



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi termo-fluido dinamica di soluzioni tecnologiche per la mitigazione locale del clima urbano

G. Ulpiani, C. Di Perna, M. D'Orazio, E. Di Giuseppe



## ANALISI TERMO-FLUIDO DINAMICA DI SOLUZIONI TECNOLOGICHE PER LA MITIGAZIONE LOCALE DEL CLIMA URBANO

G. Ulpiani, C. Di Perna, M. D’Orazio, E. Di Giuseppe – Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: c. Controllo e valutazione delle infrastrutture pubbliche energivore

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione *“Analisi termo-fluido dinamica di soluzioni tecnologiche per la mitigazione locale del clima urbano”*

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Università: Costanzo Di Perna

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 INQUADRAMENTO.....	6
1.2 FASI OPERATIVE.....	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	10
2.1 SETUP SPERIMENTALE DI PICCOLA SCALA (ANCONA).....	10
2.1.1 <i>Metodologia</i> .....	10
2.1.2 <i>Risultati</i> .....	17
2.2 SETUP SPERIMENTALE DI MEDIA SCALA (ROMA).....	21
2.2.1 <i>Metodologia</i> .....	21
2.2.2 <i>Risultati</i> .....	23
2.3 MODELLO FLUIDODINAMICO DI PICCOLA SCALA.....	27
2.3.1 <i>Impostazione del modello</i> .....	27
2.3.2 <i>Risultati</i> .....	32
2.4 MODELLO FLUIDODINAMICO DI MEDIA SCALA.....	36
2.4.1 <i>Impostazione del modello</i> .....	36
2.4.2 <i>Risultati</i> .....	37
3 CONCLUSIONI.....	42
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	43
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	45
<b>BREVI CURRICULA VITAE DEL GRUPPO DI RICERCA.....</b>	<b>46</b>
<b>COSTANZO DI PERNA.....</b>	<b>46</b>
<b>MARCO D’ORAZIO.....</b>	<b>46</b>
<b>GIULIA ULPANI.....</b>	<b>46</b>
<b>ELISA DI GIUSEPPE.....</b>	<b>46</b>

## Sommario

Il presente report illustra le attività condotte e i risultati ottenuti dal gruppo di ricerca afferente all'UNIVPM nell'ambito dell'accordo di collaborazione con ENEA (Progetto D.6 del Piano Annuale di Realizzazione 2017) per l'attività di ricerca "analisi termo-fluido dinamica di soluzioni tecnologiche per la mitigazione locale del clima urbano". In particolare, si riportano la metodologia seguita e i principali output ottenuti relativamente alla valutazione di tecnologie per la mitigazione del surriscaldamento urbano locale attraverso sistemi base acqua.

Le tecniche water-spray figurano infatti, in letteratura, come strategie ad elevatissimo impatto di raffrescamento locale, anche dell'ordine di 7-10°C, ma pochissima informazione è stata raccolta sul dettaglio progettuale di tali sistemi (struttura meccanica, distribuzione degli ugelli, logica di regolazione, ...) quando finalizzati al contenimento dell'effetto isola di calore.

L'obiettivo ultimo del progetto di ricerca è dunque triplice: lo sviluppo prototipale di un adeguato sistema di nebulizzazione coadiuvato da un sistema di controllo automatico ottimizzato, la verifica sperimentale degli effetti di mitigazione del clima e la caratterizzazione numerica delle perturbazioni termodinamiche indotte in funzione della configurazione di sistema.

Due sono state le principali fasi operative:

### **1) Progettazione, realizzazione e valutazione sperimentale del prototipo di dispositivo per il raffrescamento di spazi urbani mediante sistemi di nebulizzazione, e sviluppo di un sistema di controllo.**

Si è definito, costruito e monitorato un dispositivo di micronebulizzazione, in diverse configurazioni e diversi contesti climatici. L'effetto locale di raffrescamento è stato quantificato nel tempo e nello spazio tramite mappature termoigrometriche. In relazione al sistema di controllo, è stato comparato il controllo on/off (tipicamente usato in tali applicazioni) ed un controllo a logica fuzzy orientata all'ottimizzazione del funzionamento secondo le letture contingenti delle variabili climatiche. Il dispositivo è stato valutato sperimentalmente in due diversi contesti: Ancona (ambiente semplificato) e Roma (ambiente urbano complesso).

### **2) Modellazione fluidodinamica a piccola e media scala.**

Il funzionamento del prototipo è stato caratterizzato in termini di comportamento termofluidodinamico e di impatto sulle grandezze microclimatiche locali, alla piccola e media scala, attraverso, rispettivamente, il software ANSYS Fluent e il software ENVI-met.

Le modellazioni sono state condotte in regime transitorio, osservando come l'introduzione del getto modifica la fluidodinamica dell'ambiente indisturbato (simulazione sia prima, che durante che dopo l'iniezione delle gocce nebulizzate). Diverse modalità realizzative sono state comparate (variando altezza, passo tra gli ugelli, passo tra i filari di ugelli) e diverse condizioni al contorno (ricostruendo sia l'ambiente semplificato di Ancona che quello più complesso di Roma).

La configurazione a massima prestazione, rapportata anche ai consumi ed alle problematiche di comfort, è stata infine identificata, caratterizzata e discussa.

## 1 Introduzione

In conseguenza dei cambiamenti climatici a scala globale, negli ultimi 15 anni sono considerevolmente aumentate, in frequenza ed intensità, le ondate di calore estive, nel nostro paese così come in tutta Europa. Il surriscaldamento è una delle principali minacce climatiche per le città (fenomeno dell'“isola di calore urbana” o “*urban heat island*”, UHI), a causa degli impatti correlati all'economia e la qualità della vita, quali: l'aumento del consumo di energia di raffrescamento e delle relative emissioni di CO<sub>2</sub>; il peggioramento della salute e del benessere; la minore produttività lavorativa e la riduzione della vita sociale.

Molte città stanno già lavorando a strategie di mitigazione del fenomeno UHI, mentre soluzioni di adattamento a scala urbana costituiscono tuttora una nuova sfida e richiedono l'urgente sviluppo di misure specifiche per modificare la progettazione e le strutture urbane. Questo non solo perché entro il 2050 si prevede che il 70% delle persone vivrà in città [1], ma soprattutto perché il processo di urbanizzazione di per sé comporta una profonda modificazione degli equilibri termodinamici preesistenti: ad elementi naturali (come vegetazione, bacini e corsi d'acqua) subentrano strutture artificiali che alterano i rapporti con i profili del vento e con l'irraggiamento solare, facendo sì che nell'ambiente antropico si registrino spesso temperature più elevate rispetto all'ambiente naturale.

Questo studio si è focalizzato sull'identificazione e caratterizzazione di una tecnologia di mitigazione del surriscaldamento di micro scala, basata sulla nebulizzazione di acqua, atta a rispondere ai seguenti requisiti:

- elevato impatto locale, al fine di proporre un'efficace contromisura ad eventi climatici estremi;
- potenziale di raffrescamento modulabile, per superare i limiti di tecnologie puramente passive;
- basso consumo di risorse primarie e basso costo, per non esaltare le disparità sociali e privilegiare questa strategia in situazioni di vulnerabilità;
- facilità di installazione, per garantire implementazione su vasta scala.

La scelta è ricaduta su sistemi di micronebulizzazione che, con portate di fluido estremamente limitate, si propongono come tecnologie base acqua ad elevatissimo potenziale di raffrescamento e capitale di investimento estremamente ridotto-

In questi sistemi, la geometria degli ugelli è progettata per polverizzare l'acqua generando finissime goccioline che vengono assorbite immediatamente dall'aria, potenzialmente senza bagnare oggetti e superfici. Questa condizione è prerequisito per un processo di evaporative cooling che possa considerarsi ottimizzato: non solo si sfrutta a pieno la riduzione di temperatura locale per assorbimento del calore latente di vaporizzazione, ma si evita che le superfici limitrofe si bagnino e come tale cambino le loro proprietà termo-ottiche (prima fra tutte l'albedo).

Tali ugelli possono essere svariatamente disposti ed integrati nello spazio urbano, ad es. sulle facciate di edifici, su pali, balaustre, ecc...

Lo studio qui riportato ha previsto la progettazione di un sistema micro-nebulizzante e la sua realizzazione secondo diverse configurazioni così da approdare ad una soluzione “ottimizzata”.

Il dispositivo realizzato integra un sistema molto articolato di sensori e attuatori, ovvero di strumenti di misura dei parametri climatici locali (temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento, ecc.) e di sistemi per il controllo automatico (attivazione della nebulizzazione in risposta al clima locale).

La struttura di sostegno degli ugelli è stata ideata in modo da essere rapidamente smontabile e rimontabile, senza necessità di occupare suolo pubblico (soluzione sospesa).

Il funzionamento del dispositivo è stato monitorato in ambiente reale, sia in un contesto urbano “semplificato” (su di un terrazzo nel complesso universitario della città di Ancona), sia in un contesto urbano “complesso” (all'interno di un parco a Centocelle, Roma) durante la stessa stagione estiva (Luglio-Agosto 2018).

La capacità, il raggio ed il tasso di raffrescamento sono stati caratterizzati in una varietà di condizioni al contorno, così da restituire una panoramica della casistica e identificare i limiti di efficacia, soprattutto in relazione ai moti di trascinamento indotti dal vento e dalla turbolenza locale.

Il dato sperimentale è poi servito per la calibrazione di modelli fluidodinamici simulati utilizzando i software ANSYS Fluent V.18.1 [2] ed ENVI-met v.4 [3], per verificare l'impatto del dispositivo rispettivamente su

piccola e media scala urbana. In particolare, con ANSYS Fluent si sono ricavati i profili termodinamici in regime transitorio nell'immediato intorno dell'elemento nebulizzante. Con ENVI-met si è simulato il microclima nell'area di influenza e il rapporto con il tessuto urbano.

Risultati numerici e sperimentali sono risultati armonici consentendo di definire e pienamente caratterizzare la configurazione a maggiore impatto di mitigazione.

## 1.1 Inquadramento

Tra le tecniche di mitigazione dell'ambiente urbano, l'uso dell'acqua è quello che vanta una tradizione secolare: ma, nonostante la sua ricca storia, la conoscenza scientifica sul suo potenziale di raffrescamento e sulla sua interazione con ambienti densamente abitati è molto più limitata rispetto ad altre tecnologie pur giovani ("*cool materials*", materiali riflettenti, in primis) [4].

Le tecnologie di mitigazione del fenomeno UHI "*water-based*", ovvero basate sulla presenza di acqua nei contesti urbani, agiscono sugli equilibri termodinamici del sistema in cui sono inseriti attraverso diversi meccanismi:

- evaporazione: il calore latente assorbito nel passaggio di stato viene sottratto al flusso di aria circostante abbassandone la temperatura. Tale fenomeno risulta benefico dal punto di vista del comfort outdoor [5];
- convezione: le condizioni microclimatiche del cosiddetto "*canopy layer*" (ossia lo strato di aria al di sotto dell'altezza media di edifici e alberi) sono fortemente influenzate dalle temperature superficiali: gli specchi d'acqua, ma anche le superfici bagnate possono trovarsi diversi gradi al di sotto della porzione di tessuto urbano adiacente. Questo comporta l'innescò di un flusso convettivo raffrescante che va in sinergia con l'effetto evaporativo e riduce la temperatura media radiante;
- riflessione: le superfici bagnate inducono anomalie di albedo. In generale, superfici lisce come quelle dei bacini acquosi, delle foglie o del suolo umido si comportano come riflettori speculari quasi-perfetti e come tale presentano albedo relativamente alta per bassi angoli solari. D'altro canto, terreni come quelli argillosi, quando umidi sono più scuri e l'umidità al loro interno assorbe la radiazione incidente (diminuzione di albedo). Si evince dunque, come questo ultimo meccanismo subisca l'incertezza di una casistica fenomenologica più varia.

Tutte queste dinamiche spiegano l'elevato potenziale di mitigazione locale della presenza di fonti di acqua interlacciate al tessuto urbano, tant'è che in letteratura si parla di "*Urban Cooling Islands*" nel caso di estese riserve come laghi e fiumi, con riduzioni medie misurate sperimentalmente anche di 1-2°C della temperatura in città [6].

La disponibilità di cospicue masse d'acqua è appannaggio però solo di alcune grandi conurbazioni sul pianeta ed i loro effetti possono comunque non raggiungere una adeguata penetrazione nel territorio.

Svariate tecnologie *water-based* sono state quindi sviluppate nel tempo, dalle fontane alle torri evaporative, dalle tende d'acqua agli sprinkler [5]. In un'ottica di efficienza energetica e sostenibilità, l'interesse si rivolge in questo contesto ai sistemi che contemperano la nebulizzazione (che permette di ottenere il massimo raffrescamento evaporativo a parità di portata di fluido) ad un controllo intelligente dell'emissione (per ridurre il consumo di risorse ed energia): gli *sprinkler* o sistemi nebulizzanti.

Per queste categorie, l'informazione esistente è piuttosto frammentaria e generalmente basata su modelli analitici. Pochi sono i dati raccolti su progetti a scala reale.

In dettaglio, Santamouris et al. [4] hanno identificato 11 articoli scientifici *peer-reviewed* per un totale di 17 casi studio, di cui uno focalizzato sugli sprinkler e basato su attività sperimentale [5] che riporta per due località di Siviglia (EXPO 92 e Mairena del Alcor) una riduzione massima di temperatura di 10°C e 7°C ed una media di 3°C e 4°C rispettivamente.

Data la diretta interazione con il flusso di aria (e di conseguenza con le persone), tale sistema richiede una progettazione particolarmente accurata e consapevole delle interazioni con l'ambiente circostante. L'efficienza di mitigazione dipende:

- dal design della struttura meccanica di supporto e della disposizione dei sistemi nebulizzanti (dimensione e forma degli ugelli, passo tra gli ugelli, prevalenza della pompa,...): gocce più piccole

(ottenibili con l'aumentare della pressione agli ugelli) ottimizzano il meccanismo evaporativo [7], mentre, oltre una data dimensione il beneficio in termini di riduzione della temperatura ambiente non è apprezzabile [8,9]. Il processo evaporativo deve, in ogni caso, essere completo per evitare bagnamento del passante;

- dalle condizioni climatiche esterne: velocità del vento, intensità di turbolenza, temperatura dell'aria, umidità relativa ed irraggiamento solare discriminano l'efficacia dello scambio termico. Nella fattispecie la capacità del volume di aria di accogliere ulteriore vapore determinano il potenziale evaporativo, mentre la differenza di temperatura aria-acqua innesca il meccanismo di convezione. Maggiori quantità di moto del flusso di aria alimentano, in entrambi i casi, l'intensità dello scambio termico, ma "disperdono" l'azione di mitigazione, diluendola.

Appare dunque chiara la necessità di integrare un opportuno sistema di controllo orientato all'ottimizzazione del potenziale di mitigazione (massimo raffrescamento locale entro limiti confortevoli di umidità) ed al risparmio energetico e di acqua (attivazione in presenza di idonee condizioni ambientali).

Poiché comunque, a temperature ambientali più alte corrispondono umidità specifiche maggiori e maggiori correnti convettive, l'utilizzo di tecnologie base acqua a raffrescamento evaporativo appaiono come una risposta naturale ed auto-calibrata al fenomeno di isola di calore urbano.

In questo contesto, l'obiettivo principe del progetto è la ricostruzione del profilo termodinamico nell'intorno della struttura di raffrescamento evaporativo per apprezzarne in dettaglio gli effetti di mitigazione locale, attraverso il monitoraggio di una piattaforma sperimentale di tipo prototipale in ambienti urbani a piccola e media scala, nonché la messa a punto di un codice numerico di simulazione ed ottimizzazione.

Alla luce sia della scarsità di informazioni reperibili in letteratura, che della quantità di parametri coinvolti, un approccio meramente simulativo appare infatti inadeguato ad indagare accuratamente la perturbazione indotta dalla presenza di un sistema nebulizzante nella distribuzione delle temperature ambiente e superficiali del contesto urbano in cui vengono inseriti, come anche le ripercussioni in termini di umidità relativa e turbolenza del flusso di aria.

Dal punto di vista prettamente tecnologico/strutturale, le scelte sono state orientate ad un design sospeso, rapidamente installabile, con componentistica a basso costo (flangiatura con tiranti/sistema a carrucole) per l'adeguamento a diversi contesti urbani. Tale linea di progettazione è nata come risposta sia alla volontà di testare lo stesso sistema in più contesti, ma anche e soprattutto come criterio di eguaglianza sociale vista la recente attenzione ai temi di energy poverty.

## 1.2 Fasi operative

Lo studio è stato concepito in tre blocchi atti a rispondere agli obiettivi di progetto di cui al paragrafo “Sommario”.

- 1 Progettazione, realizzazione e valutazione sperimentale del prototipo di dispositivo nebulizzante e del sistema di controllo.**

Durante questa fase si è progettato e realizzato un dispositivo prototipale per la valutazione sperimentale. Due tranches di monitoraggio si sono susseguite, prima in Ancona in ambiente fortemente controllato e poi a Roma all’interno di un parco pubblico.

Data la complessità fenomenologica, si è deciso di utilizzare un approccio non convenzionale, ossia di non realizzare un prototipo definito sulla base di risultati di simulazione, bensì di costruire un prototipo altamente modificabile per ottenere dati sperimentali indiscutibili, costruire in seguito un modello calibrato e verificare in tandem la configurazione a massimo potenziale di raffrescamento (altezza, passo tra gli ugelli, ...).

In questa fase è stato anche imbastito l’algoritmo di regolazione smart dell’erogazione della pompa, al fine di impartire una serie di regole operazionali ed imporre alla temporizzazione del getto una funzione obiettivo più che una durata prefissata.
- 2 Modellazione fluidodinamica a piccola scala.** In questa fase si è valutato, in regime transitorio, la termofluidodinamica nell’immediato intorno del sistema nebulizzante, attraverso l’ambiente di simulazione ANSYS Fluent. L’analisi è stata circoscritta all’area sottesa dalla matrice di nebulizzatori, in uno spettro temporale sufficiente ad osservare il pre, durante e post azionamento del sistema ed in una finestra di monitoraggio caratterizzata da bassissime velocità del vento (<1 m/s registrate in ambiente aperto, non mitigato) in modo da facilitare il tracking delle particelle all’interno del mezzo continuo (aria umida). Fluent consente un approccio misto Euleriano-Lagrangiano, particolarmente idoneo a simulare le dispersioni e le agglomerazioni di particelle (gocce in questo caso) in regime turbolento.
- 3 Modellazione fluidodinamica a media scala.** Nell’ottica finale di mitigazione del surriscaldamento urbano, il comportamento termodinamico del nebulizzatore va ad intrecciarsi con il complesso fenomenologico del “sistema città”. In questa fase, si è dunque sviluppato un modello a media scala (quartiere) attraverso il software fluidodinamico ENVI-met, già ampiamente validato per applicazioni affini [10–13] e capace di contemplare le interazioni tra flusso di aria, superfici e vegetazione cittadina.

ENVI-met genera un modello 3D microclimatico che interlaccia equazioni RANS (Reynolds-averaged non-hydrostatic Navier-Stokes) e modelli di turbolenza per la risoluzione dei moti d’aria, alla computazione dei flussi radiativi (diretti, diffusi e riflessi) scambiati dai materiali in gioco finanche alla dispersione di miscele o soluzioni multifase in ambiente. Il tutto in un infrastruttura computazionale molto orientata ai fenomeni dominanti nel “built environment”.



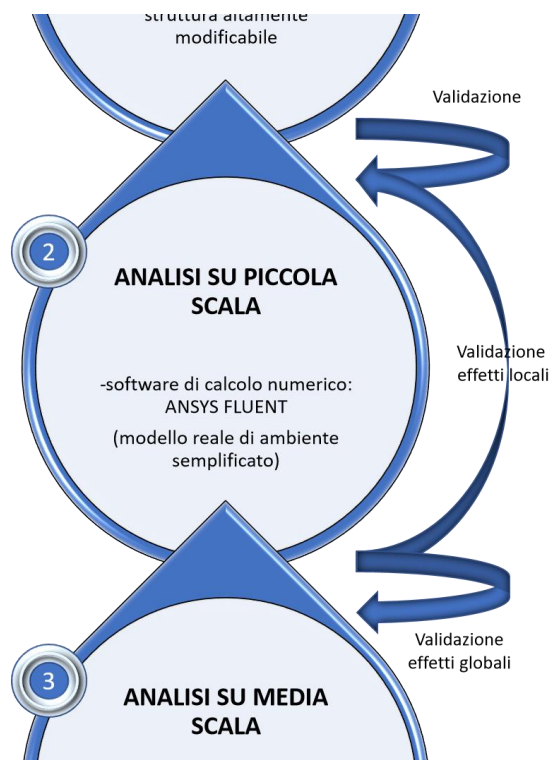


Figura 1. Schema delle fasi operative di progetto

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Setup sperimentale di piccola scala (Ancona)

La prima fase sperimentale è stata concepita e condotta al fine di:

- raccogliere e verificare le varie considerazioni tecniche e tecnologiche che stanno dietro l'installazione di un sistema di nebulizzazione (dalla manutenzione dei componenti, alla sicurezza anti legionella, alle specifiche di controllo, ...);
- progettare e conseguentemente realizzare un design flessibile, idoneo ad un'attività sperimentale orientata alla parametrizzazione ed all'ottimizzazione;
- organizzare ed armonizzare apparecchiatura di raffrescamento, network sensoriale, ridondanze di sicurezza, sistema di gestione.

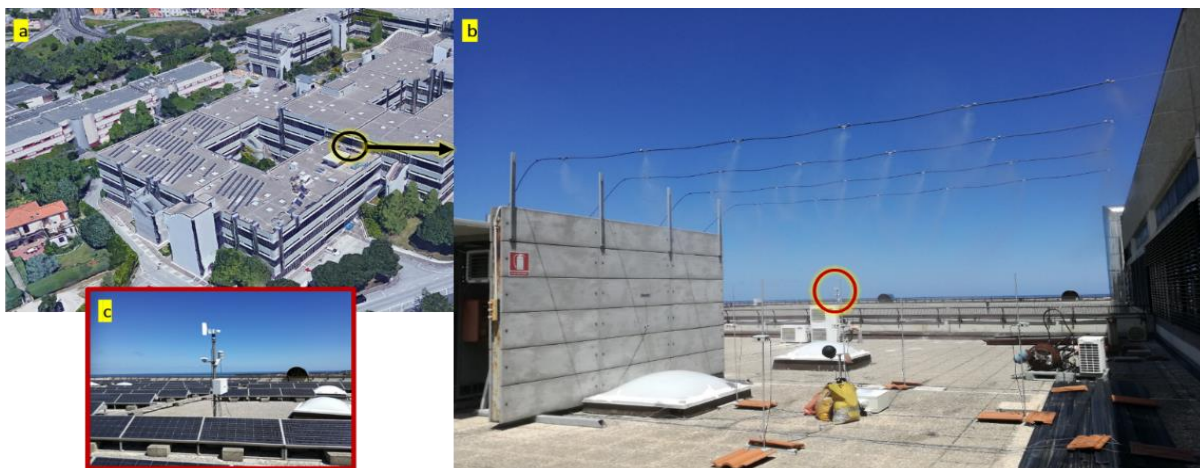
Nel seguente paragrafo è illustrata nel dettaglio la metodologia attraverso cui i suddetti obiettivi sono stati raggiunti.

#### 2.1.1 Metodologia

Il prototipo sperimentale si propone come piattaforma fisica sia per la convalida del modello di simulazione che per la verifica della fattibilità di realizzazione ed installazione.

L'apparato è mostrato in Figura 2. Come location è stato selezionato il terrazzo del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Science Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche.

Il sistema progettato prevede 4 cavi in acciaio di lunghezza 6,7 m, posti ad un'altezza di 3,3 m e ad interasse di 1,25 m, tesi tra due pareti esistenti (una parete in calcestruzzo e una parete in vetro e acciaio delimitante un ufficio). Ciascun cavo supporta 6 ugelli inox per la micronebulizzazione posti ad un interasse di 1 m. L'area interessata dalla nebulizzazione è quindi di circa 6,7 m x 4 m ("area nebulizzata").



**Figura 2. Immagine del setup sperimentale su piccola scala: a) Geolocalizzazione 3d del sito; b) panoramica del sistema di nebulizzazione; c) dettaglio della stazione meteo (cerchiato in rosso nella foto di panoramica).**

Nel dettaglio, per la fornitura di struttura e impianto pompante ci siamo rivolti alla ditta Euro Cooling, sia per la specializzazione nel settore che per la scalabilità e modularità della componentistica.

Gli elementi che compongono il sistema sono di seguito listati e descritti:

- Pompa Premium 70 Bar 3 Lt./min 230V 50 Hz, con manometro e carter coprimotore completa di valvola di ingresso e scarico linea + pressostato inverso per la prevenzione del funzionamento a secco;
- Sistema filtrante 1x9"- 3/4" con cartucce in melt-blown da 5 micron completo di staffa, nipples, 2 tubi di carico e chiave di serraggio;

- Tubo in poliammide da 1/4" in matassa da 50m;
- Ugello inox 0,20 mm 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e sistema antigoccia (x24);



**Figura 3. Ugello nebulizzante in acciaio inox**

- Raccordi portaugello a innesto rapido da 1/4" x 10/24" in due versioni a seconda del posizionamento: lungo la linea, quindi innesto su entrambe le estremità (x20) e in chiusura di linea quindi con innesto unilaterale (x4);
- Raccordi per tubo da 1/4" di tre tipologie: a "T" (x3), a "L" 90° (x4);
- Valvole di intercettazione (on/off slip lock) da 1/4", 1150 psi (x4).
- Graffa fissatubo 1/4" in acciaio con guarnizione (x50)

Non è stato previsto un sistema di accumulo a causa del rischio legionella.

Tramite le valvole di intercettazione su ciascun filare nebulizzante e tramite apertura/chiusura del singolo ramo si è potuto testare il funzionamento del sistema anche a carico parzializzato. Eventualmente inoltre, tramite aggiustamento della lunghezza dei tubi di collegamento tra una struttura portaugello a innesto rapido e l'altra, si sarebbe potuto variare anche l'interasse senza eccessivo sforzo di riallestimento. Tale modifica non si è però rivelata necessaria.

La precisione direzionale del getto è stata assicurata applicando una coppia di clip a cavallo di ciascun ugello e tenendo il filo in posizione mediante molle e tensionatori.

Dal lato del muro di cemento i fili sono stati morsettati a dei profilati a T e C, l'uno scorrevole entro l'altro a posizioni precise per poter eventualmente variare l'altezza, che è stata posta a 3.3m come da suggerimento del produttore (tra i 3 ed i 4 metri).

Le misure sono state condotte tramite 5 stazioni di rilevamento di temperatura ed umidità dislocate al centro del sistema e lungo il perimetro della zona nebulizzata in modo da considerare il disallineamento del getto dall'asse verticale prodotto dal vento. Si è quindi ricavata una mappatura su tutti e 4 i bordi per cogliere i gradienti spaziali di raffreddamento locale per ogni condizione di flusso d'aria.

Si sono utilizzati dei sensori di umidità relativa e temperatura miniaturizzati della Michell Instruments, i PCMINI52 di cui si riportano le principali specifiche tecniche:

- Range di misura: 0–100% per l'umidità relativa e -20 to +80°C per la temperatura;
- Accuratezza: <math>\pm 2\%</math> (10–90%) per l'umidità relativa e <math>\pm 0.2^\circ\text{C}</math> per la temperatura;
- Tempo di risposta: <math>< 10\text{ sec}</math> (per 90% di step change)
- Segnale in uscita: 0 - 10 V
- Voltaggio di alimentazione: 14 - 35 V DC
- Materiale: modello base in polimero plastic
- Connettore da 12mm con cavo da 5m
- Cappuccio di protezione in HDPE da 13mm

Una stazione meteorologica, posta a circa 50m dal sistema nebulizzante (vedi Figura 2), dunque in ambiente indisturbato, ha permesso di connotare le condizioni al contorno. La stazione, della LSI Lastem, si compone di:

- Termoigrometro DMA 572.1 (PT 100 + sensore capacitivo), con campo di misura  $-30 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura) e  $0 \div 100 \text{ } \%$  (umidità relativa), accuratezza  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  per la temperatura, mentre per l'umidità  $1,5\%$  ( $5 \div 95\%$ ,  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $2\%$  ( $<5, >95\%$ ,  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Tempo di risposta: 10s. Uscita  $0 \div 1 \text{ V}$ .
- Tacogonioanemometro DNA 022 (a coppette), con campo di misura  $0-60\text{m/s}$  per la velocità del vento e  $0-360^\circ$  per la direzione, corrispondenti accuratezze del  $1,5\%$  e  $1\%$  sul valore letto e costanti di tempo di  $2,5\text{s}$  e  $0,74\text{s}$ .
- Radiometro globale DPA 153 (piranometro, prima classe), con range spettrale di  $285-2800\text{nm}$ , range di misura di  $0-2000 \text{ W/m}^2$ , incertezza inferiore al  $5\%$ , tempo di risposta inferiore a  $30\text{s}$ .

A tale sensoristica, si aggiunge una rete di sei RTD a piattina (range di misura  $-40^\circ\text{C} \div +80^\circ\text{C}$ , accuratezza  $0.05^\circ\text{C}$ , tempo di risposta  $T(90\%)=55\text{s}$ ) per le misure di temperatura superficiale in modo da caratterizzare il contributo radiativo e gli effetti della nebulizzazione sugli elementi prospicienti. In particolare, 3 RTD sono state montate sul lato ufficio su diversi materiali (vetro, telaio, finitura), 1 sul muro di cemento ed 1 a terra.

In Figura 4 sono riportati dimensioni e posizionamento dei sensori.

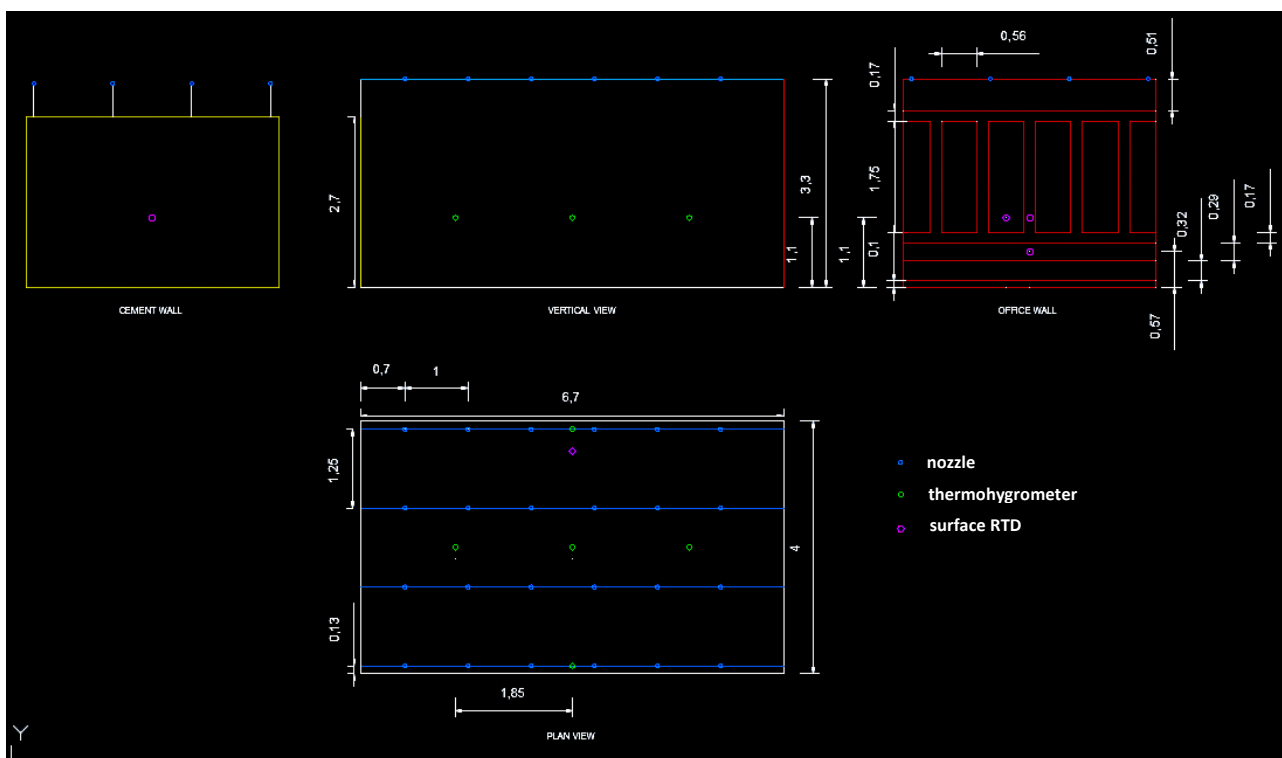


Figura 4. Viste quotate del setup sperimentale ed indicazione di posizionamento delle sonde.

Il sistema pompante è stato dotato di un controllore smart sviluppato in LabVIEW (vedi Figura 5), che tramite cicli di accensione e spegnimento ha gestito il tempo di ciclaggio in un base ad una logica fuzzy di autoadattamento alle condizioni meteorologiche esterne (e, per estensione, applicabile in modo predittivo attingendo alle previsioni meteo piuttosto che al dato contingente). A tal fine sono stati acquistati i seguenti componenti National Instruments:

- Modulo relay NI 9482, 30/60 VDC, 250 VAC, EM Form A, 4-Ch SPST;
- Modulo di ingressi in tensione NI-9205 C Series, 32-Ch, +/-10V, 250 kS/s/ch, 16-bit, terminaliera a molla.

La logica fuzzy è stata selezionata in quanto efficace in un controllo orientato al comfort [14–18]. L’approccio euristico, rule-based e mathematical-model-free risulta premiante in caso di fenomeni tempovarianti altamente caotici o non lineari, per la capacità di contemplare un numero virtualmente infinito di parametri nel processo di decision making, imitando il ragionamento umano [19].

Vista la complessità dei microclimi outdoor ed il ruolo sfaccettato del cosiddetto “parametro umano” [20] si è deciso di basare l’algoritmo su indici di linearizzazione algebrica tra parametri ambientali [21] che potessero quantificare il potenziale di raffreddamento evaporativo per ciascun contesto termodinamico. Tale scelta tiene in considerazione il fatto che l’utente non è forzato a vivere l’ambiente raffrescato, ma decide di sostare sotto i nebulizzatori. Come tale, indici empirici o di stress termico (normalmente utilizzati per valutare il comfort outdoor) non sarebbero stati significativi dal punto di vista del controllo.

Di fatto, quattro input sono stati dati in ingresso al controllore:

- l’ offset dalla temperatura neutrale, settata a 27.2°C, come da precedenti studi eseguiti a Roma [22];
- la radiazione solare, utilizzata per arbitrare casi di incipiente discomfort, considerando l’effetto della radiazione incidente sulla temperatura media radiante;
- l’Humidex (H), indice di correlazione lineare tra temperature dell’aria  $t_a$ , umidità relativa RH e pressione del vapore  $p_{as}$  secondo la seguente formulazione [23]:

$$H = t_a + 5/9 (p_{as} - 10) \quad (1)$$

$$p_{as} = 6.112 * \left( 10^{\frac{7.5 \cdot t_a}{237.7 + t_a}} \right) \frac{RH}{100} \quad (2)$$

- Cooling power index (PE), indice che combina gli effetti di temperatura e velocità del vento sulla sensazione di comfort dell’utenza [24,25]:

$$PE = 20.52 ws^{0.42} (36.5 - t_a) \quad (3)$$

Le scale di comfort di H e PE sono tabulati di seguito, come da letteratura:

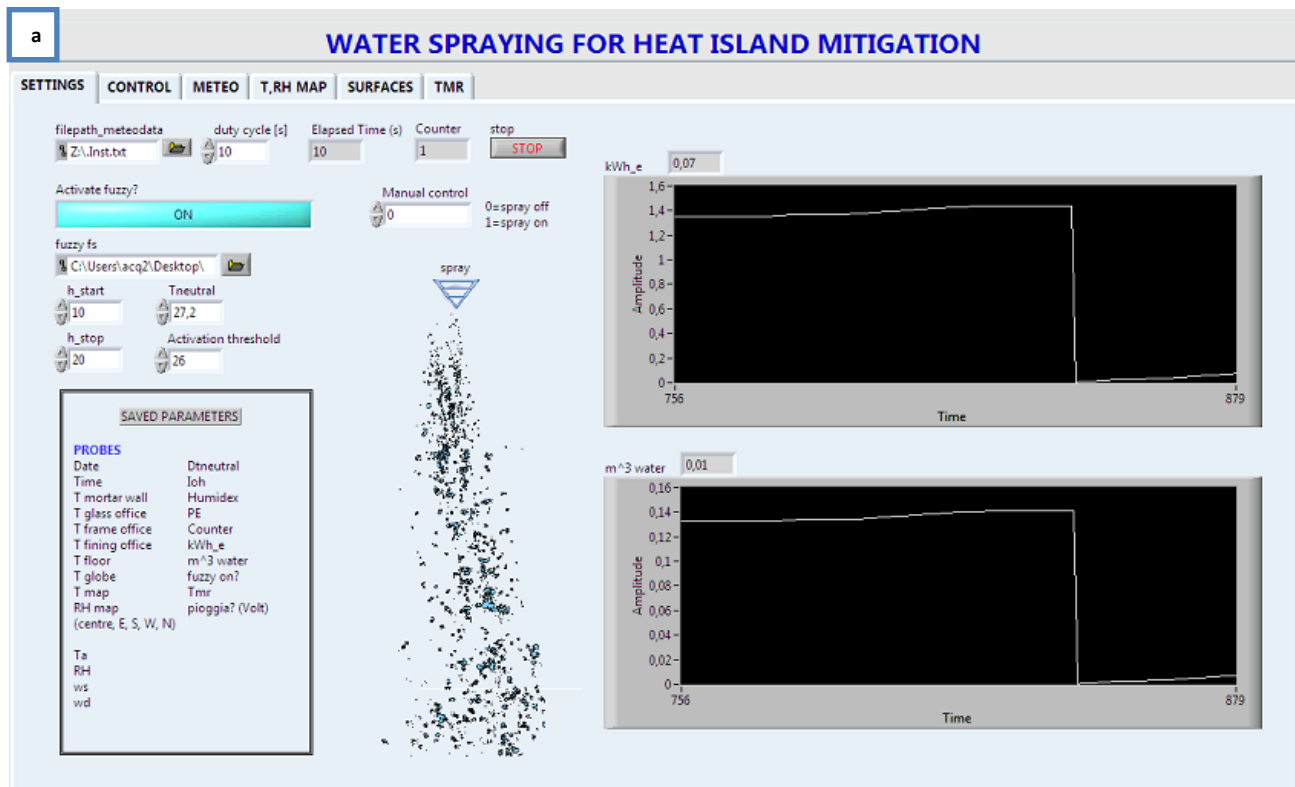
**Tabella 1. Soglie di comfort, relative agli indici H e PE**

H range	Degree of Comfort	PE range [mcal/cm <sup>2</sup> s]	Degree of Comfort
20÷29	Little to no discomfort	<5	Hot
30÷39	Some discomfort	5÷10	Mild
40÷45	Great discomfort (avoid exertion)	11÷15	Cool
>45	Dangerous (possible heat stroke)	16÷22	Cold
		23÷30	Very cold
		>30	Extreme cold

Le combinazioni dei vari parametri in variabili linguistiche e diversi gradi di appartenenza hanno portato a 300 regole, customizzate per l’applicazione. Le membership functions sono state impostate come trapezi, le cui coordinate sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Configurazione delle membership functions

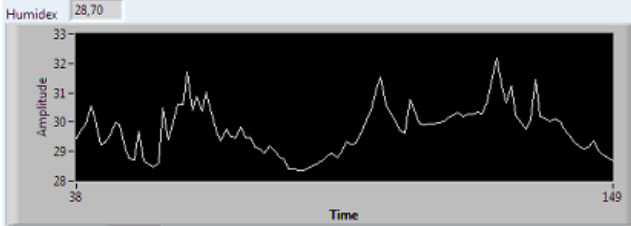
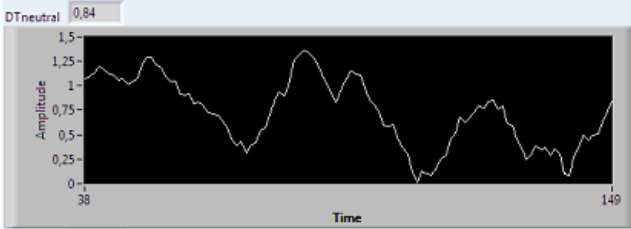
FUZZY MISO (MULTIPLE INPUT SINGLE OUTPUT) SETUP			
<b>DTneutral</b>		<b>HUMIDEX</b>	
<b>Membership function</b>	<b>Points</b>	<b>Membership function</b>	<b>Points</b>
NEGLIGIBLE	0 ; 0 ; 0,3 ; 0,5	LITTLE TO NO DISCOMFORT	20 ; 20 ; 29 ; 30
COMFORTABLE	0,3 ; 0,5 ; 0,75 ; 1	ACCEPTABLE DISCOMFORT	29 ; 30 ; 35 ; 36
ACCEPTABLE	0,75 ; 1 ; 1,75 ; 2	SLIGHT DISCOMFORT	35 ; 36 ; 39 ; 40
SLIGHTLY UNCOMFORTABLE	1,75 ; 2 ; 2,75 ; 3	GREAT DISCOMFORT	39 ; 40 ; 44 ; 45
UNCOMFORTABLE	2,75 ; 3 ; 25 ; 25	DANGER	44 ; 45 ; 50 ; 50
<b>Ioh</b>		<b>PE</b>	
<b>Membership function</b>	<b>Points</b>	<b>Membership function</b>	<b>Points</b>
CLOUDY	0 ; 0 ; 150 ; 200	HOT	0 ; 0 ; 4 ; 5
PARTLY CLOUDY	150 ; 200 ; 350 ; 400	MILD	4 ; 5 ; 10 ; 11
SUNNY	350 ; 400 ; 1200 ; 1200	COOL	10 ; 11 ; 15 ; 16
		COLD	15 ; 16 ; 40 ; 40



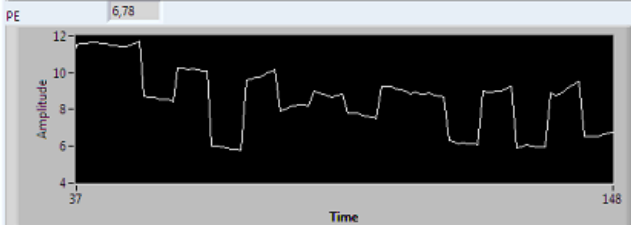
**b**

**WATER SPRAYING FOR HEAT ISLAND MITIGATION**

SETTINGS CONTROL METEO T,RH MAP SURFACES TMR



HI range	Degree of Comfort
20-29	Little to no discomfort
30-39	Some discomfort
40-45	Great discomfort (avoid exertion)
>45	Dangerous (possible heat stroke)

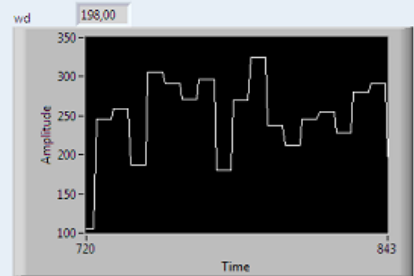
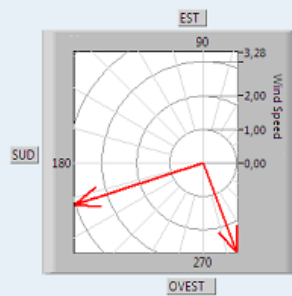
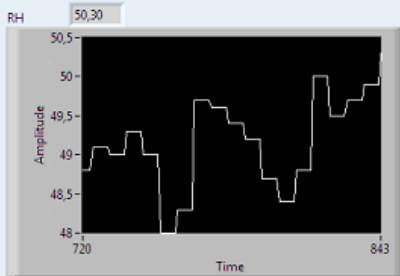
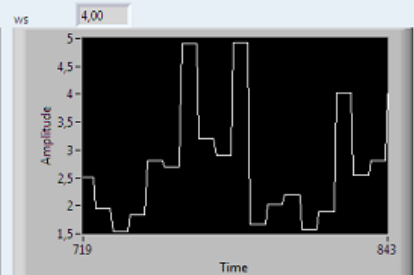
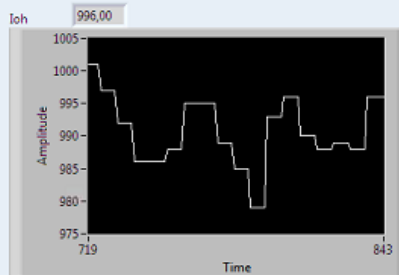
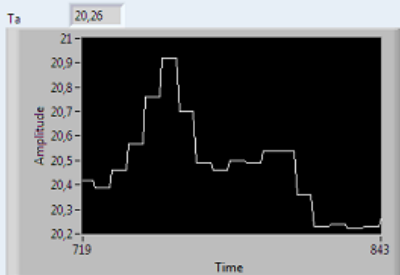


PE range (mcal/cm²s)	Degree of Comfort
<5	Hot
5-10	Mild
11-15	Cool
16-22	Cold
23-30	Very cold
>30	Extreme cold

**c**

**WATER SPRAYING FOR HEAT ISLAND MITIGATION**

SETTINGS CONTROL METEO T,RH MAP SURFACES TMR



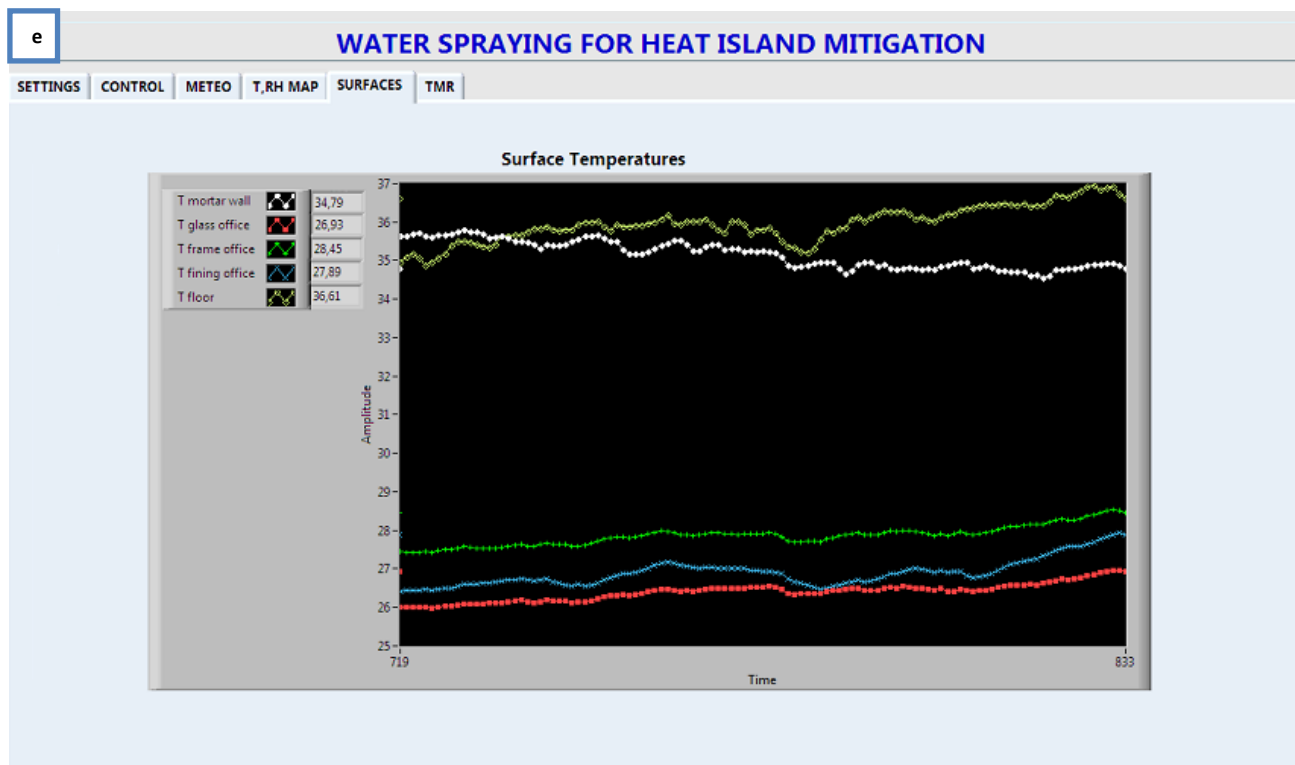
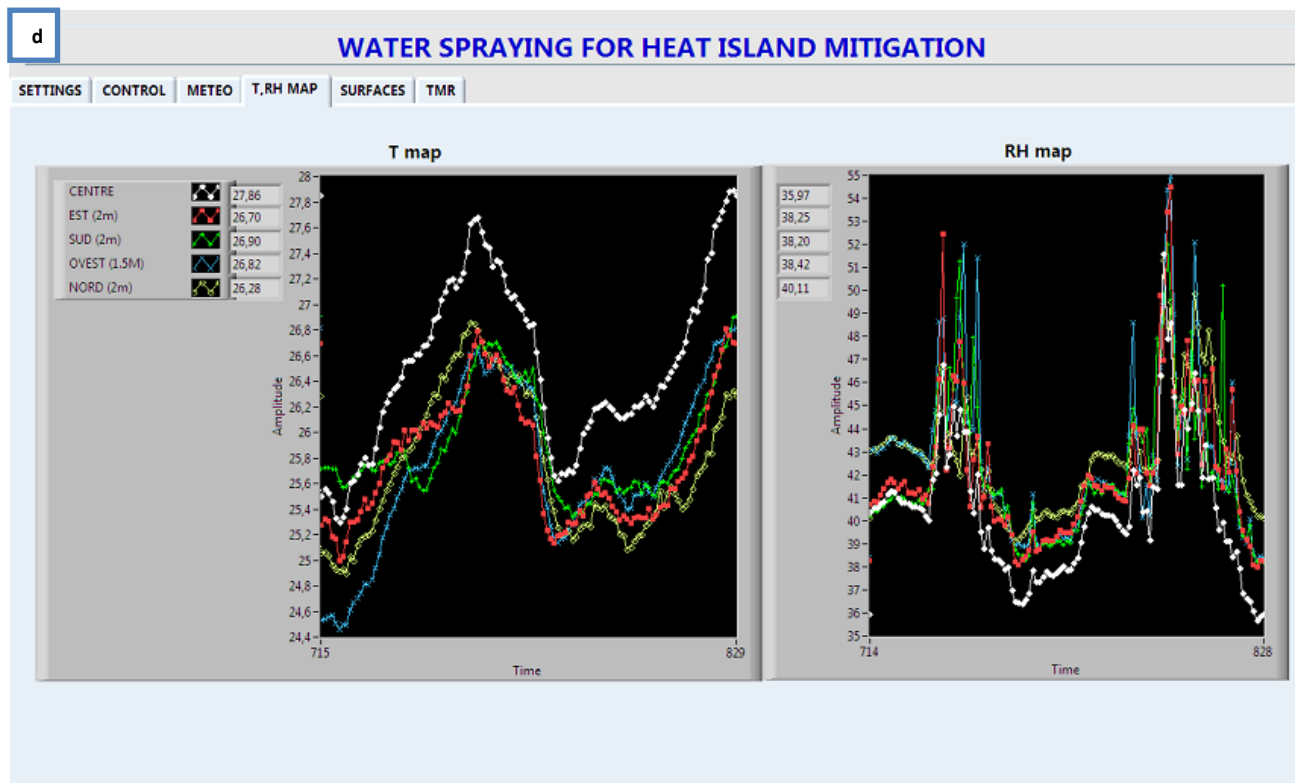


Figura 5. Interfaccia utente (front panel) del Virtual Instrument sviluppato in LabVIEW per la gestione del dataflow e l’attuazione della pompa. Dall’alto verso il basso: a) schermata di definizione della logica di controllo; b) schermata riassuntiva dei parametri di controllo; c) schermata dei rilevamenti meteo; d) schermata di mappatura termoisometrica sotto lo spray; e) schermata di mappatura delle temperature superficiali.



Alla sensoristica precedentemente descritta, si aggiungono infine manometro, misuratore di potenza e sensore di rilevamento pioggia per il bypass della routine di nebulizzazione.

Il sistema di micronebulizzazione è stato testato per un periodo di circa 2 mesi ad Ancona (6 Luglio 2018 – 20 Agosto 2018), durante i quali si sono eseguite diverse misurazioni, di mappatura termoigrometrica orizzontale e verticale (spostando tutti i sensori Michell a diverse altezze sul palo centrale), di parzializzazione del carico, di confronto di logica di controllo (con un normale on/off a 20s di azionamento e 10s di spegnimento).

### 2.1.2 Risultati

Ciascuna giornata è stata analizzata in dettaglio sotto il profilo termodinamico, in particolare sono state prodotte:

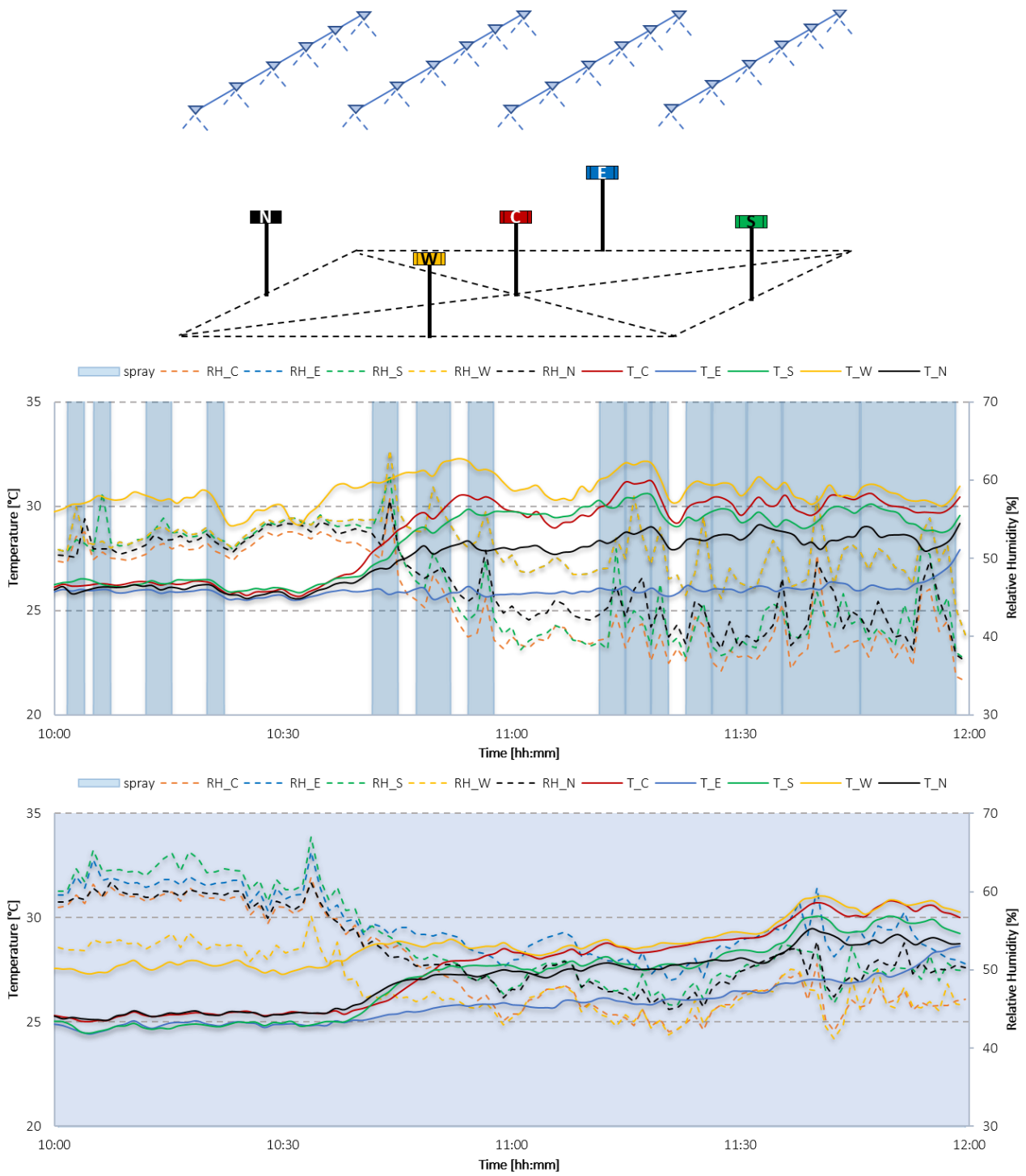
- una mappatura dei trend di temperatura ed umidità, restituiti dalle 5 sonde, identificate dal loro orientamento secondo i punti cardinali. In sovrapposizione è stato riportato il profilo di utilizzo dei nebulizzatori in linee verticali per relazionare intensità del raffrescamento alla durata dell'azionamento ed identificare eventuali ritardi tra spegnimento e massimo di riduzione di temperatura;
- una caratterizzazione della risposta del controllore in funzione delle grandezze di input: offset dalla temperatura neutrale ( $dT_{neutral}$ ), irraggiamento solare sul piano orizzontale ( $I_{oh}$ ), Humidex (H), Cooling Power Index (PE). In questo modo si è verificata la capacità del sistema di mantenere la temperatura nell'intorno del setpoint, mitigando al contempo i consumi nel momento in cui per ragioni di pressione di vapore o di vento, l'efficacia di nebulizzazione era da ritenersi compromessa.
- una tabulazione dei valori massimi, minimi e medi di raffrescamento rapportati alle condizioni medie giornaliere di temperatura, umidità, irraggiamento solare e velocità del vento, come anche al consumo elettrico ed idrico. Tale raccolta ordinata dei dati ha consentito di individuare giornate utili alla comparazione delle diverse configurazioni.

Si riporta, a titolo di esempio, il post-processing eseguito sulle giornate dell'8 Luglio 2018 e del 14 Luglio 2018 (che da tabella 3 risultano confrontabili in termini di condizioni meteo ambientali medie) in cui si palesa la differenza tra il controllore fuzzy ed un normale azionamento on/off. Tali risultati sono stati ottenuti considerando unicamente i dati nella fascia oraria di attivazione dei nebulizzatori, ossia 10:00-20:00.

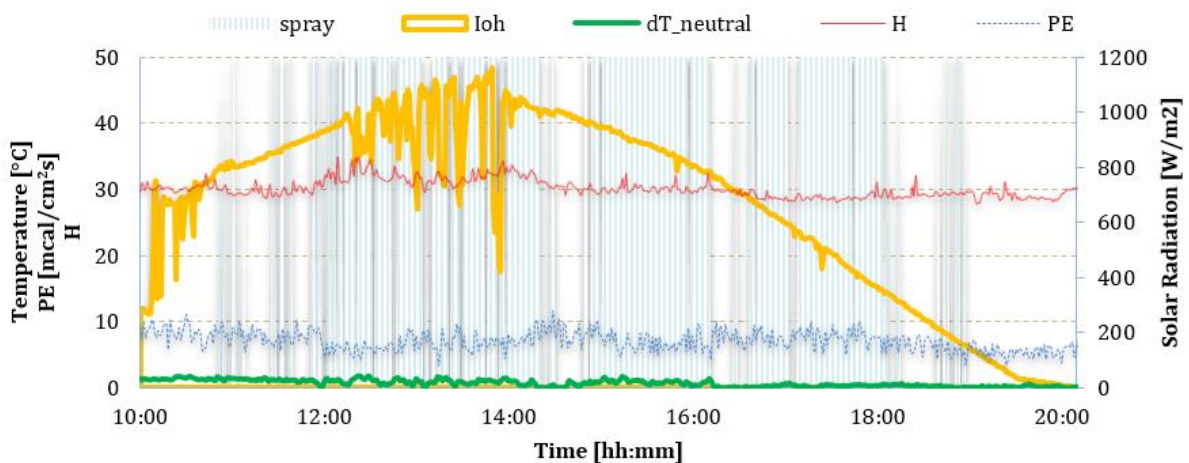
In particolare, in Figura 6 sono rappresentate le letture delle sonde Michell nell'arco temporale delle prime due ore di accensione per evidenziare le evoluzioni termoigrometriche a diverse posizioni, mentre in Figura 7 si graficano input ed output del sistema di controllo.

**Tabella 3. Confronto prestazionale tra logica fuzzy e logica on-off**

DATA	LOGICA	Ta [°C]	RH [%]	ws [m/s]	Dtneutral [°C]	Ioh [W/m2]	P [kWh]	Q [m3]	Dtmax [°C]	Dtmin [°C]	Dtmed [°C]
08-Jul	FUZZY	29.51	41.93	2.16	0.74	732.48	2.49	0.24	2.26	0.25	1.28
13-Jul	ON-OFF	30.32	55.15	2.13	1.30	710.94	6.13	0.60	2.55	0.03	1.28



**Figura 6. Profili di temperatura ed umidità relativa nello spazio sottostante i getti nebulizzanti. Sopra: 8 Luglio (controllo fuzzy), sotto: 13 Luglio (controllo on-off). Close-up temporale sulle prime due ore di attivazione (10:00-12:00)**



**Figura 7. Caratterizzazione del fuzzy in termini di grandezze di input ed output.**

In termini di raffrescamento, la gestione ottimizzata del getto secondo logica fuzzy, ha consentito di prolungare, accorciare o eventualmente spegnere l'iniezione di particelle in un inseguimento continuo della temperatura di comfort, previa elaborazione dei dati microclimatici. Come risultato, nella giornata dell'8 di Luglio è stato riscontrato un valor massimo di raffrescamento (ossia massima differenza tra lettura meteo e minima lettura dei sensori Michell) di 6.35°C, un valor minimo di 0.81°C ed una media di 2.26°C (deviazione standard 1.24°C). Nessuna particolare anomalia o inefficacia di funzionamento è stata evidenziata.

Il massimo raffrescamento, per il 13 del mese sotto controllo on-off, non ha invece superato i 4.90°C, dunque attestandosi 1.45°C al di sotto della performance del fuzzy. Il valor medio, come prevedibile, è risultato più elevato (2.55°C), sebbene di poco, dato che la nebulizzazione era attiva anche quando non necessario, obbedendo ad una mera schedulazione temporale. Il minimo invece ha valore negativo, -0.38°C, ad indicare una temperatura sotto gli ugelli maggiore di quella riscontrata al di fuori: questo è significativo di come la durata del getto non dovrebbe essere fissata a priori (rischiando di essere insufficiente a raggiungere un reale effetto di raffrescamento), ma dovrebbe obbedire a regole e funzioni obiettivo.

In termini di umidificazione, la matrice di nebulizzazione non ha inficiato le condizioni ambientali generali in nessuno dei due casi: i valori massimi, minimi e medi di umidità relativa (Tabella 4) tra ambiente mitigato (indicato con "S" in tabella) ed ambiente indisturbato (indicato con "U") sono di fatto identici. Anche la deviazione standard non varia significativamente. Va comunque sottolineato che il massimo incremento di umidità nell'arco di un minuto ha superato il +15% nel caso fuzzy ed ha rasentato il 10% nel caso on-off.

**Tabella 4. Umidità relativa sotto lo spray e in ambiente indisturbato nei giorni di confronto**

8 LUGLIO – CONTROLLORE FUZZY							
S				U			
MAX	MIN	AVG	DEV.S	MAX	MIN	AVG	DEV.S
72.81	26.75	49.78	12.09	71.40	30.50	50.46	11.28
13 LUGLIO- CONTROLLORE ON-OFF							
S				U			
MAX	MIN	AVG	DEV.S	MAX	MIN	AVG	DEV.S
79.13	39.92	58.23	8.09	78.90	46.50	58.04	7.35

In termini di algoritmo di controllo, la comparazione dei dati ha portato a verificare l’efficacia del controllore fuzzy contro il semplice on-off, dal punto di vista del livello di comfort outdoor e della gestione della domanda di raffrescamento: il getto veniva attivato quando effettivamente si era al di sotto della temperatura neutrale, in condizioni non eccessivamente ventose o umide.

Come si evince dal grafico in Figura 7, il fuzzy ha modulato l’attivazione del getto consentendo una gestione dell’offset dalla temperatura neutrale ottimale, anche in considerazione del fatto che il range di accettabilità, quando si parla di comfort outdoor piuttosto che indoor, è molto più ampio proprio per la consapevolezza dell’utente di poter esercitare un minor controllo sui parametri ambientali.

Nella fattispecie, il gap tra temperatura minima registrata dalle sonde sotto i getti e la temperatura neutrale di 27.2°C, si è mantenuto per il 18.1% del tempo nella fascia ±0.25°C, per un altro 22.7% nella fascia ±0.5°C e per il restante 59.1% al di sotto dei 2°C, senza mai eccedere tale soglia.

Nella giornata del 13 Luglio, quando il controllore on-off ha gestito l’attivazione della pompa, con al contorno condizioni ambientali equivalenti a quelle dell’ 8 Luglio, il profilo di offset è risultato pesantemente penalizzato: meno del 35% delle letture è ricaduto in un range di ±1°C dalla neutralità, con la massima percentuale (44.5%) tra +1°C e +2°C, ed un cospicuo 20% tra i 2°C ed i 5°C.

In termini di consumo, la differenza tra i due controllori risulta ancora più evidente. L’on-off, azionato di fatto per i 2/3 del tempo tra le 10 del mattino e le 8 di sera ha portato a consumare 6.127 kWh elettrici e 0.6 m<sup>3</sup> di acqua. L’azione dosata del controllore sfumato, ha consentito di gestire la potenza di raffrescamento in pacchetti di 10s, che, per una portata di 1,5l/min (quindi 1.5kg/min) considerando il calore latente di vaporizzazione dell’acqua pari a 2450 kJ/kg a 30°C, conduce ad una quantizzazione energetica pari a:

$$E_{min} = r \cdot \dot{q} \cdot t = 2450 \text{ kJ/kg} \cdot \frac{1.5 \text{ kg/min}}{60 \text{ s/min}} \cdot 10 \text{ s} = 612.5 \text{ kJ} \tag{4}$$

Il fuzzy è andato quindi a fornire quel tanto necessario a rientrare in limiti di comfort, gestendo le fluttuazioni di temperatura all’interno del range di accettabilità. Come risultato, il consumo dell’8 di Luglio risulta del 40.7% inferiore rispetto a quello del 13 Luglio, per un totale di 2.492 kWh elettrici e 0.244 m<sup>3</sup> idrici.

Si è comunque osservato che l’effetto di massimo raffrescamento, per un’altezza degli ugelli di 3.3m, si consumava al di sopra della quota standard dell’utenza (considerando livello testa, si parla di 1.7m per un soggetto in piedi e 1.1m per un soggetto seduto come da UNI EN ISO 7726 [26]). Per tale motivo, nella sperimentazione successiva, svoltasi a Roma, la matrice di nebulizzatori è stata abbassata di 0.5m.

## 2.2 Setup sperimentale di media scala (Roma)

### 2.2.1 Metodologia

La sperimentazione si è svolta a Centocelle, nell'area verde confinata compresa tra la Parrocchia di San Felice da Cantalice, la ASL RM B e Via degli Anemoni. Il parco si estende su una superficie rettangolare recintata di 50mx16m, con lato lungo in direzione nord-sud. Sul lato est il lotto è delimitato da un muro in calcestruzzo alto 1.35m. L'area risulta parzialmente ombreggiata per la presenza di 5 tigli.

Considerando le specifiche del sito, nell'ottica di mantenersi su una soluzione sospesa, è stato realizzato un sistema a carrucole per il sostegno dei filari con gli ugelli nebulizzanti. A tal fine sono stati utilizzati: un cavo di acciaio (diametro 5mm, 25m) e due fasce di aggancio per il collegamento albero-albero; un cavo di prolunga dei filari nebulizzanti (diametro 6mm, 20m nylon), 4 cappucci di aggancio alla ringhiera con saldati due occhielli distanziati di 5cm sull'asse verticale per il passaggio di andata e ritorno dei cavi sospesi, una coppia di carrucole (una lato albero, una lato ringhiera) per ciascun filare.

Il risultato finale ed alcuni dettagli sono riportati in Figura 8.

Il monitoraggio nel parco di Centocelle ha permesso di testare l'efficienza dell'impianto in un contesto di utenza vulnerabile: il parco è infatti destinato a famiglie della zona con bambini sotto i 4-5 anni di età, oltre che agli anziani del circolo bocciolo antistante.

Inoltre, confrontando i dati meteo delle stazioni di Roma, Centocelle risulta il sito a massima umidità relativa nell'orario di picco della temperatura.

In questo modo è stato possibile analizzare uno scenario d'uso peggiorativo sia in termini di utenza che di condizioni al contorno.

Durante il periodo di osservazione (23/08/2018-30/08/2018) è stato testato sia il funzionamento in continuo, che quello on-off, che quello fuzzy. Sono stati riproposti gli stessi settaggi delle prove sperimentali in Ancona.

Le sonde periferiche di temperatura ed umidità sono state collocate a 3m dalla centrale nell'asse parallelo ai filari nebulizzanti (sonde est ed ovest), a 2m nella direzione ortogonale (sonde nord e sud).

La stazione meteo è stata posta a circa 16 metri dal perimetro dei nebulizzatori, verso nord, in linea con il sensore Michell centrale. In tal modo l'ombreggiamento veniva risentito allo stesso dai tre sensori allineati lungo nord-sud e posti in mezz'ora del volume raffrescato e dal sensore meteo. Dai grafici di irraggiamento si è potuto quindi dedurre che l'area nebulizzata risultava per metà schermata ai raggi solari a partire dalle 4 di pomeriggio circa.

A partire dal pomeriggio del 27 Agosto, sono state installate sette ulteriori sonde di temperatura ed umidità, modello ATMOS 14 (semplice plug and play per datalogger DECAGON EM60G) di risoluzione 0.1°C e 0.1% ed accuratezza di 0.3°C e ±2% (rispettivamente sulle letture di temperatura e umidità relativa).

Quattro dei sensori sono stati montati su un treppiede a cavallo tra il 3° ed il 4° ugello del filare interno, lato sud. Si sono così delineati i profili a 1.1m, 1.7m, 2.1m e 2.5m di altezza, in contemporanea con le letture delle sonde Michell sul piano orizzontale a 1.1m.

Uno dei rimanenti detector è stato posto in affiancamento alla stazione meteorologica per la convalida dei dati, uno è stato attaccato al tronco dell'ultimo tiglio sul lato costantemente ombreggiato del parco per la verifica degli effetti di schermatura solare ed uno è stato collocato nella piazza antistante la chiesa di San Felice come riferimento per un ambiente indisturbato (senza il verde del parco, in piena esposizione solare e ventosa).





**Figura 8. Setup sperimentale a Centocelle. In ordine dall'alto a sinistra verso il basso a destra: panoramica del sistema nebulizzante, dettaglio delle carrucole e degli agganci ad albero, dettaglio del cilindro a doppio occhio sulla ringhiera in ferro, dettaglio del posizionamento della stazione meteo rispetto ai filari nebulizzanti.**

### 2.2.2 Risultati

Per ragioni di sicurezza, l'impianto è stato smantellato e ricostituito ogni giorno. Di conseguenza l'intervallo di tempo analizzato non è dalle 9 alle 21 come in Ancona, ma dalle 11 alle 19.

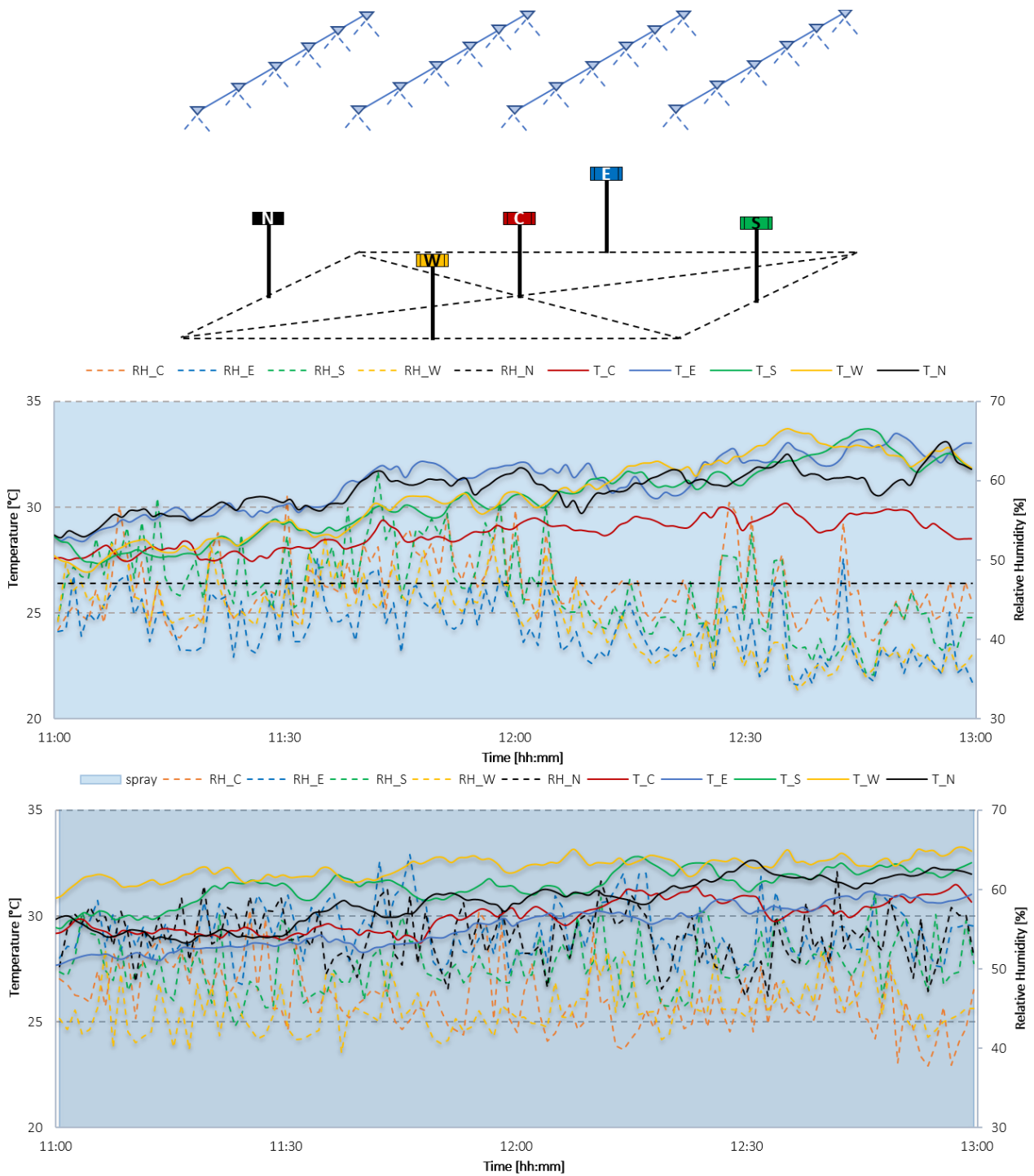
La caratterizzazione termodinamica è stata condotta in analogia con la sperimentazione in Ancona, per il periodo dal 23 Agosto 2018 (pomeriggio) al 30 Agosto 2018. Il 26 Agosto, a causa dei rovesci temporaleschi, non è stata eseguita alcuna misura.

Anche in questo setting, si sono eseguite misure di profilo termoigrometrico orizzontale e verticale. Oltre alle mappature termoigrometriche, sono stati nuovamente eseguiti confronti di logica di controllo, tra azionamento continuo (23-27 Agosto), on-off (28 Agosto) e fuzzy (29-30 Agosto).

Si riporta, a titolo di esempio, il post-processing eseguito sulle giornate del 28 Agosto 2018 e del 30 Agosto 2018 (sempre selezionate in virtù della comparabilità di condizioni al contorno) in cui si conferma la differenza tra il controllore fuzzy e l'on/off anche in contesto urbano più complesso.

**Tabella 5. Confronto prestazionale tra logica fuzzy e logica on-off (sperimentazione Roma)**

DATA	LOGICA	Ta [°C]	RH [%]	ws [m/s]	Dtneutral [°C]	loh [W/m2]	P [kWh]	Q [m3]	Dtmax [°C]	Dtmin [°C]	Dtmed [°C]
28-Aug	ON-OFF	29.58	45.92	0.66	1.32	561.90	4.90	0.48	1.76	-1.90	-0.06
30-Aug	FUZZY	30.12	52.18	0.71	1.74	539.67	3.68	0.36	1.25	-0.95	0.18



**Figura 9. Profili di temperatura ed umidità relativa nello spazio sottostante i getti nebulizzanti. Sopra: 28 Agosto (controllo on-off), sotto: 30 Agosto (controllo fuzzy). Close-up temporale sulle prime due ore di attivazione (11:00-13:00)**



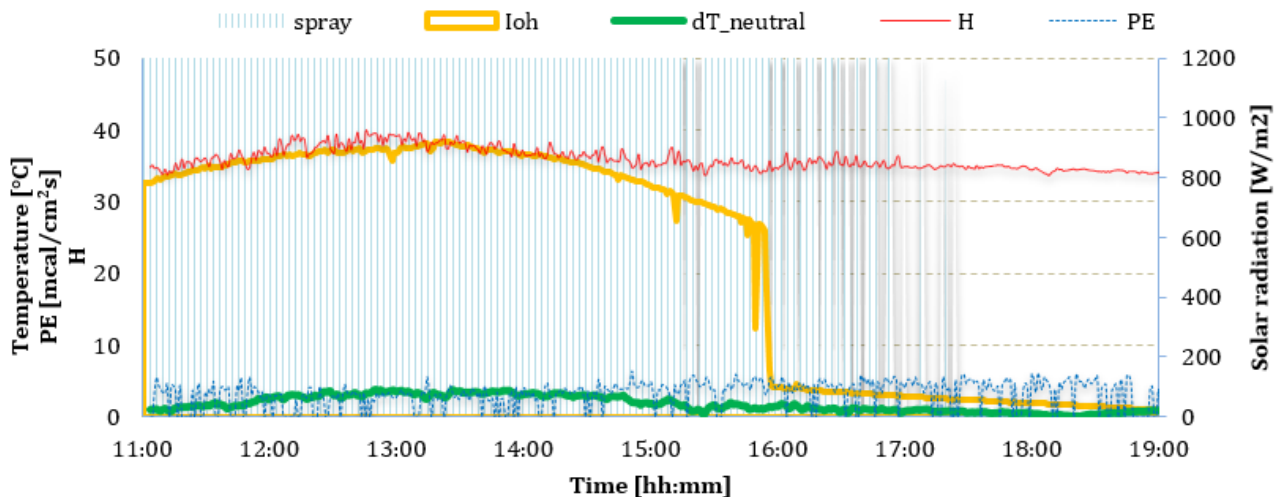


Figura 10. Caratterizzazione del fuzzy in termini di grandezze di input ed output.

In termini di raffrescamento, nella giornata del 28 di Agosto è stato riscontrato un massimo di  $6.14^{\circ}\text{C}$  (sempre calcolato come massima differenza tra lettura meteo e minima lettura dei sensori Michell), un minimo di  $0.31^{\circ}\text{C}$  ed una media di  $1.76^{\circ}\text{C}$  (deviazione standard  $1.21^{\circ}\text{C}$ ). Tuttavia, se invece della lettura minima si considera la media tra i 5 sensori Michell, la riduzione di temperatura misurata è in media quasi nulla, con segno negativo ad indicare leggero riscaldamento rispetto alla stazione meteo ( $-0.06^{\circ}\text{C}$ ). Sotto controllo fuzzy, quindi considerando i dati del 30 di Agosto, il massimo raffrescamento scende notevolmente ( $3.34^{\circ}\text{C}$ ) con una minima quasi nulla ed una media di  $1.25^{\circ}\text{C}$  (deviazione standard di  $0.93^{\circ}\text{C}$ ). In termini di media però si mantiene sui  $0.2^{\circ}\text{C}$  sotto la lettura della stazione meteo.

Si sottolinea tuttavia che:

- l'analisi è condotta sul periodo di osservazione 11:00-19:00: di norma il fuzzy smetteva di erogare potenza attorno alle 17:00 (dunque due ore prima dell'on-off) in quanto le temperature serali erano sufficientemente basse da non richiedere ulteriore abbattimento;
- il fuzzy non spingeva l'utilizzo dei nebulizzatori oltre il delta di temperatura necessario a ottenere neutralità termica. L'on-off invece, nel tardo pomeriggio, portava a ridurre la temperatura anche sotto i  $25^{\circ}\text{C}$  (grazie anche a minore irraggiamento solare, temperatura dell'acqua in uscita dagli ugelli più bassa, ...), generando discomfort ed innalzando i consumi;
- rispetto alla sperimentazione in Ancona, i venti spiravano a velocità molto più basse, rendendo meno spiccata la bontà dell'azione di controllo sfumata, il cui premio risulta particolarmente enfatizzato in condizioni di forze di trasporto elevate.

In termini di umidificazione, la matrice di nebulizzazione non ha inficiato le condizioni ambientali generali medie in nessuno dei due casi. Tuttavia, dalla Tabella 6, emerge che tra ambiente mitigato ed ambiente indisturbato il massimo di umidità relativa può differire di circa +15%, mentre il minimo di circa -5% sia in modalità on-off che fuzzy. La variabilità di condizioni igrometriche è dunque molto accentuata: la discrepanza, rispetto a quanto emerso ad Ancona, è da ricercarsi primariamente nella drastica riduzione della velocità del vento che abbatte la diluizione delle particelle di acqua e ne favorisce la coalescenza in loco.

**Tabella 6. Umidità relativa sotto lo spray e in ambiente indisturbato nei giorni di confronto (sperimentazione di Roma)**

28 AGOSTO – CONTROLLORE ON-OFF							
S				U			
MAX	MIN	AVG	DEV.S	MAX	MIN	AVG	DEV.S
76.72	28.21	47.69	7.33	60.60	33.80	46.06	5.93
30 AGOSTO- CONTROLLORE FUZZY							
S				U			
MAX	MIN	AVG	DEV.S	MAX	MIN	AVG	DEV.S
80.76	39.46	53.97	6.18	66.80	42.50	52.46	5.20

In termini di algoritmo di controllo, la comparazione dei dati di distribuzione delle letture di temperatura attorno al valore di setpoint ha portato nuovamente a verificare l’efficacia del controllo fuzzy.

Nel caso on-off, per circa il 40% del tempo, le letture di temperatura minima sotto i flussi nebulizzati si sono mantenute entro un 1°C dalla neutralità, ma per quasi la metà del tempo l’offset si è attestato tra 1 e 2°C con una percentuale non trascurabile di letture attorno ai 3°C e sporadici eventi oltre tale gap.

In regolazione fuzzy, la temperatura minima è ricaduta nella fascia 27.2±1°C per ben il 77% del tempo. Per il resto lo scarto non ha mai superato i 2°C.

In termini di consumo, l’on-off ha richiesto 4.9 kWh elettrici e 0.5 m<sup>3</sup> di acqua, contro i 3,6 kWh ed i 0.3 m<sup>3</sup> di acqua utilizzati dal fuzzy per far fronte ad analoghe condizioni meteorologiche. Di fatto, la riduzione dei consumi si attesta sul 26%. Si può dunque concludere che in diversi settings ambientali, il fuzzy consente comunque un notevole risparmio: l’impatto è tanto più elevato quanto maggiore è la ventosità del luogo, dato che tra le due logiche, solo quella sfumata ha a disposizione una serie di regole e pesi per determinare la giusta azione di controllo.

Infine si è osservato che, abbassando i filari a 2.8m di altezza, il profilo verticale di raffrescamento vede il suo massimo attorno ad un’altezza di 2.1m, dove però anche i livelli di umidità risultano particolarmente elevati (anche +7-10% rispetto alla lettura a 1.1m). A 1.7m il decremento di temperatura è comunque ancora sostanziale permettendo all’utenza di percepire riduzioni dell’ordine di 3-4°C rispetto all’ambiente indisturbato senza effetti di bagnamento. Tale profilo è ben evidente in tutte le modalità di azionamento, ma molto meno pronunciato con l’on-off. Prendendo ad esempio i due giorni delle precedenti analisi, risulta che in media:

- il 28 di Agosto (on-off), le temperature a 1.7m, 2.1m e 2.5m erano rispettivamente inferiore a quella a 1.1m di 0.44°C, 1.06°C e 0.97°C;
- il 30 di Agosto (fuzzy), le suddette differenze risultavano ampiamente enfatizzate, attestandosi rispettivamente sui -1.40°C, -2.28°C e -1.88°C.

Al netto di tutte le considerazioni, la soluzione fuzzy a 2.8m di altezza è risultata premiante rispetto a tutte le altre configurazioni investigate sperimentalmente. Per abbracciare una più ampia casistica, si è quindi affiancata all’analisi dei dati di monitoraggio, quella sui dati di simulazione, come descritto nei prossimi paragrafi.

## 2.3 Modello fluidodinamico di piccola scala

### 2.3.1 Impostazione del modello

Le simulazioni di piccola scala si sono basate su una semplificazione del setup sperimentale di Ancona, in modo da:

- facilitare il debug nelle impostazioni generali dei modelli termofisici necessari a ricreare il processo di raffreddamento evaporativo in ambiente outdoor;
- consentire la comprensione di come le varie fenomenologie coinvolte si interallacciano al netto dei disturbi dati dal contesto urbano.

Come tale, un volume di aria umida delle dimensioni 6.7[m]x4[m]x3.5[m] è stato centrato nel sistema di assi cartesiani x,y,z. Poiché i nebulizzatori vengono simulati da Fluent come iniezioni in punti ben definiti dello spazio con caratteristiche di spread, portata e direzione specificati, non è necessario introdurre alcun altro elemento geometrico ai fini della sua rappresentazione. Data la trascurabilità dell'ingombro fisico del sistema di supporto degli ugelli, tale setup risulta una ragionevole approssimazione della realtà.

E' stata quindi ricreata la matrice di 4 filari (interspaziati di 1.25m) da 6 ugelli ciascuno (interspaziati di 1m), così da osservare non solo le caratteristiche del getto singolo, ma anche l'interazione mutua di getti adiacenti.

Per la validazione del modello, sono stati selezionati i dati di monitoraggio della giornata del 13 Agosto, quando l'Università era chiusa per le vacanze estive. In tal modo si sono potuti escludere eventi molto complessi dovuti ad effetto camino e ventilazione incrociata attraverso porte e finestre sia antistanti il terrazzo della sperimentazione sia a piani sottostanti comunicanti attraverso il cortiletto centrale. La chiusura dei passaggi d'aria ha permesso di osservare un campo di moto molto più regolare.

La simulazione è stata eseguita su di un lasso temporale di un minuto, tra le 10:17 e le 10:18 del mattino in particolare. Le ragioni di tale scelta sono multiple:

- il vento era estremamente basso (0.76 m/s) e spirava da est, dunque era di fatto totalmente bloccato dall'ingombro dell'edificio universitario: in tal modo si è potuto osservare un getto sostanzialmente verticale;
- la nebulizzazione era rimasta pressoché inattiva nei 10 minuti precedenti, permettendo di inizializzare la simulazione in condizioni imperturbate;
- la nebulizzazione si era attivata per soli 30s nell'arco del minuto di osservazione, come tale si è potuto ricreare un profilo di utilizzo completo. In dettaglio, in 60s di simulazione si sono imposti 10s di pre-azionamento del getto, 30s di nebulizzazione e 20s di rilassamento delle condizioni termometriche nel volume di controllo.

Sulla base di queste scelte, si è proceduto alle varie fasi di costruzione del modello in ANSYS Fluent.

Per quanto concerne la mesh, sono state utilizzate le impostazioni generali di Relevance Centre Fine e Smoothing High. Le dimensioni massime e minime sono state settate per ottenere un numero di nodi ed elementi che fosse sufficiente ad apprezzare l'effetto di raffreddamento indotto dei nebulizzatori senza appesantire eccessivamente i tempi di calcolo. Come tale, la dimensione minima di cella è stata impostata a 8e-3m con una massima dimensione di faccia di 4.5e-2m. Ne risulta un numero totale di nodi pari a 999000 e di elementi pari a 968053.

Non sono stati inseriti inflation layers nè particolari bias nella distribuzione delle dimensioni di cella. Di fatto, adottando tale granulometria ed opportuni settaggi dei modelli di tracciamento delle particelle, si è assicurata la piena rappresentazione del processo evaporativo (nessuna particella risulta "incompleta" nel summary report della fase discreta, ad indicare che ciascuna goccia iniettata è stata continuamente inseguita).

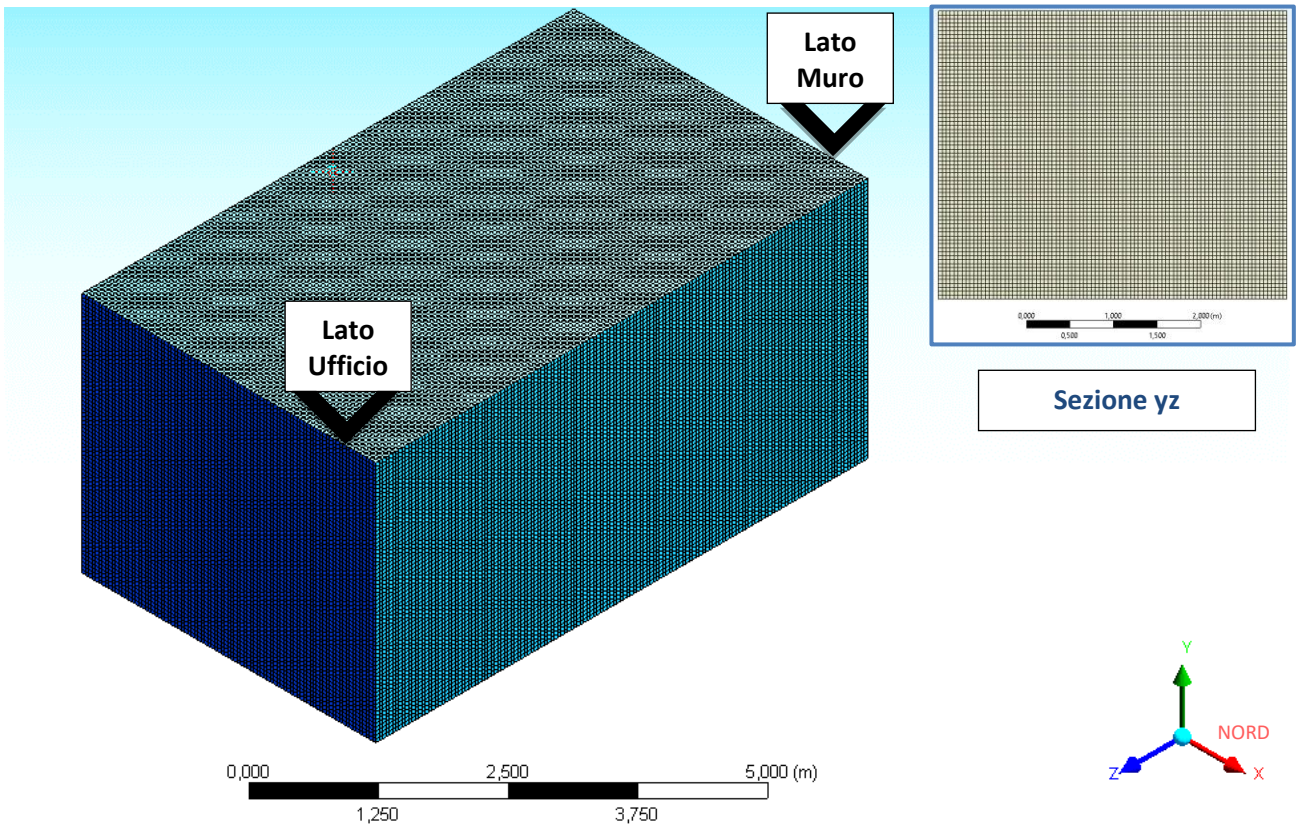


Figura 11. Caratteristiche della meshatura.

Come named selections sono state scelte le facce del cubo, nell'ipotesi di perfetto allineamento con le direzioni cardinali (face\_office=lato est, face\_wall=lato ovest, faces=lato sud, facen=lato nord). La faccia superiore si comporta da "sky", quella inferiore da "ground".

Questa nomenclatura verrà in seguito riutilizzata nella descrizione delle Boundary Conditions.

Per quanto concerne l'identificazione ed il settaggio dei modelli di simulazione, si è proceduto come di seguito descritto.

**General:** sono stati mantenuti i settaggi di default del Solver ed impostata la simulazione in regime transitorio. L'opzione "gravity" è stata abilitata, imponendo il valore di  $-9.81 \text{ m/s}^2$  lungo la direzione y, che nella nostra geometria costituisce l'asse verticale.

**Models:** sono stati abilitati Energy, Viscous, Radiation, Species e Discrete Phase, di seguito dettagliati:

- **Energy:** tale modello è stato incluso in quanto core function dell'intera analisi.

Quando questa opzione viene abilitata, Fluent introduce una nuova equazione a supporto del processo solutivo (oltre a quella di continuità e quelle di conservazione della quantità di moto) che è rappresentativa del primo principio della termodinamica. Tale equazione di bilancio energetico si presenta nella forma generale (Eq. 1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (5)$$

dove al termine di accumulo di energia totale e di trasporto convettivo che troviamo a primo membro si contrappongono, nell'ordine, lo scambio conduttivo, diffusivo, la dissipazione svolta dalle forze viscosse e l'eventuale generazione di calore ( $S_h$ , da sorgenti termiche o reazioni chimiche). Oltre a  $\rho$  (densità),  $\vec{v}$  (velocità),  $p$  (pressione) e  $T$  (temperatura), compaiono nell'equazione anche:

- E, energia totale che si ottiene come somma di contenuto entalpico  $h$ , potenziale di pressione  $\frac{p}{\rho}$  e termine cinetico  $\frac{v^2}{2}$
  - $k_{eff}$ , nota come conducibilità effettiva, somma della conducibilità termica del mezzo  $k$  e della controparte turbolenta  $k_t$  (che a propria volta dipende dal modello di turbolenza che viene adottato – vedi sotto)
  - $\vec{J}_j$  flusso diffusivo della specie j-esima, che moltiplicato per la corrispondente entalpia sensibile  $h_j$  e sommato per ciascuna specie presente restituisce il contributo diffusivo globale.
- A tale legge generale si collegano tutte le impostazioni che vengono selezionate nei modelli a seguire.

- **Viscous:** dei principali approcci computazionali disponibili in Fluent, si sono scelti i modelli Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), comunemente usati nelle applicazioni pratico-industriali, in quanto richiedono conoscenza delle sole grandezze medie (nel tempo) nella risoluzione del problema di flusso turbolento, così da ridurre il carico computazionale rispetto all'approccio DNS (Direct Numerical Simulation). Sono modelli basati sulla viscosità cinematica turbolenta e, come tali, dissipativi. Tra i vari sotto-modelli RANS, è stato selezionato il k- $\epsilon$ , come dettato da svariate casistiche similari reperibili in letteratura [27,28]. Si tratta di un modello a medio costo computazionale per iterazione, comprensivo di due equazioni di trasporto. La prima variabile di trasporto è l'energia cinetica turbolenta,  $k$ , che determina il contenuto energetico del flusso turbolento; la seconda è la dissipazione turbolenta  $\epsilon$  e determina la scala.

Per quanto concerne il problema di “chiusura della turbolenza”, ossia di determinazione dei termini fluttuanti sul moto medio, è stato introdotto come modello dedicato, il Realizable, in cui la viscosità turbolenta  $\mu_T$  viene espressa come:

$$\mu_T = f \left( \frac{\rho k^2}{\epsilon} \right) \quad (6)$$

La ragione dietro questa scelta, è che il modello Realizable rispetto al k- $\epsilon$  standard ed al renormalization group RNG predice molto accuratamente il rate di spreading dei getti [2].

Per gli effetti a muro, si è selezionata l'opzione Scalable Wall Functions, il cui unico proposito è evitare potenziali problemi di raffinamento della meshatura (valore  $y^+$ ) che potrebbero emergere con funzioni walls standard.

- **Radiation:** Il modello radiativo DO (Discrete Ordinates) è stato selezionato, alla luce principalmente di tre considerazioni estrapolate dalla User Guide di Fluent e qui riportate:
  - “localized heat sources: In problems with localized sources of heat, the P-1 model may over-predict the radiative fluxes. The DO model is probably the best suited for computing radiation for this case”: questa considerazione individua il modello DO come la giusta scelta nel caso di sorgenti termiche localizzate, dunque se si vuole contemplare il contributo alla temperatura operativa dato dalla locale presenza di sorgenti di raffreddamento evaporativo;
  - “specular walls : Only the DO model allows specular reflection”: ciò implica una modellazione più puntuale delle caratteristiche di riflessione dei materiali che nel contesto di riflessioni multiple che si innescano in densi layout urbani giocano un ruolo pivotale;
  - “only the P-1 and DO models account for exchange of radiation between gas and particulate”: questo significa che qualora si volesse tenere in conto anche lo stagnamento di inquinanti nel contesto urbano, questo modello è in grado di rappresentare il loro contributo di scattering.

Riassumendo, nell'ambito dell'analisi in spazi esterni, il modello DO permette di considerare come la radiazione solare rimanga intrappolata nel tessuto urbano e si relazioni con sorgenti locali.

Il modello DO affronta l'equazione di scambio termico radiativo per un numero finito di angoli solidi discreti (imponibile dai settaggi), ciascuno afferente ad un vettore direzione  $\vec{s}$  del sistema

cartesiano. Il modello DO non esegue un ray-tracing, ma lavora su un'equazione di trasporto dell'intensità di radiazione  $I$ , funzione delle caratteristiche dei materiali e della temperatura  $T$ .

L'equazione generale del modello DO assume la forma:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (7)$$

dove  $\vec{r}, \vec{s}, \vec{s}'$  sono rispettivamente il vettore posizione, il vettore direzione ed il vettore direzione di scattering,  $\alpha, \sigma_s, n$  caratterizzano il mezzo in termini di assorbanza, coefficiente di scattering e indice di rifrazione.  $\Phi$  è una funzione di fase,  $\Omega'$  l'angolo solido che varia da 0 a  $4\pi$ ,  $\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann.

La comprensione di tale legge è prerequisite al corretto settaggio delle Boundary Conditions.

Per la definizione delle caratteristiche della sorgente solare, si è utilizzato il Solar Calculator, settato con le coordinate spaziali dell'Università e temporali del periodi di osservazione selezionato.

- **Species:** Il modello di trasporto di specie è stato attivato per poter abilitare l'opzione "droplet" nei settings della injection (modello Discrete Phase, descritto in seguito). Il mixture-template di riferimento è dato da H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> ed N<sub>2</sub> (aria umida).
- **Discrete Phase:** tale modello consente un approccio Euleriano-Lagrangiano alla modellazione combinata di fase continua (mixture template) e fase discreta (water droplets).

Mentre la fase continua viene trattata risolvendo le equazioni di Navier-Stokes, la fase dispersa viene risolta da una diversa prospettiva, ossia e a bordo di un ampio numero di particelle (gocce nel nostro caso) attraverso il campo di flusso calcolato.

Prerequisite all'applicazione di un simile approccio combinato è che la fase dispersa sia molto diluita nella fase continua, cioè presenti una frazione volumica non superiore al 10-12%. Tale condizione è abbondantemente rispettata nella modellazione in oggetto, viste le ridottissime portate di fluido acquoso in gioco (~0.001 kg/s per injection).

L'approccio Lagrangiano è particolarmente indicato in presenza di flussi di particelle iniettate nel flusso di fase continua con condizioni di ingresso ed uscita ben specificate. Si veda a tal proposito l'estensiva letteratura a sostegno [27–33].

La formulazione che consente di ricostruire la traiettoria delle particelle contempla al proprio interno effetti inerziali, resistivi (resistenza idrodinamica), gravitazionali, di pressione, come anche gli effetti di dispersione turbolenta, passaggio di stato, formazione di film liquidi a parete e così via. Per gli spray sono inoltre disponibili modelli di collisione, frammentazione ed accrescimento per coalescenza.

La risoluzione del problema a due fasi, avviene dunque introducendo delle equazioni di trasporto addizionali, atte a descrivere il moto della fase dispersa e date dall'integrazione del bilancio di forza nel sistema di riferimento a inseguimento di particella, che può essere scritto come segue (Eq. 8):

$$\frac{du_i^p}{ds} = F_D(u_i - u_i^p) + g_i \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i \quad (8)$$

dove al termine di accelerazione a primo membro si contrappone il contributo resistivo, gravitazionale ed un generico contributo di variazione della velocità riconducibile alle altre forzanti in gioco. Il pedice p indica la particella di fase discreta.

$F_D$ , in particolare, viene calcolato come:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (9)$$

dove:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_i - u_i^p|}{\mu} \quad (11)$$

$C_D$  (Drag Coefficient) è quindi funzione del numero di Reynolds relativo (Re in Eq. 11) e di una terna di costanti  $a_1, a_2, a_3$  che sono tabellati per diversi range di Reynolds.

Tale è la formulazione per particelle disperse sferiche lisce, ossia l'equazione di Morsi ed Alexander [34].

Trattandosi di una simulazione in regime transitorio, il tracking delle particelle avviene in maniera non stazionaria. Per quanto concerne i modelli fisici da tener in conto nella mutua interazione tra i getti dei nebulizzatori, sono stati attivati Stochastic Collision, Coalescence e Break-up con considerazione anche per le Child Particles.

Riguardo le opzioni di modellazione del water spray, 24 identici ugelli sono stati modellati a 3.3 metri di altezza. La tipologia e le caratteristiche geometriche dell'ugello sono state settate in base alle specifiche tecniche, fornite dal produttore. Di conseguenza è stato selezionato il modello hollow-cone con parametri di forma e velocità rispondenti al reale. Trattandosi inoltre di ugelli per la micronebulizzazione, è stata imposta una distribuzione di diametro delle particelle Rosin Rammler con diametro minimo di un micron, massimo di  $1.5e-5$  m e, nel mezzo, discretizzati in 10 diametri possibili. La temperatura del getto è stata definita in base ai dati di monitoraggio per la fascia oraria di osservazione e posta quindi pari a  $18^{\circ}\text{C}$ . Nella delimitazione del numero di flussi di particelle equamente ripartiti nella corona dell'hollow cone, si è optato per 300 streams per getto, come da precedenti studi di sensitività in merito [35].

Come modelli fisici sono stati attivati la Drag Law (Spherical) ed il Break-up. Come tracking stocastico, invece, l'algoritmo di Discrete Random Walk: in tale modello, la velocità istantanea del mezzo continuo si compone di un termine medio e di uno fluttuante che varia in maniera random durante il tracking della particella. Ogni iniezione è tracciata ripetutamente per rendere il campione statistico significativo.

Una volta impostati i modelli e caratterizzati i materiali in base alle caratteristiche del sito di monitoraggio, sono state settate le condizioni al contorno.

Come Cell Condition è abilitata la partecipazione agli effetti radiativi. Per quanto concerne invece le Boundary Conditions sulle facce del volume di controllo, si è selezionato:

- Pressure outlet, per il lato sud e a cielo ("sky") del volume di controllo. La gauge pressure è stata posta a 0 Pa e la Turbulent Intensity al 5%. La temperatura è stata posta pari a  $29.85^{\circ}\text{C}$  come da dati sperimentali, mentre la frazione massica d'acqua in forma vapore (umidità specifica) è stata settata a  $0,013 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$  (che corrisponde ad una temperatura ambiente di  $29.85^{\circ}\text{C}$  ed un'umidità relativa del 50% da diagramma psicrometrico per pressione di 1 atm). La condizione rispetto alla fase discreta è di "escape" ossia libera uscita per le particelle emesse.
- Velocity inlet per il lato nord del volume di controllo. La velocity magnitude è stata posta ad un valore minimo di 0.05 m/s (come da precedenti considerazioni in merito) e la Turbulent Intensity al 10%. Tutte le altre impostazioni come sopra.
- Wall, per la superficie di base, per la facciata dell'ufficio posta ad est e per la parete di cemento ad ovest. La condizione di flusso a parete è di non scorrimento (no slip condition). Dal punto di vista termico, si è optato per lo scambio misto convettivo-radiativo. Per la fase discreta, la condizione specificata per la superficie del terreno è "trap", ossia le particelle impattanti restano intrappolate, per le superfici verticali dei muri è invece "reflect", ossia le eventuali particelle non evaporate vedono annullata la loro componente di velocità perpendicolare alla superficie e formano un temporaneo film liquido.

Infine è stato configurato il solutore. Il calcolo è stato eseguito con schema SIMPLE e discretizzazione spaziale del secondo ordine. Il fattore di under-relaxation per le sorgenti di fase discreta viene portato a 0.9 in automatico, al passaggio in regime transitorio.

A valle dell'inizializzazione ibrida del problema, il volume interno è stato patchato con la corrispondente temperatura iniziale e frazione massica di acqua.

In output sono stati richiesti, oltre alle grandezze di interesse, salvate ad ogni iterazione, anche il tracking stocastico delle particelle in modo da ricostruire il loro percorso.

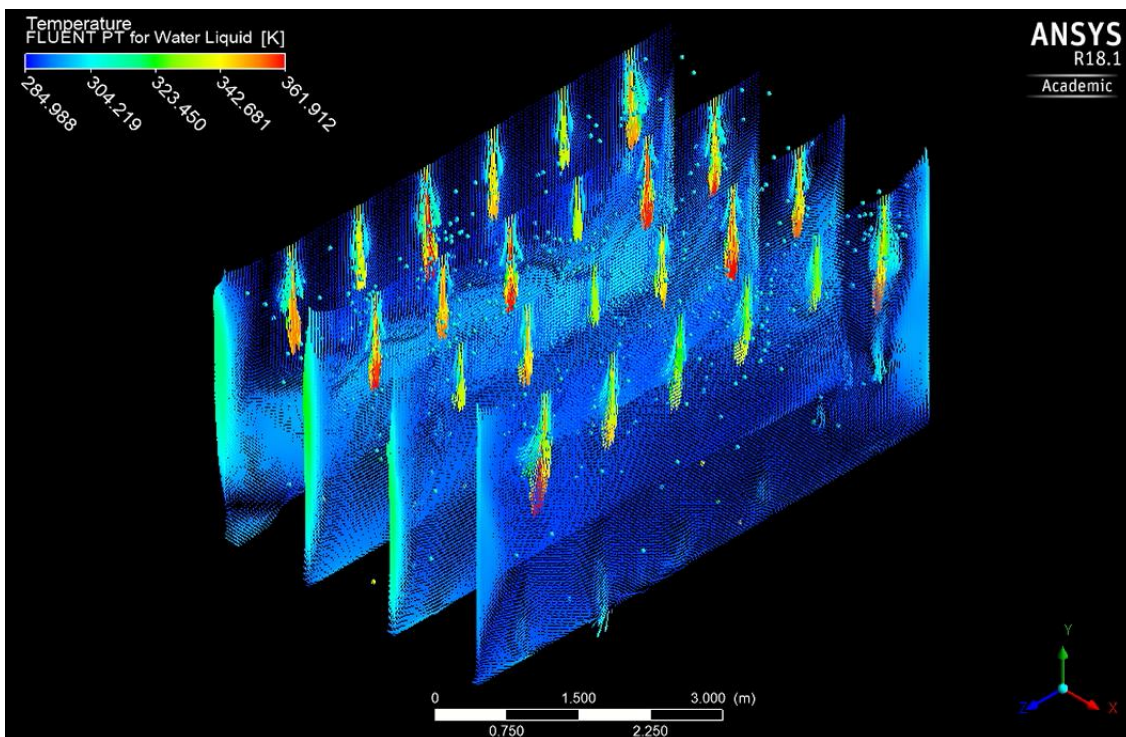
Sono state eseguite 30 iterazioni per ogni secondo di simulazione, per un totale di 1800 iterazioni, concluse in un tempo di circa 5 ore (con calcolo parallelo su 4 core). Posta come criterio di convergenza una tolleranza di 0,001 la simulazione si concludeva in poco più di 100 iterazioni dall’ultima iniezione. Al fine di osservare l’intero minuto, il criterio di convergenza è stato disabilitato.

### 2.3.2 Risultati

La fase di post-processing in CFD-Post ha mirato primariamente a ricostruire i profili di raffreddamento ed umidificazione sia su piani verticali che orizzontali, a verificare l’evoluzione del processo di evaporazione ed il suo impatto complessivo, scomposto nei contributi sensibile e latente.

In dettaglio, sono stati prodotti:

- i grafici delle distribuzioni dei principali parametri fenomenologici (temperatura, concentrazione di acqua, velocità) sui piani verticali passanti per i filari di nebulizzatori e sui piani orizzontali a 1.1m, 1.4m, 1.7m, 2.1m e 2.5m per osservare la stratificazione. Le evoluzioni temporali sono riportate in sequenze di quattro immagini (da 20s dopo l’inizio dell’erogazione a 20s dopo, con time step di 10s);
- i grafici di temperatura nei punti di collocamento delle cinque sonde per la comparazione con i dati sperimentali;
- i video del tracciamento delle particelle, usando come scala di colori il range di temperatura delle gocce (si riporta un fotogramma di esemplificazione in Figura 12).



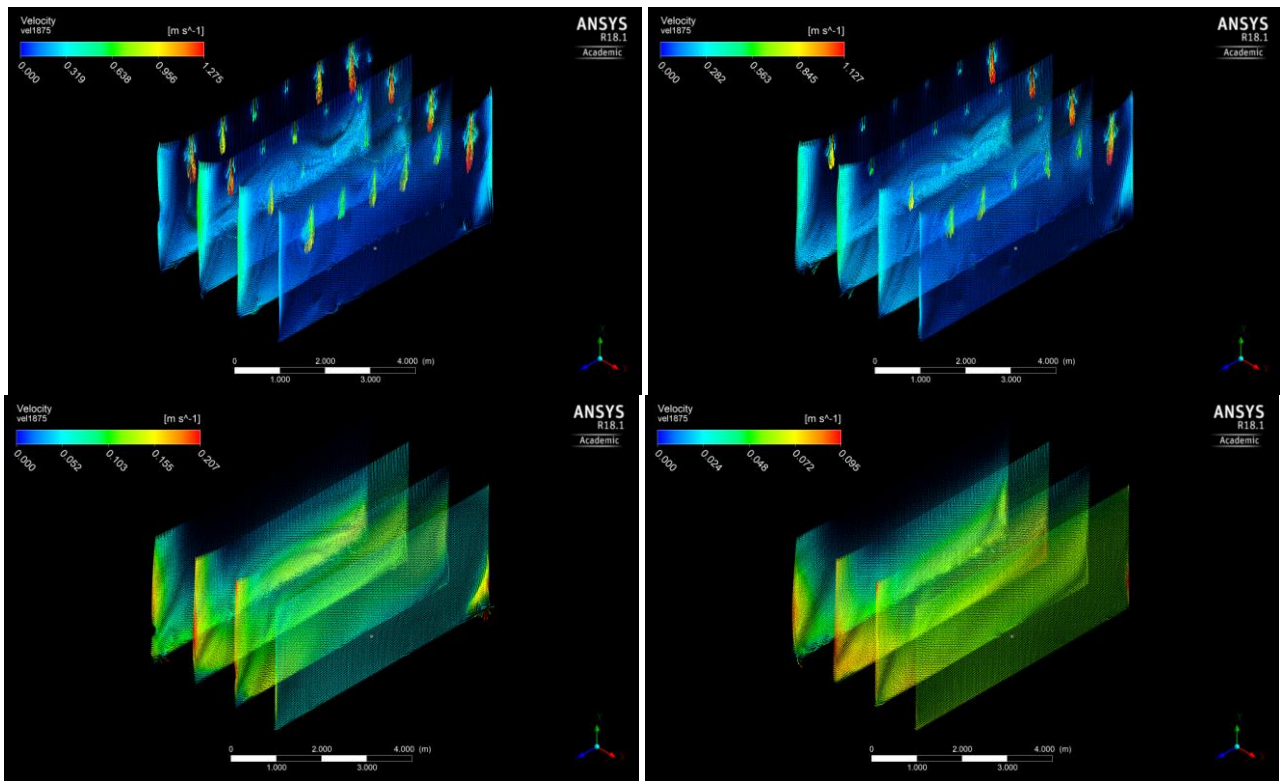
**Figura 12. Profili di velocità lungo i piani verticali dei filari nebulizzanti (dopo 10s di erogazione). In sovrapposizione il tracking delle particelle: il colore delle gocce si riferisce alla loro temperatura.**

Come si può osservare dei profili di velocità in Figura 13 l’effetto di bordo dovuto alla temperatura delle superfici di ufficio e parete in cemento si esplica in un risucchio delle particelle in uscita dagli ugelli prospicienti: il getto appare deviato ed accelerato, per interazione con i flussi adduttivi nel volume di influenza delle pareti. Tale effetto era remarcabilmente visibile anche nell’impianto sperimentale.

I vettori velocità si ridimensionano in un tempo dell’ordine di 1-2s dal termine dell’iniezione, ma acquistano una componente orizzontale maggiore rispetto all’istante 0 ad indicare l’induzione di una turbolenza locale dovuta alla perturbazione del moto delle gocce che si va ad interlacciare al vettore vento di ingresso,



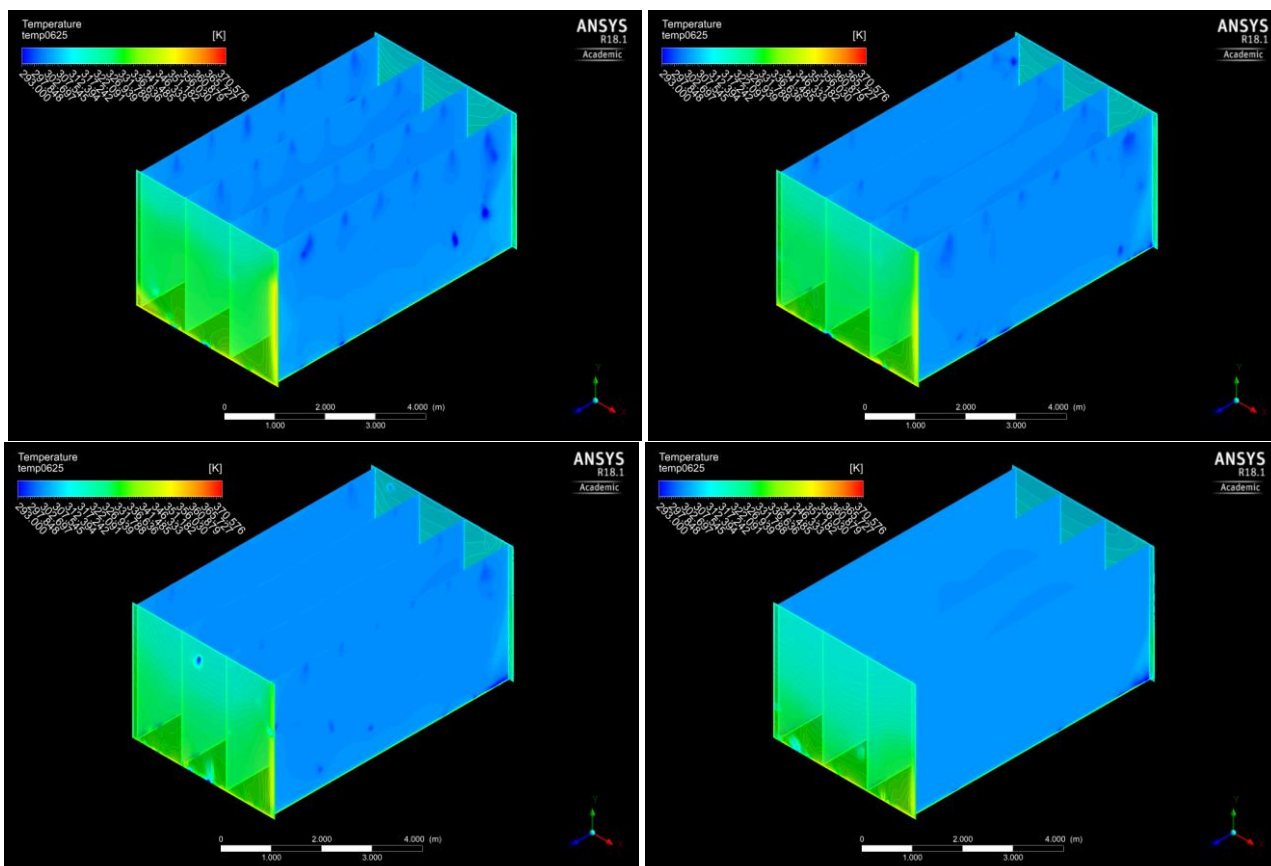
esaltandone l'intensità. Ancora a 20s dalla cessazione del getto tale allungamento permane, seppur il campo di moto appare più rilassato.



**Figura 13. Evoluzione temporale dei profili di velocità lungo i piani verticali dei filari nebulizzanti (da 30s a 60s di simulazione con passo di 10s).**

Dall'analisi della distribuzione di temperatura sui piani verticali contenenti i filari nebulizzanti si evince che il massimo effetto di raffreddamento si raggiunge nella zona più prossima alla parete di cemento ad ovest. Anche qui, l'intensità dell'effetto si consuma nei primi istanti di iniezione, andando gradualmente a scemare. Si osserva inoltre, che la riduzione termica non avviene nell'area immediatamente sotto gli ugelli, ma ad una distanza di 30-50cm: tale risultato è in linea con quanto osservato in studi precedenti [8]. Allo spegnimento della pompa (penultima immagine in Figura 14) l'effetto di raffreddamento persiste, con locali enfattizzazioni a quote più basse. A 60s di simulazione (20s dallo stop al getto) il decremento di temperatura si dissolve dal lato di ingresso del vento, mentre un fronte lievemente fresco si mantiene nei piani antistanti.

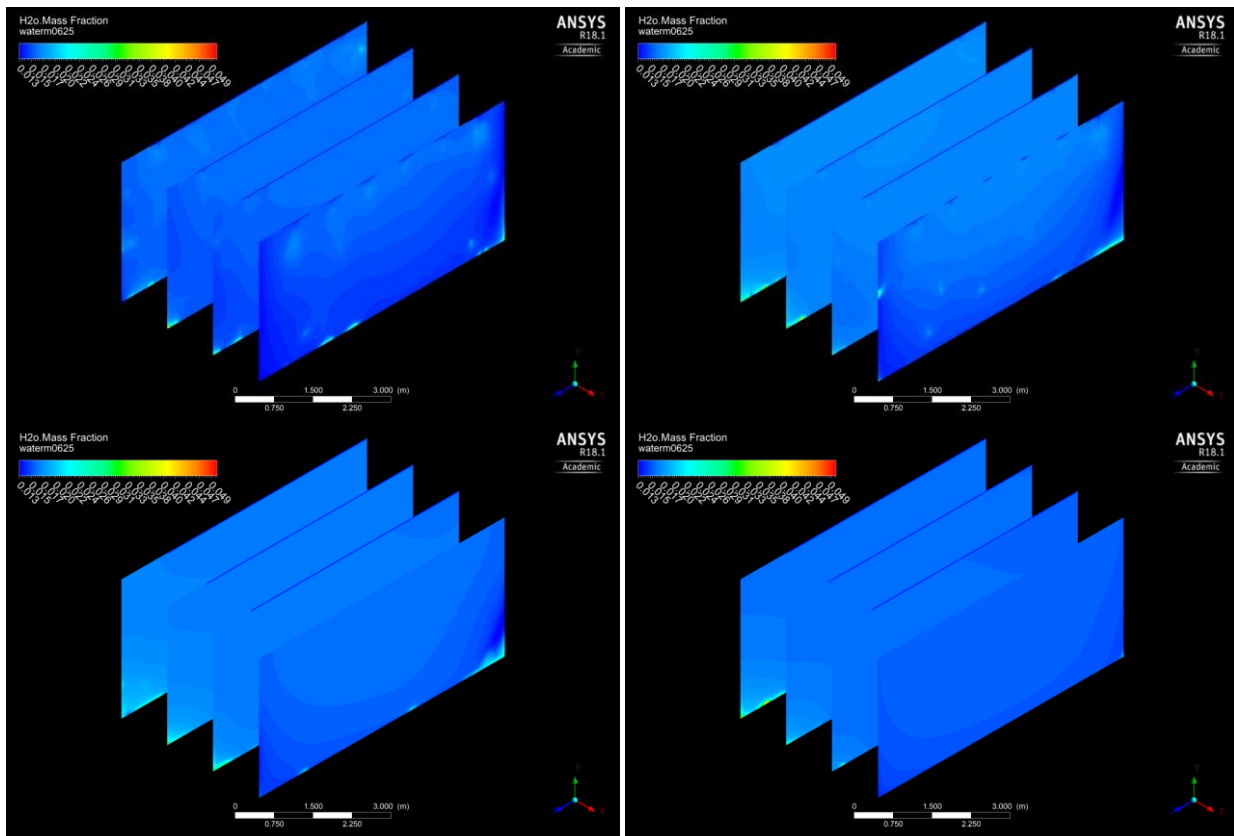
Talune particelle vanno inoltre a impattare sulle superfici verticali, abbassandone la temperatura. Tale effetto risulta in realtà massimo nell'ultimo istante computato: si ritiene che questo sia conseguenza dell'evaporazione secondaria, in dipendenza dalla porosità ed igroscopicità dei materiali nonché del numero di gocce che erano state computate come "reflected".



**Figura 14. Evoluzione temporale dei profili di temperatura lungo i piani verticali dei filari nebulizzanti e sulle pareti delimitanti il volume di controllo (da 30s a 60s di simulazione con passo di 10s).**

L’analisi in termini di stratificazione orizzontale porta ad osservare come il massimo decremento si attesti tra i piani a 2.1 e 2.5m di altezza. Se questa informazione viene combinata con quella ricavabile da Figura 15 (profili di umidità specifica), si può concludere che un eventuale abbassamento dei filari di 0.5m ca. risulta benefico in quanto l’utenza viene maggiormente investita dalla regione di pieno raffreddamento evaporativo senza percepire un’umidità eccessiva (circa 3-4% in più).

Peraltro, come si evince dal profilo di temperatura del terreno, se nei primi 20s di erogazione l’effetto di abbattimento della temperatura superficiale è estremamente localizzato e circoscritto alle aree di impatto delle particelle, a seguire la riduzione appare molto più diffusa ed omogenea: tale risultato è presumibilmente l’effetto combinato dell’inizio del processo di evaporazione secondaria e della schermatura solare addotta dalla nebbia di gocce di acqua [36]. Già 10s dopo il termine della nebulizzazione, le temperature iniziano comunque a risalire.



**Figura 15. Evoluzione temporale dei profili di umidità specifica lungo i piani verticali dei filari nebulizzanti (da 30s a 60s di simulazione con passo di 10s).**

Dato sperimentale e dato di simulazione sono stati confrontati plottando il transitorio di temperatura ed umidità, simulato da Fluent, nei cinque punti di localizzazione delle sonde Michell. I due dataset hanno mostrato andamenti estremamente affini, in particolare in termini di rate di riduzione: la sonda centrale mostra in entrambi i casi la massima differenza, mentre la sonda ad est subisce esattamente il 75% di questo decremento sia sperimentalmente che numericamente. Anche le sonde a nord ed a sud mostrano evoluzioni similari, la sola eccezione è la lettura in prossimità della parete dell'ufficio: dai dati di monitoraggio la temperatura restituita dalla sonda risulta superiore rispetto a quella prima dell'inizio della nebulizzazione, mentre la simulazione in Fluent vede un raffreddamento anche in questa zona del volume di controllo, seppur più limitato. Tale discrepanza è verosimilmente il risultato dell'approssimazione condotta sui materiali componenti l'ufficio, che sono stati approssimati come un unico materiale dalle caratteristiche termo-ottiche medie rispetto ai singoli elementi opachi e trasparenti (usando come peso le rispettive aree). Nel complesso, il risultato di simulazione risulta un'attendibile rappresentazione della realtà.

Previa tale verifica, sono state eseguite altre 3 simulazioni su setup differenti:

- CONFIGURAZIONE 4x6 RIBASSATA: 4 filari da 6 ugelli interspaziati di 1m l'uno dall'altro, distanziati di 1.25m ad altezza 2.8m;
- CONFIGURAZIONE 2x12: 2 filari da 12 ugelli interspaziati di 0.5m l'uno dall'altro, distanziati di 2.5m ad altezza 3.3m;
- CONFIGURAZIONE 2x12 RIBASSATA: 2 filari da 12 ugelli interspaziati di 0.5m l'uno dall'altro, distanziati di 2.5m ad altezza 2.8m;

Dai risultati si evince che, abbassando la configurazione 4X6 di mezzo metro si riscontra un decremento di temperatura a 1.1m (altezza sonde) anche di 0.6°C nei primi 10-15s di iniezione. Tale effetto risulta marcato nelle posizioni nord e centrale, molto più attutito altrove.

Nei successivi istanti, si ha un'inversione di trend, con temperature registrate superiori rispetto al caso a 3.3m di altezza. La ragione sta nel fatto che la sospensione di particelle è molto meno efficace a quella quota, perché le gocce sono più veloci. Un simile output è da considerarsi ripetibile solo in condizioni di

bassissime velocità del vento, come quelle simulate. Risulta ragionevole pensare che in ambienti più ventilati e turbolenti, la persistenza sia superiore e come tale anche l'effetto di raffrescamento. Dal punto di vista dell'umidificazione, l'andamento è naturalmente speculare. Si riporta in Tabella 7, a titolo esemplificativo, il raffronto a livello della sonda centrale.

**Tabella 7. Differenze negli andamenti di temperatura ed umidità relativa a livello della sonda centrale (convenzione dei segni: risultati configurazione 4X6 a 2.8m meno risultati configurazione 4X6 a 3.3m)**

SONDA CENTRALE	$\Delta T$ [°C]	$\Delta UR$ [%]
dopo 5s	-0.52234	1.564048
dopo 10s	-0.16101	0.488096
dopo 15s	0.415283	-1.31605
dopo 20s	0.683319	-2.16229
dopo 25s	0.738159	-2.34298

Passando al confronto tra la configurazione sperimentale e quella ottenuta dimezzando l'interasse tra gli ugelli e raddoppiando lo spazio tra i filari (a parità di numero totale di erogatori), si osserva che la riduzione di temperatura, per quanto presente, è molto ridotta ed inferiore all'incertezza degli strumenti di misura. La differenza cresce nel tempo e questo indica (come anche dimostrato dal report restituito da Fluent sul tracciamento della fase discreta) che molte particelle coalescono e impiegano più tempo ad evaporare. Una maggiore dimensione delle gocce a 1.1m è però allarmante avvisaglia di un probabile bagnamento del passante (ancor più se si considera la configurazione ribassata di 0.5m). Per tale motivo, tale distribuzione dei getti nebulizzanti è stata ritenuta non migliorativa.

**Tabella 8. Differenze negli andamenti di temperatura ed umidità relativa a livello della sonda centrale (convenzione dei segni: risultati configurazione 2X12 a 3.3m meno risultati configurazione 4X6 a 3.3m)**

SONDA CENTRALE	$\Delta T$ [°C]	$\Delta UR$ [%]
dopo 5s	0.018494	-0.05209
dopo 10s	-0.04706	0.14669
dopo 15s	-0.19681	0.625938
dopo 20s	-0.30609	1.012875
dopo 25s	-0.30975	1.04862

Le simulazioni hanno dunque dimostrato che le impostazioni del setup sperimentale da 6x4 ugelli risultano pressochè ottimali. Abbassando però la loro altezza di circa mezzo metro si ottiene un maggiore potenziale di raffrescamento nella fascia di sensibilità dell'utenza (1.1m-1.7m).

## 2.4 Modello fluidodinamico di media scala

### 2.4.1 Impostazione del modello

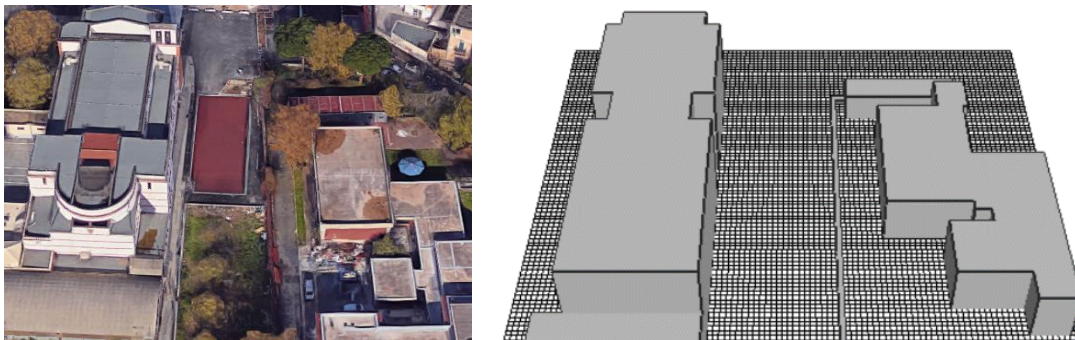
Al fine di valutare l'interazione tra il dispositivo sperimentale e l'ambiente urbano, si è realizzato un modello di analisi micro-climatica mediante ENVI-MET, una software suite sviluppata a partire dalla fine degli anni '90 dal gruppo di ricerca in climatologia della Ruhr-University Bochum (Germania) [37]. ENVI-met permette la simulazione dell'interazione tra superfici, vegetazione ed aria. E' tipicamente utilizzato per simulare ambienti urbani e per valutare gli effetti sul microclima di diverse configurazioni architettoniche e paesaggistiche. ENVI-met integra modelli fisici per i flussi ventosi, la radiazione solare in rapporto con le superfici, i fenomeni evapo-traspirativi della vegetazione, la presenza e il movimento di gas e particelle (inquinanti).

In particolare, ENVI-met implementa un modello di calcolo CFD per la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes per flussi turbolenti in ogni cella nello spazio e ogni step temporale. La temperatura e umidità relativa dell'aria sono calcolate in relazione alle sorgenti di calore sensibile e vapore presenti nel dominio sulla base delle equazioni di avvezione-diffusione [37]. Le superfici delle strade e degli edifici scambiano calore con l'atmosfera. Possibili sorgenti sono costituite dal terreno e dalla vegetazione. ENVI-met consente anche di inserire in ambiente sorgenti di diverso tipo, tra cui dispositivi di immissione di acqua [12].

La suite comprende diversi applicativi per la creazione del modello geometrico tridimensionale e la definizione delle proprietà termofisiche, per la gestione delle condizioni iniziali e al contorno; per la gestione dei parametri di simulazione, per l'analisi dei risultati.

Tramite l'applicativo *Spaces* si è ricostruito il contesto micro-urbano dell'area di Centocelle (Roma) in cui è stato condotto il monitoraggio del dispositivo sperimentale (Figura 16). Date le caratteristiche del luogo, (area verde con edificazione densa su due lati, ampia piazza frontale e zona aperta posta posteriormente) e considerati i tempi di simulazione del programma si è ritenuto sufficiente discretizzare un dominio di 100m x 100m x 40m (altezza) con celle di dimensioni 1m x 1m x 2m.

Alle superfici degli edifici si sono assegnati i materiali presenti in libreria previa verifica della rispondenza delle proprietà termofisiche con quelle riscontrate nel sito. Anche la vegetazione è stata trattata selezionando i dati utili nel database.



**Figura 16. Discretizzazione del dominio spaziale in *Spaces*, applicativo di ENVI-MET**

Tramite l'applicativo *ConfigWizard* si sono gestite le condizioni di simulazione. L'analisi microclimatica è stata condotta nel giorno 24 agosto. Per la radiazione solare si sono immessi i dati di latitudine e longitudine della località, confrontando la compatibilità tra il profilo dell'irradiazione solare ottenuto e quello rilevato sperimentalmente. Non sono state considerate coperture nuvolose nel periodo di calcolo. I profili di temperatura e umidità relativa ambientali sono stati imposti sulla base dei dati rilevati nel corso della sperimentazione.

Per la ricostruzione del profilo di velocità del vento, si è imposta una velocità iniziale pari a 1 m/s a 10 m di altezza, così da ottenere limitati valori nell'area monitorata coerentemente con i dati rilevati in situ, la direzione è stata imposta da sud, parallela al canyon urbano oggetto di analisi, e la rugosità del terreno pari a 0.01 m. Per la turbolenza si è assunto un modello TKE [38] con un time-step pari a 1s.

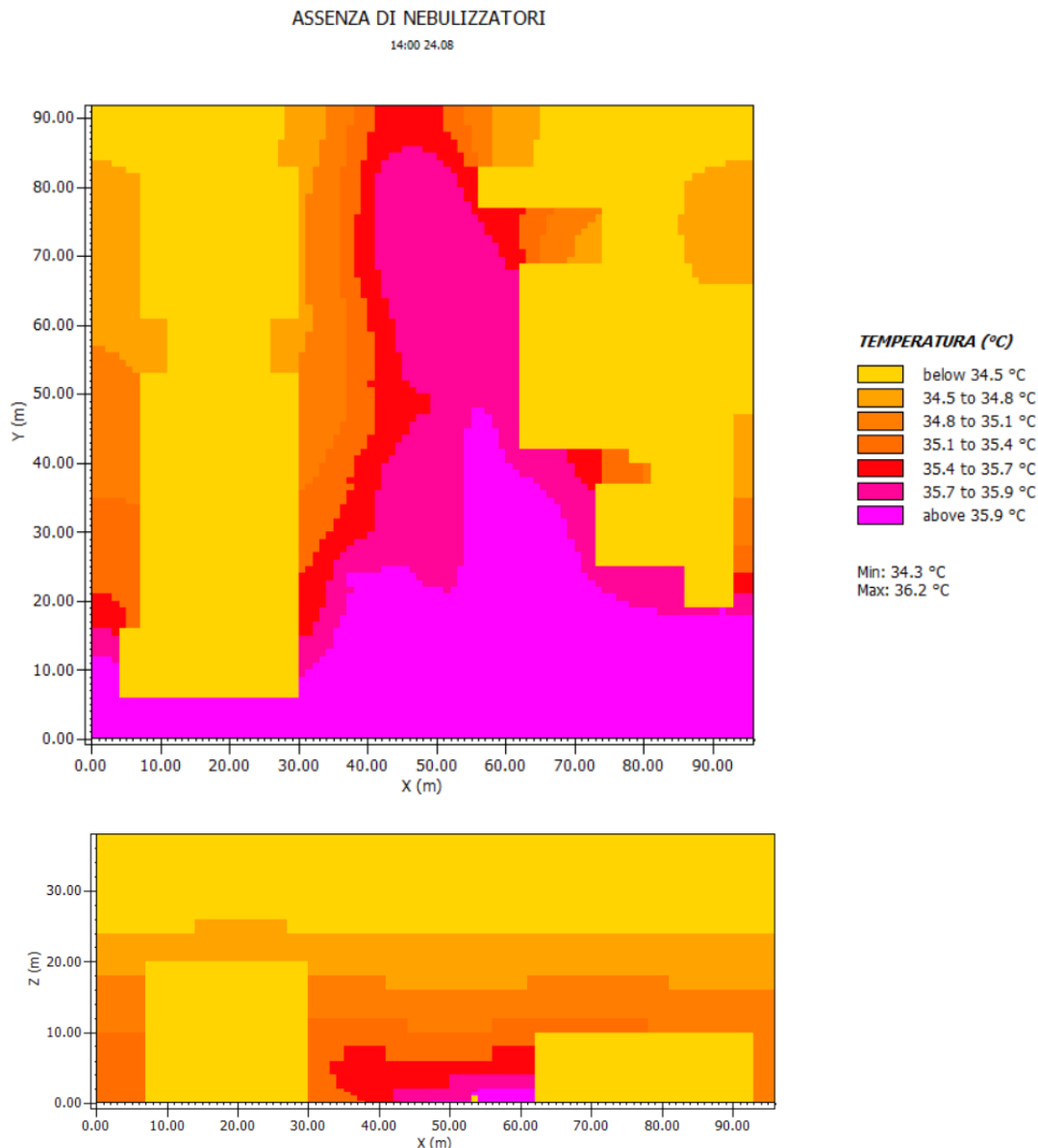
Una serie di simulazioni è stata condotta inizialmente per calibrare il modello a fronte dei dati sperimentali, verificando di ottenere coerenti profili di temperatura nel dominio. Si sono poi eseguite le simulazioni in presenza del dispositivo nebulizzante. Questo è stato inserito nel modello come sorgente imponendo una erogazione continua (portata globale del dispositivo 1.5 l/min).

#### 2.4.2 Risultati

I risultati delle simulazioni microclimatiche effettuate con ENVI-MET sono stati elaborati usando l'applicativo *Leonardo*, con l'obiettivo di confrontare gli andamenti della temperatura dell'aria e della velocità del vento nel dominio in assenza di nebulizzatori con i dati rilevati sperimentalmente dalla stazione meteorologica, per poi valutare l'impatto del sistema di mitigazione simulato su tali grandezze.

In Figura 17 è riportata la mappa bidimensionale delle temperature dell'aria registrate nel dominio simulato (pianta a quota  $z=1.4$  m, sezione trasversale) in assenza del sistema nebulizzante alle ore 14:00, l'orario di

picco della temperatura, sia misurata che ottenuta analiticamente. L'intervallo delle temperature nel dominio, ad un'altezza di 1.4 m, va da 34.3°C a 36.2°C, coerentemente con le temperature registrate in situ in quell'orario. I valori maggiori si riscontrano nell'area asfaltata a sud-est del parco. In sezione è possibile osservare il decremento della temperatura dell'aria all'aumentare dell'altezza nel dominio.



**Figura 17. Temperatura dell'aria (°C) ottenuta nel dominio simulato, in assenza del sistema nebulizzante, alle ore 14 del 24/08. Pianta a quota z=1.4 m (sopra) e sezione trasversale a livello del centro dell'area di installazione del sistema nebulizzante.**

In Figura 18, invece, sono mostrate le velocità e le direzioni del vento riscontrate nel sito a 1.4 m di altezza. I valori si attestano mediamente sotto 1 m/s, coerentemente con quanto misurato.

VENTO - ASSENZA DI NEBULIZZATORI

14:000 24.08

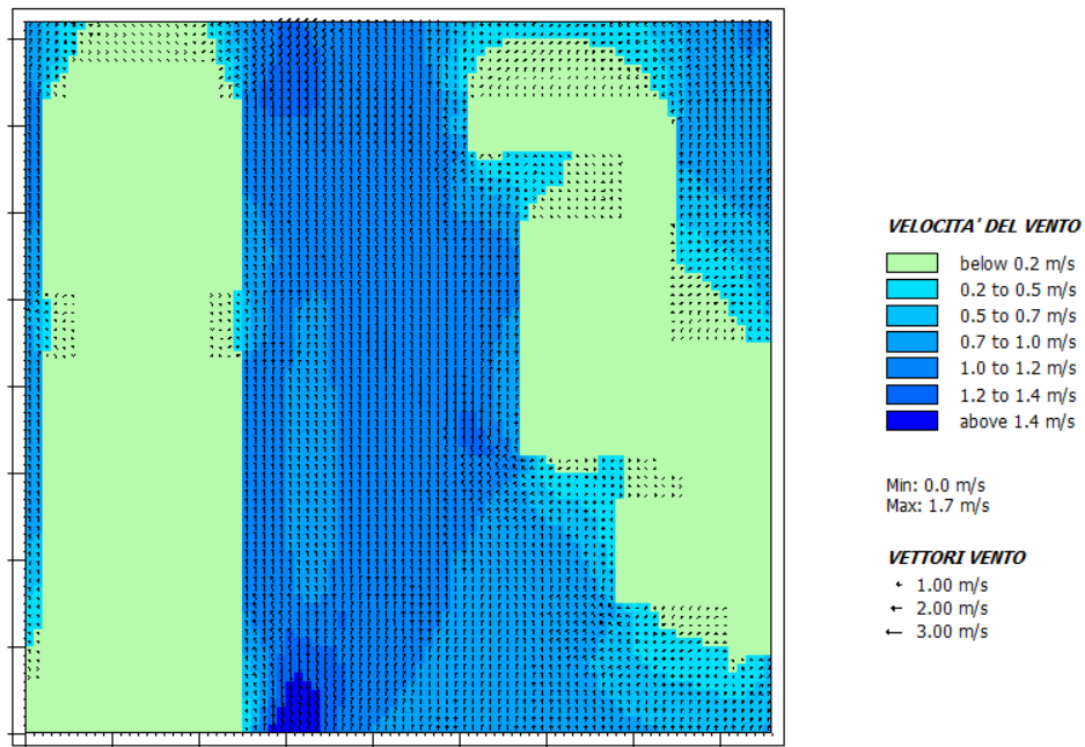
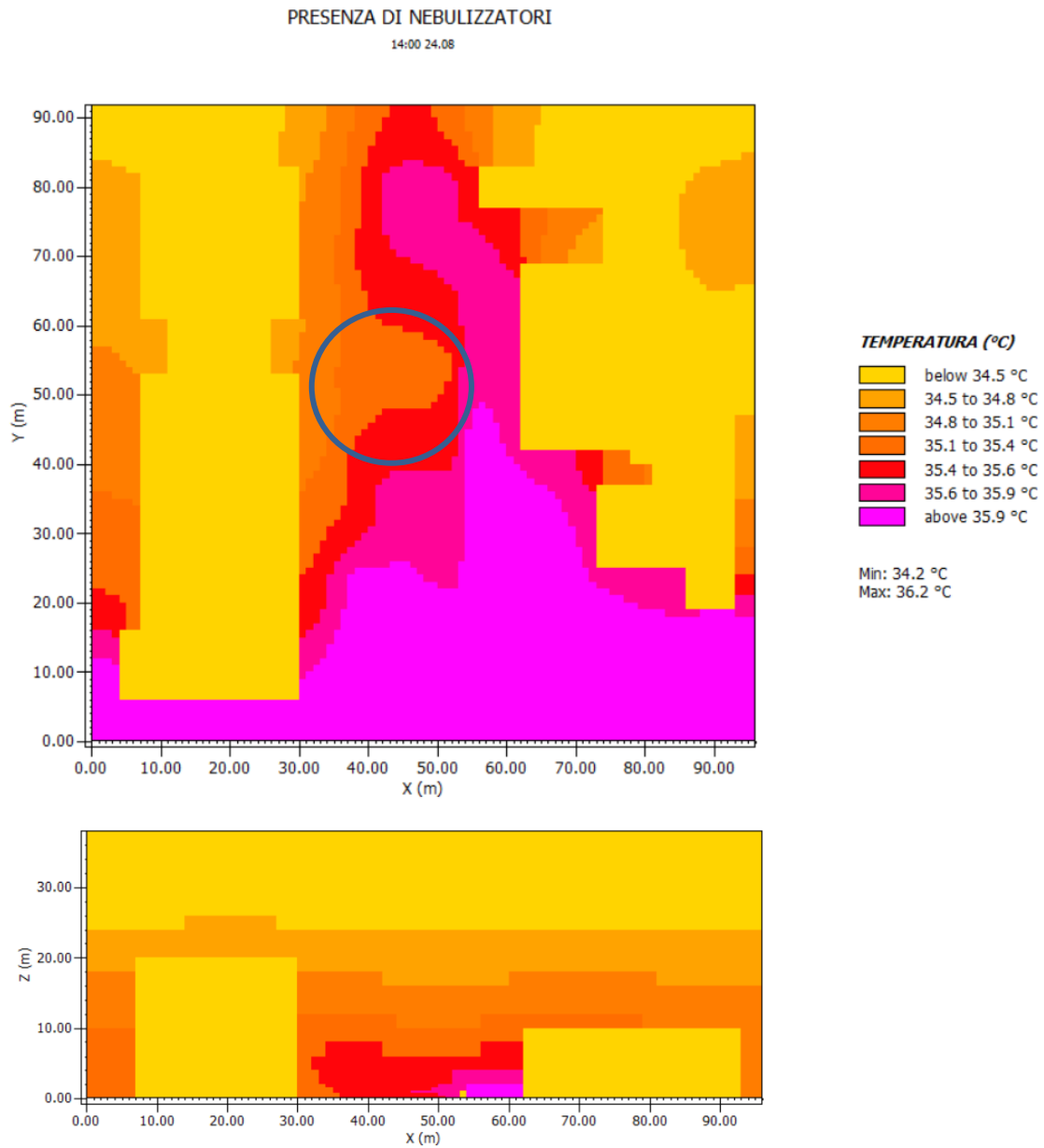


Figura 18. Velocità del vento (m/s) ottenuta nel dominio simulato (pianta a quota  $z=1.4$  m), in assenza del sistema nebulizzante, alle ore 14 del 24/08.

In analogia con Figura 17, in Figura 19 è riportata la mappa bidimensionale (pianta e sezione) delle temperature dell'aria registrate nel dominio simulato in presenza del sistema nebulizzante. Il cerchio nell'immagine mette in evidenza l'area interessata dal dispositivo, dove si registrano, rispetto al caso precedente temperature inferiori. In particolare, come evidenziato in Figura 20, la differenza di temperatura in presenza/assenza del dispositivo raggiunge  $0.5^{\circ}\text{C}$  nell'immediata area di influenza dei nebulizzatori e, per effetto dell'andamento del vento nel sito, si mantiene attorno a  $0.3\text{-}0.5^{\circ}\text{C}$  per circa ulteriori 20 m nel canyon.

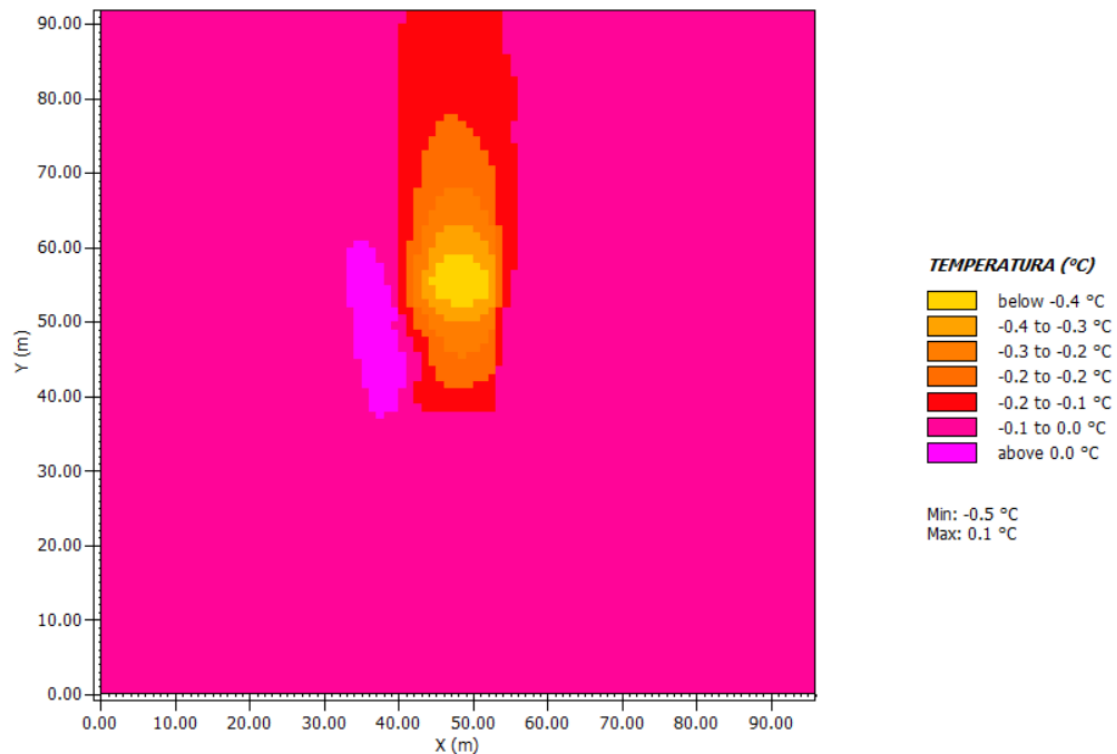


**Figura 19. Temperatura dell'aria (°C) ottenuta nel dominio simulato, in presenza del sistema nebulizzante, alle ore 14 del 24/08. Pianta a quota z=1.4 m (sopra) e sezione trasversale al centro del sistema nebulizzante.**



DIFFERENZA TEMPERATURA ARIA 14:00:00 24.08

x/y Cut at k=3 (z=1.4000 m)



**Figura 20. Differenza della temperatura dell'aria (°C) a quota z=1.4 m, nei due domini simulati (in presenza/assenza del sistema nebulizzante), alle ore 14 del 24/08.**

I risultati ottenuti tramite le simulazioni microclimatiche di media scala confermano la capacità del sistema di nebulizzazione di ridurre le temperature dell'aria nella zona circostante i dispositivi di erogazione, riscontrata sperimentalmente e attraverso il modello di piccola scala simulato in ANSYS Fluent. Le differenze quantitative sul potenziale di raffreddamento del sistema sono da attribuire alla ridotta sensibilità del modello nel cogliere i fenomeni fisici complessi dei sistemi water-spray.

### 3 Conclusioni

Si è condotto un articolato studio sperimentale e numerico sulla fluidodinamica di sistemi di mitigazione del clima urbano basati sulla micronebulizzazione. Il prototipo è stato concepito per raggiungere un elevato impatto locale, modulabile in funzione delle condizioni al contorno ed al minor costo possibile (sia di investimento che operativo). L'obiettivo ultimo era caratterizzare pienamente tale tecnologia e fornire indicazioni molto precise sui criteri di design da seguire per un pieno sfruttamento del potenziale di raffrescamento.

La struttura, composta da 4 file (interasse 1.25m) di ugelli interspaziati di 1m, è stata testata in due ambiti cittadini di complessità crescente così da individuare le driving forces ed i limiti prestazionali. Numericamente inoltre, si sono utilizzati due software di natura e scala diversa (Fluent ed ENVI-met) per abbracciare una casistica progettuale virtualmente infinita ed osservare le implicazioni del processo di raffrescamento evaporativo all'interno del microclima urbano.

In circa tre mesi di monitoraggi e simulazioni si sono confrontate svariate configurazioni e per ciascuna di queste sono stati valutati:

- i profili di temperatura ed umidità in cinque punti dell'area sottostante la matrice di nebulizzatori, il tutto in rapporto al profilo di erogazione della pompa;
- i profili di reazione del controllore fuzzy, azionato in funzione di quattro grandezze di input: offset dalla temperatura neutrale, irraggiamento solare sul piano orizzontale, Humidex e Cooling Power Index (PE). La bontà dell'inseguimento del comfort outdoor è stato verificato in termini di distribuzione della temperatura nell'intorno del setpoint neutrale, ed in rapporto ai consumi. Una tipica logica on-off è stata utilizzata come metro di paragone;
- i valori massimi, minimi e medi di raffrescamento rapportati alle condizioni medie di temperatura, umidità, irraggiamento solare e velocità del vento;
- le evoluzioni temporali delle principali grandezze fluidodinamiche coinvolte (temperatura, concentrazione di acqua, velocità) sui piani verticali passanti per i filari di nebulizzatori e sui piani orizzontali a 1.1m, 1.4m, 1.7m, 2.1m e 2.5m. Il tutto per comprendere raggio di azione ed altezza ottimale dei filari.

Modelli numerici e dati sperimentali convergono nel dimostrare che la configurazione a maggiore potenziale di mitigazione e miglior performance energetica prevede:

- distanziamento tra ugelli dello stesso filare di circa 1m;
- distanziamento tra diversi filari di circa 1.25m;
- altezza da terra della struttura nebulizzante di circa 2.8m;
- sistema di controllo sfumato, calibrato sui dati meteorologici concomitanti.

In fase sperimentale (monitoraggio di Roma), un siffatto sistema ha consentito di mantenere la temperatura ambiente entro  $\pm 1^\circ\text{C}$  dalla neutralità per quasi l'80% del tempo, senza mai andare oltre un offset di  $2^\circ\text{C}$ , con consumi di oltre il 20% inferiori rispetto all'on/off. Questo si è tradotto in un raffrescamento massimo misurato di  $1.6^\circ\text{C}$  a 1.1m di altezza da terra, rispetto alla stazione meteo posta a soli 16m di distanza. Nelle giornate in cui i nebulizzatori hanno funzionato in maniera continuativa tale riduzione di temperatura ha rasentato i  $2.5^\circ\text{C}$ .

Si sottolinea che le temperature dei giorni di monitoraggio non hanno raggiunto valori elevati (medie intorno ai  $30^\circ\text{C}$ ), nè tantomeno i livelli critici di una ondata di calore: si prevede che la performance dei nebulizzatori, a inseguimento fuzzy del setpoint, incrementi notevolmente con masse d'aria più calde, capaci di stimolare un maggiore rate di evaporazione. Di fatto, durante il monitoraggio in Ancona (filari a 3.3m, stazione meteo a 50m), quando le temperature avevano sfiorato i  $35^\circ\text{C}$ , il raffrescamento massimo misurato aveva superato i  $6^\circ\text{C}$  (valore sottostimato rispetto a quanto si sarebbe potuto ottenere con assetto ribassato).

Le simulazioni in Fluent hanno confermato la bontà della configurazione geometrica proposta rispetto alle altre testate, in considerazione non solo del raffrescamento indotto, ma anche di problematiche di comfort igrometrico. Le simulazioni in ENVI-met, infine, hanno consentito di verificare che differenze di temperatura (tra caso in presenza e caso in assenza del dispositivo mitigante) dell'ordine di 0.3-0.5°C persistono fino a 20m di distanza dal perimetro esterno della matrice di nebulizzatori, anche per valori del vento molto contenuti (<1.5m/s).

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] UN, Adoption of the paris agreement, in: United Nations Framew. Conv. Clim. Chang. Paris, 2015: p. 31.
- [2] ANSYS Inc, ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2009.
- [3] ENVI-met, (n.d.). <https://www.envi-met.com/>.
- [4] M. Santamouris, L. Ding, F. Fiorito, P. Oldfield, P. Osmond, R. Paolini, D. Prasad, A. Synnefa, Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects, *Sol. Energy*. 154 (2017) 14–33. doi:10.1016/j.solener.2016.12.006.
- [5] F.J.S. Dominguez, S. Alvarez, de la Flor, The effect of evaporative techniques on reducing urban heat, Santamouris, M., Kolokotsa, D. *Urban Clim. Mitig. Tech.* Routledge, London. (2016).
- [6] G. Manteghi, H. Bin Limit, D. Remaz, Water Bodies an Urban Microclimate: A Review, *Mod. Appl. Sci.* 9 (2015) 1. doi:10.5539/mas.v9n6p1.
- [7] J. Nunes, I. Zoilo, N. Jacinto, A. Nunes, T. Campos, M. Pacheco, D. Fonseca, Misting-cooling systems for microclimatic control in public space., Available through <<http://Www.Proap.Pt/847/Misting-Cooling-Systemsfor-Microclim.> (2016).
- [8] H. Yamada, G. Yoon, M. Okumiya, H. Okuyama, Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental examination of particle size distribution and cooling effects, *Build. Simul.* 1 (2008) 214–222. doi:10.1007/s12273-008-8115-y.
- [9] G.H.Y. Yoon, Study on a cooling system using water mist sprayers; system control considering outdoor environment., Korea-Japan Jt. Symp. Human-Environment Syst. Cheju, Korea, p. 4. (2008).
- [10] T.A.L. Martins, L. Adolphe, M. Bonhomme, F. Bonneaud, S. Faraut, S. Ginestet, C. Michel, W. Guyard, Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France, *Sustain. Cities Soc.* 26 (2016) 9–26. doi:10.1016/J.SCS.2016.05.003.
- [11] C. O'Malley, P. Piroozfar, E.R.P. Farr, F. Pomponi, Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis, *Sustain. Cities Soc.* 19 (2015) 222–235. doi:10.1016/J.SCS.2015.05.009.
- [12] A. Chatzidimitriou, P. Liveris, M. Bruse, L. Topli, Urban Redevelopment and Microclimate Improvement : A Design Project in Thessaloniki , Greece, *PLEA 2013 Sustain. Archit. a Renew. Futur.* (2013).
- [13] M. Taleghani, D.J. Sailor, M. Tenpierik, A. van den Dobbelen, Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA, *Build. Environ.* 73 (2014) 138–150. doi:10.1016/J.BUILDENV.2013.12.006.
- [14] A.I. Dounis, M.J. Santamouris, C.C. Lefas, Building visual comfort control with fuzzy reasoning, *Energy Convers. Manag.* 34 (1993) 17–28. doi:10.1016/0196-8904(93)90004-T.
- [15] M. Košir, Adaptive Building Envelope: An Integral Approach to Indoor Environment Control in Buildings, in: *Autom. Control Trends, InTech*, 2016. doi:10.5772/64951.
- [16] C. Price, B.P. Rasmussen, Optimal tuning of cascaded control architectures for nonlinear HVAC systems, *Sci. Technol. Built Environ.* 23 (2017) 1190–1202. doi:10.1080/23744731.2016.1262663.
- [17] G. Ulpiani, M. Borgognoni, A. Romagnoli, C. Di Perna, Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building, *Energy Build.* 116 (2016) 1–17. doi:10.1016/J.ENBUILD.2015.12.027.
- [18] G. Ulpiani, Overheating phenomena induced by fully-glazed facades: Investigation of a sick building

- in Italy and assessment of the benefits achieved via fuzzy control of the AC system, *Sol. Energy*. 158 (2017). doi:10.1016/j.solener.2017.10.024.
- [19] R. Babuška, H.B. Verbruggen, An overview of fuzzy modeling for control, *Control Eng. Pract.* 4 (1996) 1593–1606. doi:10.1016/0967-0661(96)00175-X.
- [20] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the Human parameter, *Sol. Energy*. 70 (2001) 227–235. doi:10.1016/S0038-092X(00)00093-1.
- [21] S. Coccolo, J. Kämpf, J.L. Scartezini, D. Pearlmutter, Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards, *Urban Clim.* 18 (2016) 33–57. doi:10.1016/j.uclim.2016.08.004.
- [22] F. Salata, I. Golasi, R. de Lieto Vollaro, A. de Lieto Vollaro, Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy, *Build. Environ.* 96 (2016) 46–61. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.023.
- [23] F.R. d’Ambrosio Alfano, B.I. Palella, G. Riccio, Thermal Environment Assessment Reliability Using Temperature —Humidity Indices, *Ind. Health*. 49 (2011) 95–106. doi:10.2486/indhealth.MS1097.
- [24] C. Balaras, I. Tselepidaki, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, Calculations and statistical analysis of the environmental cooling power index for Athens, Greece, *Energy Convers. Manag.* 34 (1993) 139–146. doi:10.1016/0196-8904(93)90155-4.
- [25] M. Santamouris, N. Gaitani, A. Spanou, M. Saliari, K. Giannopoulou, K. Vasilakopoulou, T. Kardomateas, Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results of the flivos project, *Build. Environ.* 53 (2012) 128–136. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
- [26] ISO, ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities, (1998).
- [27] H. Montazeri, Y. Toparlar, B. Blocken, J.L.M. Hensen, Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: A computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands, *Landsc. Urban Plan.* 159 (2017) 85–100. doi:10.1016/j.landurbplan.2016.10.001.
- [28] H. Montazeri, B. Blocken, J.L.M. Hensen, Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis, *Build. Environ.* 83 (2015) 129–141. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.022.
- [29] J.L. Estivalèzes, D. Zuzio, B. DiPierro, An improved multiscale Eulerian-Lagrangian method for simulation of atomization process, *Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des.* 135 (2018) 65–77. doi:10.1007/978-3-319-60387-2\_6.
- [30] M. Alitavoli, A. Darvizeh, M. Moghaddam, P. Parghou, R. Rajabiehfard, Numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian approach and experimental investigation of water jet spot welding process, *Thin-Walled Struct.* 127 (2018) 617–628. doi:10.1016/j.tws.2018.02.005.
- [31] D.P. Schmidt, F. Bedford, An analysis of the convergence of stochastic Lagrangian/Eulerian spray simulations, *Int. J. Multiph. Flow.* 102 (2018) 95–101. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.01.024.
- [32] S. Hoyas, A. Gil, X. Margot, D. Khuong-Anh, F. Ravet, Evaluation of the Eulerian-Lagrangian Spray Atomization (ELSA) model in spray simulations: 2D cases, *Math. Comput. Model.* 57 (2013) 1686–1693. doi:10.1016/j.mcm.2011.11.006.
- [33] X. Li, Y. Shang, Y. Yan, L. Yang, J. Tu, Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian-Lagrangian approach, *Build. Environ.* 128 (2018) 68–76. doi:10.1016/j.buildenv.2017.11.025.
- [34] S.A. Morsi, A.J. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *J. Fluid Mech.* 55 (1972) 193. doi:10.1017/S0022112072001806.
- [35] H. Montazeri, B. Blocken, J.L.M. Hensen, CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system, *Appl. Therm. Eng.* 75 (2015) 608–622. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.09.078.
- [36] L.A. Dombrovsky, V.P. Solovjov, B.W. Webb, Attenuation of solar radiation by a water mist from the ultraviolet to the infrared range, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 112 (2011) 1182–1190. doi:10.1016/j.jqsrt.2010.08.018.

- [37] M. Bruse, H. Fler, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environ. Model. Softw.* 13 (1998) 373–384. doi:10.1016/S1364-8152(98)00042-5.
- [38] G.L. Mellor, T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys.* 20 (1982) 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

CFD = Computational Fluid Dynamics

DNS = Direct Numerical Simulation

DO = Discrete Ordinates

H = Humidex

NI = National Instruments

PE = Cooling Power Index

RANS = Reynolds-Averaged Navier Stokes

RTD = Resistance Temperature Detector

UHI = Urban Heat Island

## Brevi Curricula Vitae del gruppo di ricerca

### **Costanzo Di Perna**

Professore Ordinario in Fisica Tecnica Ambientale, afferente al Dipartimento di Ingegneria e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. Docente di Progettazione Energetica degli edifici e Impianti di climatizzazione presso la facoltà di Ingegneria. Autore di oltre 190 pubblicazioni in campo scientifico su riviste italiane ed internazionali nel settore della Fisica tecnica. Responsabile di numerose attività di ricerca nel campo delle analisi energetiche di edifici e nella progettazione e realizzazione di impianti termici. E' consulente per il Dipartimento da diversi anni di ditte del settore termotecnica per lo sviluppo e l'ottimizzazione di componenti. Inserito in comitati tecnici nazionali per lo sviluppo della normativa per la certificazione energetica e energetica-ambientale. Svolge inoltre attività di divulgazione dell'evoluzione della normativa nell'ambito della certificazione energetica degli edifici e degli impianti tecnici per gli edifici.

### **Marco D'Orazio**

Professore Ordinario in Architettura Tecnica presso il dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche. Ha conseguito due lauree (Ingegneria Edile ed Architettura) nonché il dottorato di ricerca in ingegneria edile. Già presidente della Società Scientifica di Architettura Tecnica è attualmente Preside della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. E' presidente di commissioni tecniche nazionali ed esperto nazionale in commissioni tecniche europee. Dal 1990 si occupa di sviluppo, ottimizzazione e valutazione prestazionale di componenti edili. Ha all'attivo il coordinamento e la partecipazione a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali inerenti tali tematiche. È autore o coautore di oltre 260 pubblicazioni, tra cui monografie, articoli in riviste internazionali peer-reviewed e contributi a convegni qualificati a livello nazionale ed internazionale.

### **Giulia Ulpiani**

Assegnista di ricerca presso l'Università Politecnica delle Marche, impegnata nel controllo e caratterizzazione termodinamica di sistemi di raffrescamento evaporativo contro l'overheating degli spazi esterni. PhD in Ingegneria Industriale, sui temi di efficienza energetica, comfort e resilienza al cambiamento climatico nell'ambiente costruito. Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica. Autore principale e responsabile della corrispondenza di quattro articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali (Energy and Buildings e Solar Energy) e co-autore di quattro articoli pubblicati su Energy and Buildings e Science of The Total Environment.

### **Elisa Di Giuseppe**

Ricercatrice in Architettura Tecnica presso il dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, dottore di ricerca in architettura, costruzioni e strutture. Dal 2007 si occupa di sviluppo, ottimizzazione e valutazione prestazionale di componenti edili, con particolare interesse verso l'efficienza energetica, l'interazione con l'uomo, la sostenibilità ambientale ed economica nel ciclo di vita. Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali inerenti tali tematiche. È autrice o coautrice di oltre 80 pubblicazioni, tra cui monografie, articoli in riviste internazionali peer-reviewed e presso convegni qualificati a livello nazionale ed internazionale.