.43 – Valori rilevati dai sensori di concentrazione nelle prove 9 (Pa), 10 (Pb), 11 (Pc)

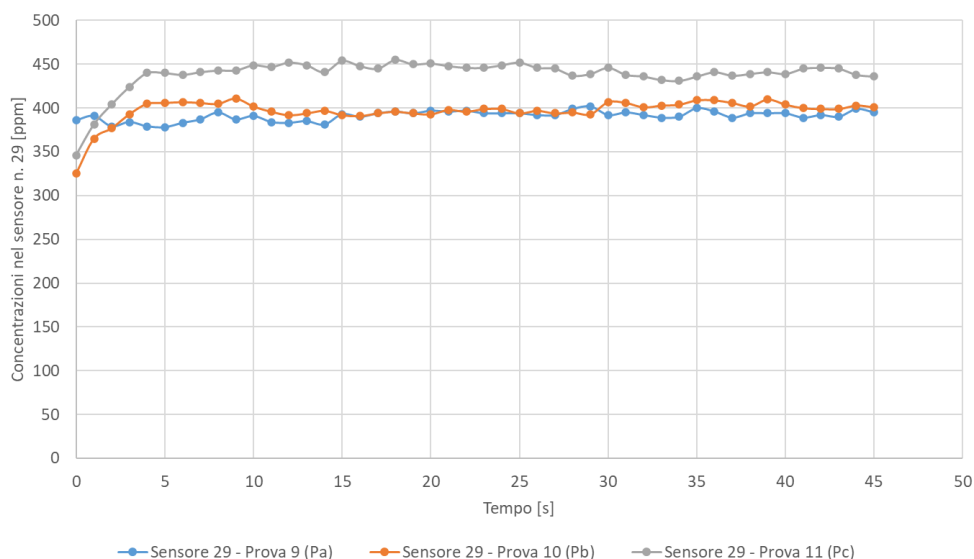


Grafico 6.44 – Andamento temporale della concentrazione rilevata dal sensore 29 nelle prove 9 (Pa), 10 (Pb), 11 (Pc)

Confronto qualitativo con ANSYS Fluent

È altresì possibile ottenere, sfruttando il post-processing di Fluent, una visualizzazione grafica della distribuzione delle concentrazioni, non soltanto per i risultati delle simulazioni ma anche per i dati sperimentali, grazie alla possibilità di importarli tramite uno specifico file in formato .csv. La Figura 6.8 mostra i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati. Le sferette colorate rappresentano i dati CFD, mentre il set di dati sperimentali è indicato con un simbolo a forma di croce. Entrambe le scale utilizzate, per i dati CFD e quelli sperimentali, vanno da 0 al valore massimo. Ciò permette di visualizzare graficamente gli andamenti delle concentrazioni e di verificare l'ottimo accordo tra i due set di dati analizzati.

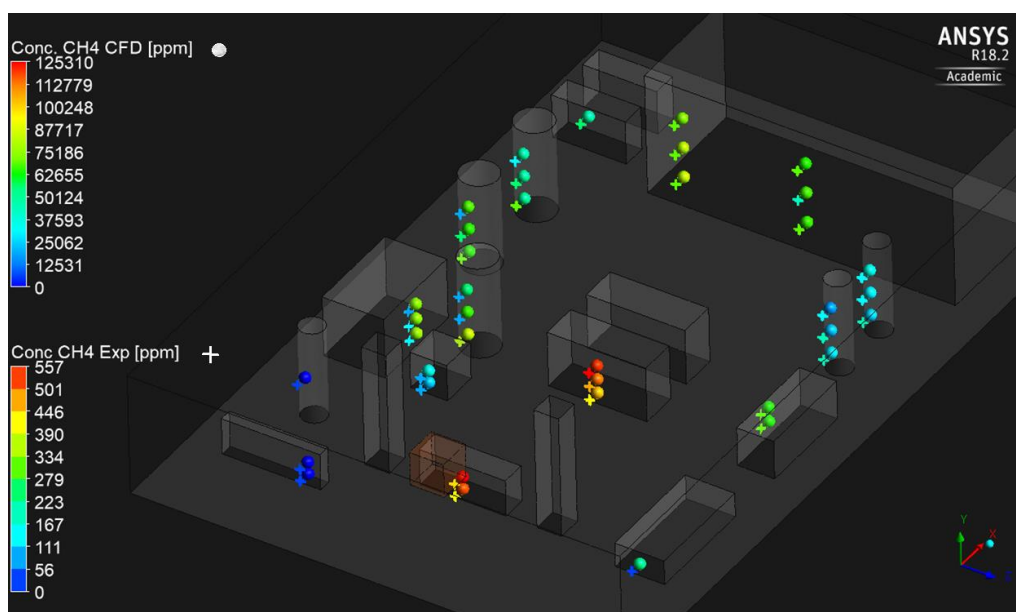


Figura 6.8 – Confronto grafico delle concentrazioni in ANSYS Fluent, Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., Pc

Confronto con le simulazioni CFD in scala

Si vuole offrire qui un esempio del confronto tra i valori risultanti dalle simulazioni CFD in scala e i valori misurati per il caso studio alla pressione maggiore P_c . In generale, i valori rilevati sono inferiori rispetto a quelli attesi.

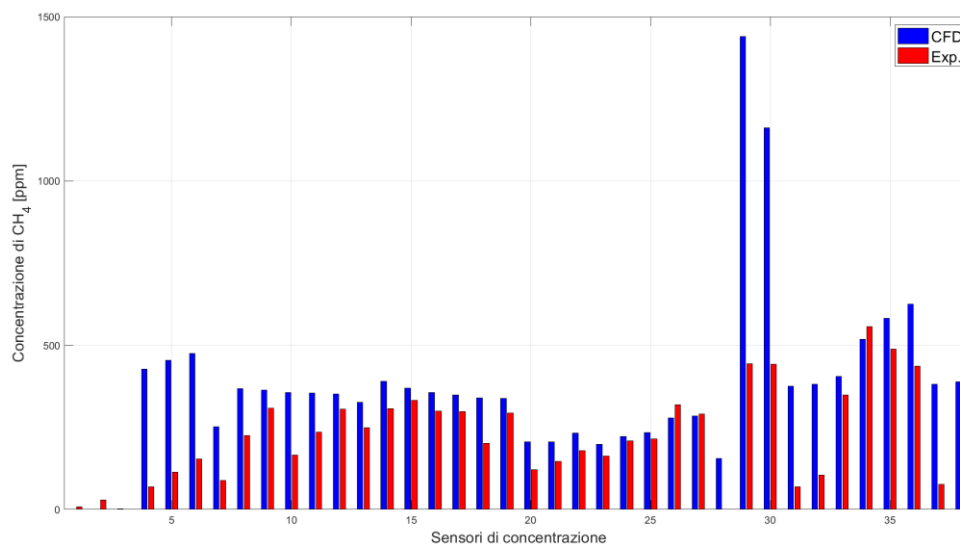


Grafico 6.45 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute dal CFD in scala (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 3, Vento 2,77 m/s a 0° s.s., P_c

6.3.4. POSIZIONE 5, VENTO 2,77 m/s A 45° S.S.

Nelle prove di rilascio 14, 15 e 16 con la Source Box in posizione 5 il vento incide sulla piattaforma alla velocità di 2,77 m/s con inclinazione a 45°.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle velocità

Si riporta un esempio di raffronto tra le velocità normalizzate per la pressione di rilascio P_c .

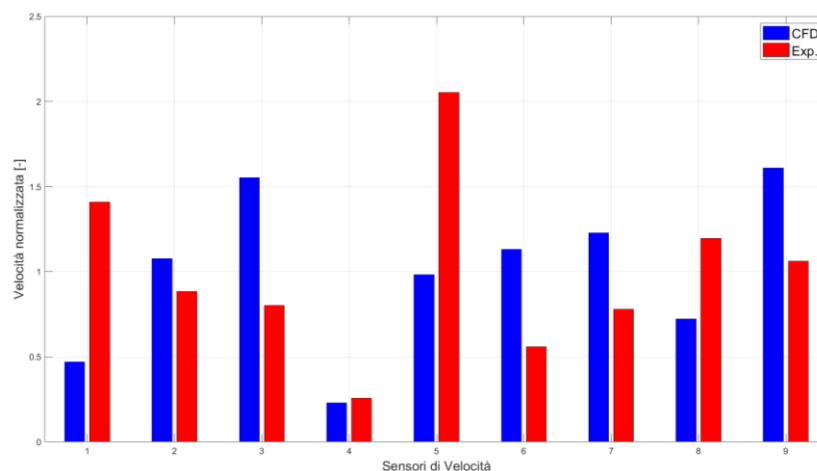


Grafico 6.46 – Confronto tra le velocità normalizzate ottenute da CFD e dalle prove sperimentali, Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_c

Pressione di rilascio:	P _a	P _b	P _c
Media Vel. CFD [m/s]	1,99	2,32	2,14
Max Vel. CFD [m/s]	4,26	4,47	3,45
Media Vel. Exp [m/s]	1,38	1,31	1,98
Max Vel. Exp [m/s]	2,93	2,57	2,85

Tabella 6.9 – Velocità medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 5 Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

Confronto con CFD full-scale: andamenti normalizzati delle concentrazioni

Si riportano i confronti tra gli andamenti normalizzati delle concentrazioni risultanti dalle simulazioni CFD e dalle prove sperimentali per i casi studio alle pressioni P_a e P_c.

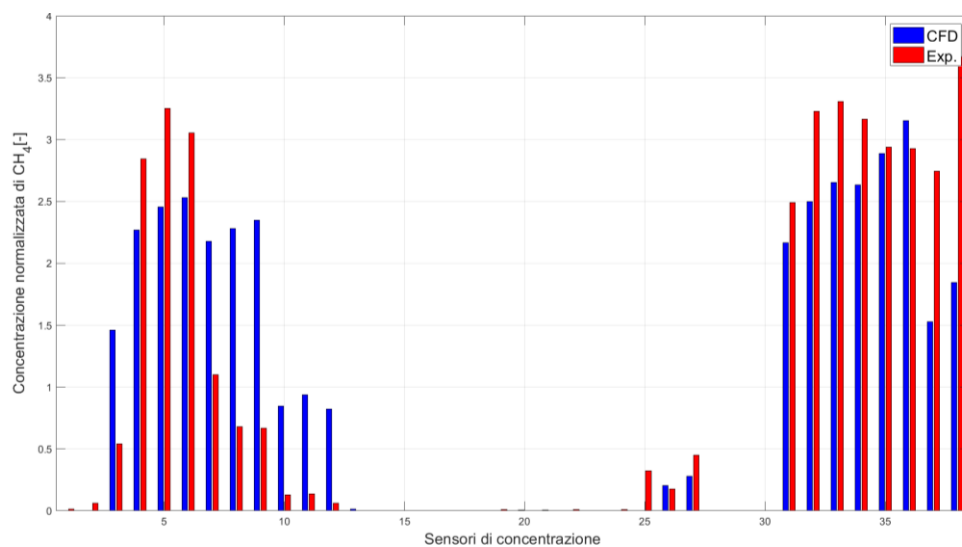


Grafico 6.47 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_a

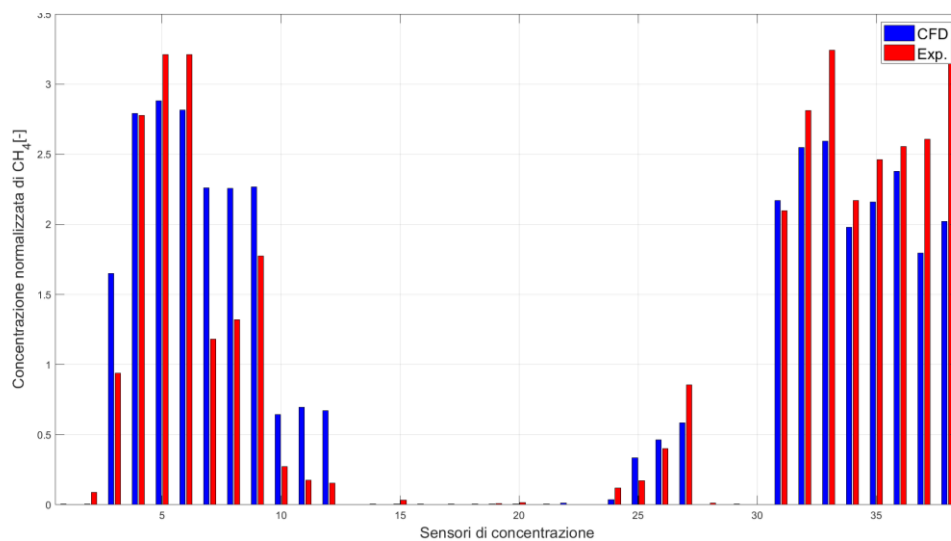


Grafico 6.48 – Confronto tra i valori normalizzati delle concentrazioni ottenute da CFD (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., P_c

Si riscontra un andamento simile ai precedenti anche nel caso alla pressione P_b . In generale, i grafici degli andamenti normalizzati a confronto mostrano un ottimo accordo ai diversi valori di pressione, con leggeri scostamenti in un numero limitato di sensori.

Dal momento che dagli andamenti di concentrazione mostrati è evidente che ci sono zone della piattaforma non coinvolte dalla presenza del rilascio, è interessante evidenziare nella mappa in Figura 6.9 quali sono i sensori investiti dalla nube di gas.

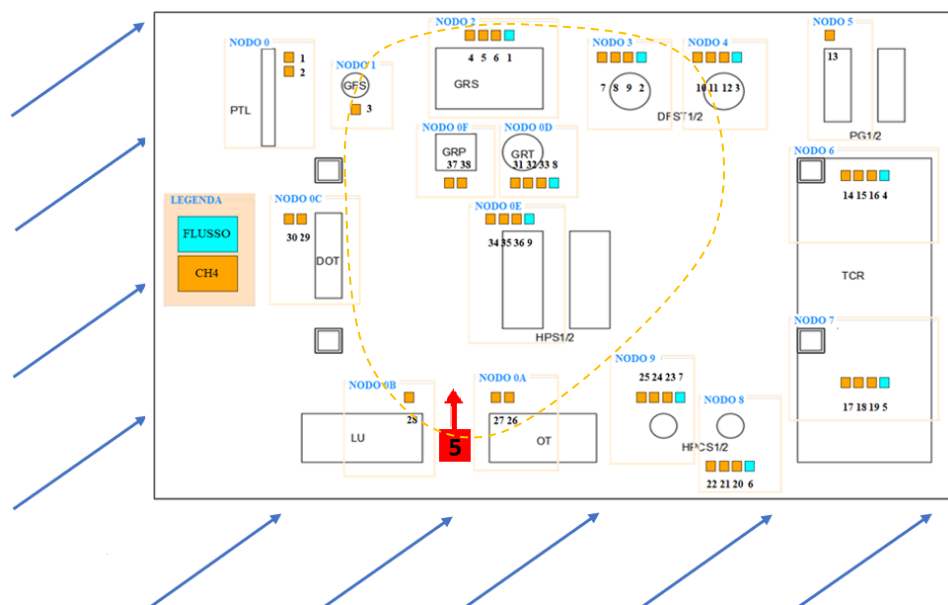


Figura 6.9 – Mappa dei sensori con rilascio in posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., in evidenza la zona interessata dalla nube di gas

Vengono qui specificate le grandezze di maggior interesse per ciascuna prova, ovvero le concentrazioni medie e massime, per entrambi i set di dati e per ogni livello di pressione. Le informazioni sono sintetizzate nella tabella e nel grafico che seguono. Con il fine di concentrare l'attenzione sui valori assoluti misurati nelle varie prove, sono mostrati nel Grafico 6.50 gli andamenti a confronto dei rilasci alle tre diverse pressioni.

Pressione di rilascio:	P_a	P_b	P_c
Media Conc. CFD [ppm]	22813	26719	31670
Max Conc. CFD [ppm]	71966	80696	91279
Media Conc. Exp [ppm]	114	133	159
Max Conc. Exp [ppm]	418	503	529

Tabella 6.10 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

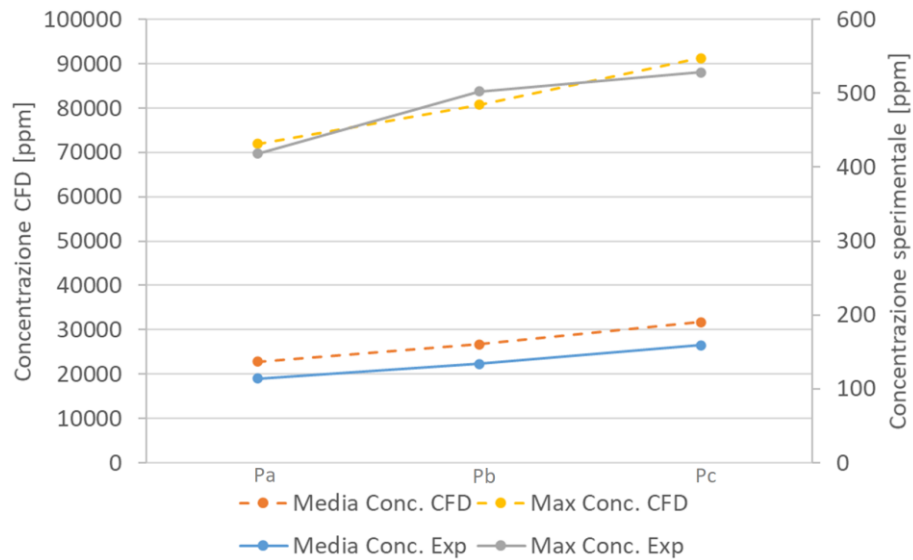


Grafico 6.49 – Concentrazioni medie e massime: CFD e dati sperimentali, Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s.

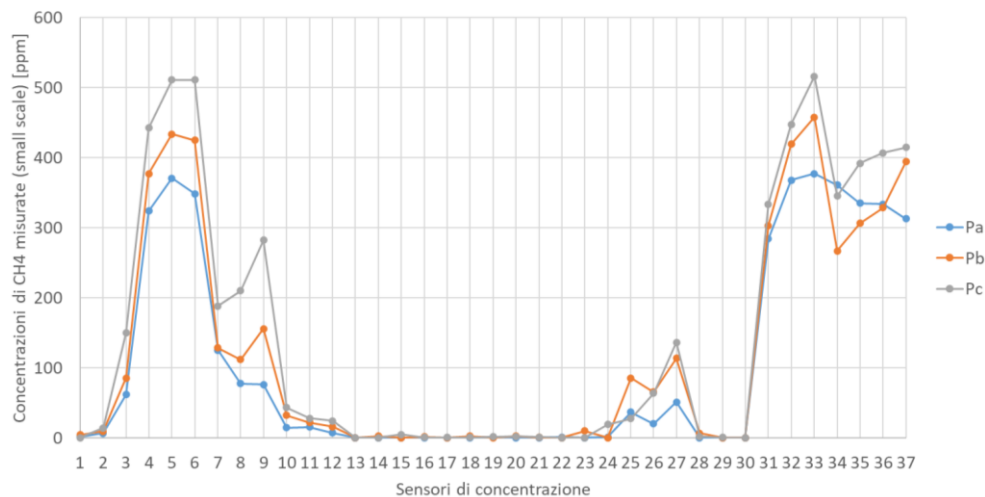


Grafico 6.50 – Valori rilevati dai sensori di concentrazione nelle prove 14 (Pa), 15 (Pb), 16 (Pc)

Confronto con le simulazioni CFD in scala

Sebbene gli andamenti normalizzati abbiano già dato un'idea dell'ottimo accordo delle rilevazioni sperimentali con i risultati della CFD full-scale, va verificata la concordanza dei valori assoluti misurati e quelli stimati tramite le simulazioni CFD in scala. Viene pertanto mostrato, a mo' di esempio, un grafico di confronto tra i valori risultanti dalle simulazioni CFD in scala e i valori misurati per il caso studio alla pressione maggiore P_c .

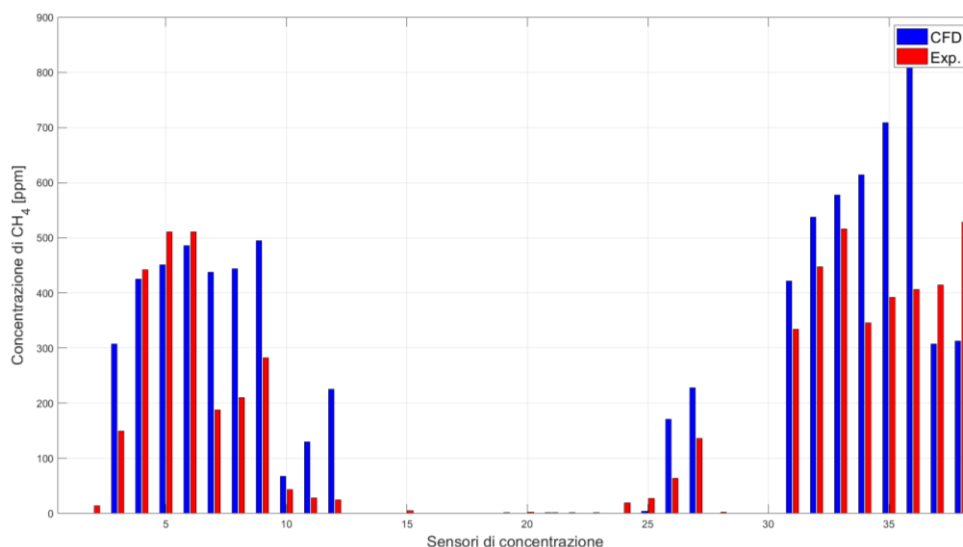


Grafico 6.51 – Confronto tra i valori delle concentrazioni ottenute dal CFD in scala (in blu) e dalle prove sperimentali (in rosso), Posizione 5, Vento 2,77 m/s a 45° s.s., Pc

La maggior parte dei sensori installati sul Mock-Up ha rilevato valori di concentrazione simili a quelli previsti dalle simulazioni CFD. Tuttavia, si rilevano scostamenti in corrispondenza dei nodi 3 e 0E, visibili in Figura 6.9. Il primo nodo è abbastanza distante dal punto di rilascio e questo potrebbe giustificare la discrepanza evidenziata. Riguardo ai sensori del nodo 0E, essi sono sì disposti nella direzione del rilascio ma il getto li lambisce lateralmente, non garantendo forse una corretta misurazione della quantità di metano presente.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha avuto come fine ultimo quello di dare un contributo iniziale alla validazione del metodo SBAM precedentemente sviluppato nell'ambito dello stesso progetto, volto allo studio delle conseguenze di rilasci incidentali a bordo delle piattaforme off-shore Oil&Gas. Si tratta di un approccio CFD innovativo che, traendo vantaggio dalla divisione del fenomeno delle fasi di rilascio e dispersione, consente una più rapida e accurata valutazione delle conseguenze dei rilasci, rispondendo così alla necessità imposta dall'analisi rischio di analizzare un elevato numero di eventi incidentali.

La ricerca del modello più adatto alla simulazione della fase di dispersione ha condotto, tra i diversi modelli RANS a due equazioni, alla scelta dei modelli $k-\omega$. In particolar modo il $k-\omega$ Standard è risultato in grado, più degli altri, di assicurare una buona convergenza della soluzione. Un ulteriore passo verso la definizione finale del modello da validare ha riguardato lo studio delle condizioni al contorno più adeguate alla reale rappresentazione delle condizioni di vento, nell'ipotesi di considerare uniforme il profilo di velocità in mare aperto all'altezza in cui si trova il deck di produzione. Si è potuto concludere che risulta fondamentale uno studio preliminare del solo campo di moto del vento, finalizzato all'estrapolazione dei profili di vento attesi in corrispondenza delle facce di ingresso in piattaforma. Gli andamenti così trovati sono stati importati ed imposti come condizione al contorno nelle simulazioni dei casi studio scelti per la riproduzione nella fase sperimentale.

Questa è stata resa possibile dalla realizzazione di una galleria del vento di grandi dimensioni, in grado di ospitare il Mock up, corredato da una strumentazione sensoristica atta alla rilevazione della presenza di gas in tutto il dominio della piattaforma. Le prove sperimentali sono state realizzate con una miscela di metano in aria al 2,2 % in volume e i parametri sono stati definiti in modo da garantire il più possibile condizioni di similitudine fluidodinamica con il caso reale attraverso regole di scalatura definite in lavori precedenti.

Prendendo parte alle fasi iniziali della sperimentazione nonché al commissioning della galleria stessa, il presente lavoro di tesi ha permesso di dare un contributo tanto alla selezione delle prove da realizzare in galleria del vento quanto all'analisi dei risultati ottenuti.

Sono stati realizzati due set di prove sperimentali. A seguito della prima, l'analisi dei dati ha consentito di individuare un errore nella definizione dell'offset nei sensori che, anziché essere impostato prima del rilascio, veniva effettuato a rilascio avviato, facendo così che i dati forniti nella prima prova rappresentassero valori poco significativi.

I dati raccolti dal secondo set di prove sperimentali hanno permesso di constatare, per molti dei casi studio analizzati, una buona coerenza con i risultati previsti dalla modellazione fluidodinamica, con alcuni scostamenti, di cui restano da stabilire le principali cause. Per quanto l'utilizzo dei modelli RANS nelle simulazioni CFD non garantisca la massima accuratezza nella modellazione delle zone vorticosi, le maggiori cause degli scostamenti sono da rinvenirsi negli errori e nelle incertezze derivanti dalla fase di sperimentazione.

La non perfetta uniformità del campo di moto generato in galleria del vento, le difficoltà nella movimentazione e nell'esatto posizionamento del Mock-Up all'interno della galleria, così come le possibili imprecisioni nel direzionamento del getto, possono essere alla base di una differente distribuzione delle concentrazioni in piattaforma. Ultimo aspetto finora non citato ma non trascurabile è l'effetto delle condizioni di temperatura ed umidità esterne che possono condizionare il fenomeno di dispersione della nube in piattaforma. Per via dell'esiguo numero di prove effettuate per ciascun caso studio, non si è potuto comprendere il margine di influenza di questo aspetto sulle rilevazioni.

Riguardo alla sensibilità degli strumenti a disposizione, questi si sono rivelati adatti alla rilevazione di quantità di metano anche molto piccole. Gli errori delle misure sperimentali sono stati calcolati mediante l'utilizzo della deviazione standard a partire dalle rilevazioni effettuate nei diversi time-step di un'unica prova per ciascun caso studio (escludendo cioè la prima che non ha fornito risultati comparabili). Pertanto, l'intervallo di errore individuato non tiene conto né della ripetitività dell'esperimento né dell'incertezza degli strumenti di misura, aspetto che andrebbe integrato nel prosieguo delle attività. Va inoltre sottolineato che una ripetizione delle prove consentirebbe non solo di dare maggiore rilevanza ai risultati ottenuti tramite una più accurata stima degli errori, ma anche di comprendere le motivazioni alla base degli scostamenti individuati nello studio dei vari rilasci incidentali.

Sarebbe interessante, in vista di lavori futuri, comprendere quale sia la relazione che lega le concentrazioni ricavate dall'implementazione CFD del modello SBAM in scala reale e le effettive concentrazioni misurate sulla piattaforma in scala. Una relazione potrebbe essere ricercata mediante un fitting lineare degli andamenti, che consentirebbe di stabilire una correlazione diretta tra CFD e dati sperimentali e di definire quindi la distribuzione attesa delle concentrazioni sul Mock-Up. Si tratta di un aspetto che non è stato approfondito nel presente lavoro e che meriterebbe un'attenzione maggiore.

In ogni caso, i dati raccolti nella questa campagna sperimentale sono risultati in buon accordo con la previsione teorica mediante l'utilizzo dell'approccio SBAM, evidenziando una buona coerenza nell'andamento delle concentrazioni rilevate nei due casi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA, "World Energy Outlook 2019", "<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/gas>", disponibile il 26/11/2020.
- [2] "<https://www.marinelink.com/news/offshore-energy-outlook-474143>", disponibile il 26/11/2020.
- [3] "<https://www.offshore-mag.com/production/article/16769815/eia-offshore-crude-oil-production-hit-fiveyear-high-in-2015>", disponibile il 26/11/2020.
- [4] "<https://www.naturalgasintel.com/offshore-natural-gas-discoveries-production-overtaking-oil/>", disponibile il 26/11/2020.
- [5] "<https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2018/11/Offshore-Energy-Outlook.pdf>", disponibile il 26/11/2020.
- [6] "<https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/dati/ricerca-e-coltivazione-di-idrocarburi/piattaforme-marine>", disponibile il 26/11/2020.
- [7] "<https://unmig.mise.gov.it/>", disponibile il 26/11/2020.
- [8] Consiglio dell'Unione Europea, Parlamento europeo, "DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO", 2013.
- [9] Parlamento Europeo, "DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015 n.145", 2015.
- [10] F. Terlizze, "Editoriale MISE", introduzione della rivista Geoingegneria Ambientale e Mineraria n. 152, 2017.
- [11] A. Carpignano, "Risk Analysis Booklet", Politecnico di Torino, 2017.
- [12] TNO – "Methods for the calculation of the Physical Effects", CPR 14E – 3rd ed. , 1997
- [13] "http://www.linde-gas.it/it/images/21714%20Anidride%20carbonica_tcm335-234280.pdf", disponibile il 26/11/2020.
- [14] A. S. Gexcon, "Flacs v10.4r2 user's manual, Technical report", 2019.
- [15] A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson, F. Swaffield (1984), "The Structure and Concentration Decay of High Pressure Jets of Natural Gas. Combustion Science and Technology", Vol. 36, pp. 249-261.2
- [16] D. P. Nolan, "Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities", 2011.
- [17] P. G. B. Franquet, "Review on the underexpanded jets", September 2015.

- [18] S. Sklet, "Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: Release scenarios and safety barriers". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 19, Issue 5, pp. 481- 493. "<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.12.003>", 2006.
- [19] C. Vivalda, R. Gerboni, A. Carpignano, "A practical approach to risk-based gas monitoring system design for oil and gas offshore platforms", Politecnico di Torino, 2018.
- [20] Georingegneria Ambientale e Mineraria, Anno LIV, n.3, "Modelling of a supersonic accidental release in Oil&Gas offshore: characterisation of a source box", 2017.
- [21] C. Rupolo, "Modellizzazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes", Politecnico di Torino, 2018.
- [22] S. Crist et al., "Study of the highly underexpanded sonic jet", *AIAA Journal*, Volume 4, No.1, pp 68-71, 1966.
- [23] F. Pappalardo, "Comparison of CFD numerical approaches for the simulation of accidental gas release in energy applications", Politecnico di Torino, 2020.
- [24] S. Guasco, "Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a flat plate", Politecnico di Torino, 2015.
- [25] E. Pederiva, "Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder", Politecnico di Torino, 2015.
- [26] T. Corti, "CFD modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box", Politecnico di Torino, 2016.
- [27] G. Ledda, "Modello CFD di rilasci di gas compresso: analisi di sensitività dei parametri caratteristici", Politecnico di Torino, 2019.
- [28] A. Moscatello, "Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in piattaforme Oil&Gas", Politecnico di Torino, 2018.
- [29] A. Moscatello, A. C. Ugenti, G. Iuso, D. D'Ambrosio, G. Cafiero, R. Gerboni, A. Carpignano, "Scaling procedure for designing accidental gas release experiments", *Engineering Computations*, 2020.
- [30] J. Xing, Z. Liu, P. Huang, C. Feng, Y. Zhou, R. Sun, S. Wang, "CFD validation of scaling rules for reduced-scale field releases of carbon dioxide", *Applied Energy*, Vol. 115, pp. 525-530, 2014.
- [31] D. J. Hall, S. Walker, "Scaling rules for reduced-scale field releases of hydrogen fluoride", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 54, pp. 89-111, 1997.
- [32] A. Tortora, "Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme Oil&Gas supportata da modellazione CFD", Politecnico di Torino, 2018.

- [33] N. Bono, "Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti Oil&gas offshore", Politecnico di Torino, 2018.
- [34] D. D'Ambrosio, R. Marsilio, G. Cafiero, G. Iuso, "Progetto di massima per la realizzazione di una galleria del vento per impiego ambientale", Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS), Politecnico di Torino, 23 gennaio 2019.
- [35] SEADOG, "Stato avanzamento lavori - Rapporto conclusivo", Torino, ottobre 2020.
- [36] F. P., "Laboratorio SEASTAR Environment Park Torino - Progetto di allestimento degli spazi", Torino, 19 marzo 2019.